МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

БЕЛОРУССКАЯ ЖЕЛЕЗНАЯ ДОРОГА

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

# ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ НА ТРАНСПОРТЕ

МАТЕРИАЛЫ
XIV МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ,
ПОСВЯЩЕННОЙ ПЯТИЛЕТКЕ КАЧЕСТВА
(Гомель, 20–21 ноября 2025 г.)

Ч а с т ь 1

Под общей редакцией *Н. Н. КАЗАКОВА*

Гомель 2025

УДК 656.08
ББК 39.18
П78

Редакционная коллегия:

**Н. Н. Казаков** (отв. редактор), **Ю. Г. Самодум** (зам. отв. редактора),
**А. А. Ерофеев** (зам. отв. редактора), **Т. М. Маруняк** (отв. секретарь),
**К. А. Бочков, Т. А. Власюк, И. А. Еловой, П. В. Ковтун, Е. Ф. Кудина, Д. В. Леоненко, Д. В. Ляпоров, В. Я. Негрей, А. В. Пигунов, А. Г. Ташкинов, С. Л. Шатров**

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор **А. Ф. Бородин**
(Институт экономики и развития транспорта, г. Москва);
доктор технических наук, профессор **Ю. О. Пазойский**
(Российский университет транспорта (МИИТ));
доктор технических наук, профессор **Ю. М. Плескачевский**
(член-корреспондент НАН Беларуси);
доктор технических наук, профессор **Н. К. Турсунов**
(Ташкентский государственный транспортный университет)

П78 **Проблемы** безопасности на транспорте : материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. пятилетке качества (Гомель, 20–21 ноября 2025 г.) : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Н. Н. Казакова. – Гомель : БелГУТ, 2025. – 411 с.
ISBN 978-985-891-231-4 (ч. 1)

Рассматриваются теоретические и организационно-технические основы обеспечения безопасности транспортных систем; пути повышения безопасности и надежности подвижного состава и систем электроснабжения; информационная и функциональная безопасность систем автоматики, телемеханики и связи; энергетическая и экологическая безопасность транспорта; вопросы безопасности транспортной инфраструктуры; надежности и безопасности зданий и сооружений; безопасности пассажирских перевозок; естественные науки в обеспечении безопасности транспортных систем; экономическая безопасность транспортных систем; транспортная безопасность при угрозе и возникновении чрезвычайных ситуаций; тенденции развития образования в системе обеспечения кадровой безопасности транспортного комплекса.

Для ученых, преподавателей учебных заведений транспортного профиля, научных и инженерно-технических работников научно-исследовательских и проектных организаций, предприятий и учреждений транспорта и строительства.

**УДК 656.08**
**ББК 39.18**

**ISBN 978-985-891-231-4 (ч. 1)**
**ISBN 978-985-891-230-7**

© Оформление. БелГУТ, 2025

## *УВАЖАЕМЫЕ УЧАСТНИКИ КОНФЕРЕНЦИИ!*

*От имени организационного комитета приветствую вас на XIV Международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте».*

*Конференция посвящена пятилетке качества. Понятия качества и безопасности неразрывно связаны и являются ключевыми приоритетами транспортной отрасли. Повышение качества производимой продукции и оказываемых услуг предполагает внедрение современных технологий, форм контроля качества и организации труда, рационализаторских инициатив, а также высокую мотивацию специалистов.*

*Обеспечение безопасности на транспорте как составляющая качества является важнейшей задачей для ученых и специалистов в различных областях деятельности. Активный диалог между наукой и производством по проблемам безопасности позволяет сформулировать новые подходы и найти эффективные решения актуальных задач безопасности транспортного и строительного комплексов.*

*Программа конференции направлена на обсуждение широкого круга вопросов по безопасности транспортных систем, пассажирских перевозок, надежности подвижного состава, систем автоматики, телемеханики и связи, транспортной инфраструктуры, строительного комплекса, экологической, энергетической и экономической безопасности, транспортной безопасности при угрозе возникновения чрезвычайных ситуаций, фундаментальным научным исследованиям в области безопасности транспортных систем, что позволит найти комплексные, эффективные решения сложнейших задач в области безопасности на транспорте. Впервые на конференции будут рассматриваться вопросы развития образования в системе обеспечения кадровой безопасности транспортного комплекса.*

*В очной и дистанционной формах работы 11 секций конференции принимает участие более 400 докладчиков. Большой интерес к конференции проявили ученые и специалисты из России, Узбекистана, Казахстана, Китая. Выражаю уверенность, что обмен мнениями, активное сотрудничество специалистов в различных направлениях деятельности позволят найти взвешенное, комплексное решение многих важнейших задач в области безопасности на транспорте.*

*Не могу не отметить большую помощь, которую оказывают Министерство транспорта и коммуникаций Республики Беларусь, Белорусская железная дорога в проведении ставшей уже традиционной конференции.*

*Благодарю вас за участие в работе конференции, желаю крепкого здоровья, большого личного счастья, успехов в решении научных и производственных задач, безопасности во всех сферах жизнедеятельности!*

***НИКОЛАЙ КАЗАКОВ,***
***ректор Белорусского государственного университета транспорта,***
***председатель организационного комитета конференции***

# 1 БЕЗОПАСНОСТЬ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

УДК [656.022.63:656.21.08](510)

## ВЛИЯНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАДЕРЖЕК ПОЕЗДОВ НА БЕЗОПАСНОСТЬ РАБОТЫ ТЕХНИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ: АНАЛИЗ И ОЦЕНКА РИСКОВ

*ВАН СИНЬ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Ключевые вопросы безопасности и эффективности остаются центральными в исследованиях железнодорожного транспорта. Хотя предыдущие исследования заложили для них прочный фундамент, в условиях быстрого расширения сети и технологических итераций по-прежнему возникают новые проблемы безопасности и эффективности, и их совместное повышение остается ключевым направлением, заслуживающим углубленного изучения.

В операционной деятельности железнодорожного транспорта причинами отклонения движения поездов от установленного графика являются отказы оборудования, неблагоприятные погодные условия, стихийные бедствия, недостаточные меры аварийного реагирования и т. д. Обобщая результаты исследований отечественных и зарубежных ученых, вышеупомянутые факторы можно свести к четырем основным категориям: системные факторы, факторы окружающей среды, человеческий фактор и взаимное влияние между поездами [1–3].

Системные, экологические и человеческие факторы являются непосредственными причинами задержек поездов, а вызванные этими факторами опоздания могут далее распространяться на другие поезда, создавая цепную реакцию и усугубляя нарушение графика движения. Китайская высокоскоростная железная дорога характеризуется высокой скоростью движения и большой плотностью поездов, что делает ее особенно «восприимчивой» к различным помехам. Как только возникает задержка, диспетчеры должны оперативно скорректировать график движения, чтобы восстановить пунктуальность поездов. Если корректировка осуществляется несвоевременно, задержка головного поезда сказывается на движении следующих поездов и далее по сети, формируя явление «распространения задержек». На участках с напряженной пропускной способностью и недостаточной гибкостью графика движения распространение задержек происходит быстрее и охватывает более широкие области, что легко может привести к крупномасштабным задержкам поездов в короткие сроки.

Чтобы количественно оценить масштабы этого явления, обратимся к статистическим данным о задержках на конкретных станциях (таблица 1, рисунок 1).

*Таблица 1* – **Статистика продолжительности задержек по станциям** [4]

| Станция | Среднее время опоздания, мин | Дисперсия времени опоздания | Эксцесс времени опоздания | Доля опозданий > 5 мин, % |
|---|---|---|---|---|
| Гуанчжоунан | 9,04 | 138,57 | 8,16 | 48,83 |
| Циншэн | 9,42 | 135,64 | 8,19 | 47,85 |
| Хумэнь | 10,09 | 139,75 | 7,70 | 52,95 |
| Гуанминчэн | 9,85 | 146,58 | 7,14 | 47,26 |
| Шэньчжэньбэй | 10,66 | 150,57 | 7,44 | 56,23 |

Проанализируем статистику задержек по станциям на примере высокоскоростной магистрали Гуанчжоу – Шэньчжэнь. На станции Гуанчжоу-Юг (как на начальной) зафиксировано наименьшее среднее время опоздания (9,04 минуты), однако высокая дисперсия (138,57) указывает на значительные колебания в продолжительности задержек. По мере продвижения к конечной станции время опоздания возрастает, достигая максимума на станции Шэньчжэнь-Север (10,66 минут) с наибольшим разбросом (150,57), что свидетельствует о возрастающей нестабильности.

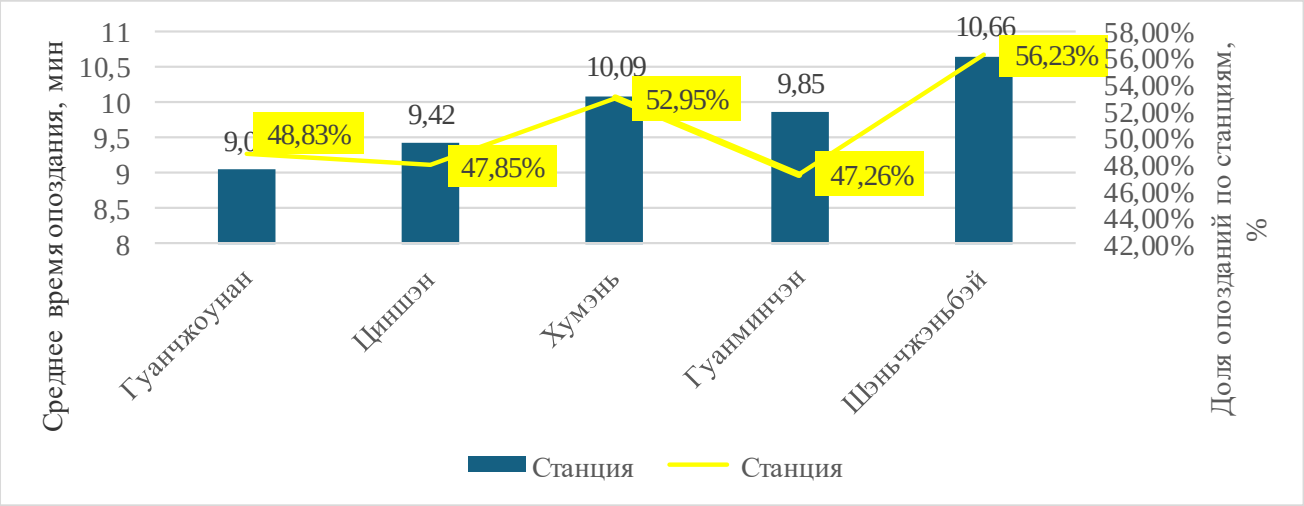



Рисунок 1 – Диаграмма среднего времени опозданий и частотного распределения их продолжительности по станциям

На участке Хумэнь – Гуанминчэн наблюдалось временное сокращение опозданий благодаря оперативному регулированию, однако эти меры не смогли полностью устранить накопленные задержки. Распределение частоты опозданий показывает рост доли длительных задержек (свыше 20 минут) к конечной станции, что отражает структурное усложнение проблемы и недостаточную способность системы к восстановлению.

Важно отметить, что рост опозданий не только снижает эффективность перевозок, но и создает серьезные риски для безопасности работы технических станций. Сжатые интервалы прибытия и отправления, интенсивное использование инфраструктуры повышают нагрузку на диспетчерское управление и требуют усиления контроля за соблюдением стандартов эксплуатации. Необходимо уделять особое внимание предотвращению потенциальных угроз безопасности, вызванных нарушением графика движения.

**Список литературы**

1 **Авдошин, С. М.** Концепция создания интеллектуальной системы ситуационного реагирования и обеспечения безопасности железных дорог современной России / С. М. Авдошин, М. С. Горбатовский, А. В. Чернов // Бизнес-информатика. – 2011. – № 4 (18). – С. 8–15.

2 **Wang, Fei.** Dual Objective Optimization of Train Arrival-Departure track Adjustment of High Speed Railway Considering Delay / Wang Fei // Railway Transport and Economy. – 2025. – № 47 (7). – С. 117–125.

3 **Чжан Ингуй.** Оптимизация использования путей прибытия-отправления на высокоскоростных железнодорожных станциях при двухфакторных возмущениях / Чжан Ингуй, Чжоу Цзинъин, Ван Юйхан // Журнал железнодорожной науки и техники. – 2025. – С. 1–14.

4 **У Юнган**. Исследование методов классификации и прогнозирования задержек высокоскоростных поездов на основе инкрементальной кластеризации / У Юнган // Пекинский университет транспорта. – 2024. – С. 20.

УДК 656.2:693.5

## РОССИЙСКИЕ ИННОВАЦИИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ ВСМ МОСКВА – САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

*А. М. ДАВЫДОВ, С. М. КОКИН, П. В. КУРЕНКОВ*
*Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва*

Высокоскоростная магистраль (ВСМ) Москва – Санкт-Петербург – один из самых крупных инфраструктурных проектов последних лет в России как по объему финансирования (2,35 трлн руб. инвестиций), так и по количеству организаций-участников (около 1 тыс.). Протяженность трассы составит 679 километров. Запуск магистрали запланирован на 2028 год.

Уникальность проекта заключается в комплексном применении инновационных решений на всех этапах строительства и эксплуатации [1, 2], при этом (с учетом китайского опыта) акцент ставится на отечественные разработки. Заявленный курс на импортозамещение делает ВСМ одним из приоритетов в логике текущей экономической политики России [3]. В этой связи представляет интерес анализ отечественных патентных документов с точки зрения их содержания, правообладания и динамики патентной активности.

Необходимая информация для анализа новых инженерных решений получена на основе публикаций и патентных записей, содержащихся в открытом доступе. В настоящей работе были использованы данные портала «Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU», а также онлайн-поисковой системы и базы данных Google Patents. Результаты анализа представлены ниже.

В качестве наиболее важных *инфраструктурных инноваций* можно выделить следующие:

– безбалластное верхнее строение пути — впервые в России будет применена технология укладки пути на железобетонных плитах с интегрированными рельсами – 109 патентов;

– унифицированные мостовые сталежелезобетонные конструкции нового типа – 70 патентов;

– отечественная стрелочная продукция современного образца – 544 патента;

– высокоточная система управления движением с автоматическим контролем дистанции между поездами – 5386 патентов.

К числу *новых технологических решений* следует отнести:

– контактную сеть, обеспечивающую движение со скоростью до 400 км/ч – 4125 патентов;

– цифровую радиосвязь широкополосного типа – 1573 патента;

– инновационные контактные провода с повышенной электропроводностью и механической прочностью – 1677 патентов.

Особое внимание при строительстве ВСМ уделено разработке *тормозной системы*:

– электрическая система торможения с преобразованием кинетической энергии в электрическую – 1109 патентов;

– фрикционный механизм дополнительного торможения – 298 патентов;

– создание новых материалов для тормозных колодок – 2446 патентов.

Проведенный анализ патентных документов дает следующую картину.

*Пик патентной активности* российских изобретателей относится к периоду 2017–2022 гг.

*Безбалластная конструкция пути* является ключевым элементом строительства ВСМ [4]. В отличие от традиционных железных дорог, где используются шпалы, на высокоскоростных магистралях применяется следующая многослойная структура: верхний слой из самоуплотняющегося бетона; заводские бетонные плиты; гидроизоляционный слой; основное бетонное основание, заливаемое на земляную насыпь. Основные организации-правообладатели в этой области: ОАО «РЖД», ООО «Российская Инженерная Академия», Международная общественная организация «Фонд Изобретательской Деятельности Инженерной Академии», АО «РЖДстрой».

*Мостовые конструкции*. Сталежелезобетонные конструкции применяются для создания мостовых сооружений (включают железобетонную плиту проезжей части, стальные главные балки, согласование совместной работы всех элементов конструкции). Основные организации-правообладатели в этой области – частные лица.

*Отечественная стрелочная продукция* современного образца. Основные организации-правообладатели: ОАО «РЖД», ОАО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте», ОАО «Радиоавионика», ООО «Научно-технический центр информационных технологий».

*Высокоточная система управления движением* с автоматическим контролем дистанции между поездами. Основные организации-правообладатели: ОАО «РЖД», ОАО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» [5].

*Контактная сеть нового поколения* для обеспечения движения со скоростью до 400 км/ч. Основные организации-правообладатели: ОАО «РЖД», АО «Универсал-контактные сети».

*Цифровая радиосвязь широкополосного типа*. Основные организации-правообладатели: QUALCOMM Inc., Samsung Electronics Co. Ltd., Ford Global Technologies LLC, Microsoft Corporation.

*Инновационные контактные провода* с повышенной электропроводностью и механической прочностью. Основные организации-правообладатели: Ethicon Endo-Surgery LLC, Saint-Gobain Glass France, ООО НПО «Современные Пожарные Технологии».

*Электрическая система торможения* с преобразованием кинетической энергии в электрическую. Основные организации-правообладатели: Ford Global Technologies LLC, Ethicon Endo-Surgery LLC, Nissan Motor Company Ltd, Тойота Дзидося Кабусики Кайся.

*Фрикционный механизм дополнительного торможения*. Основные организации-правообладатели: Ford Global Technologies LLC, Scania CV AB, Тойота Дзидося Кабусики Кайся, Simens AG.

*Разработка новых материалов* для тормозных колодок (сталь, чугун, керамика, композиты). Основные организации-правообладатели ОАО «РЖД», Ethicon Endo-Surgery Inc.

Инновационная составляющая проекта ВСМ Москва – Санкт-Петербург включает разработку отечественного *подвижного состава*. Головные организации по производству высокоскоростных поездов – компания «Синара» и ее дочернее предприятие «Уральские локомотивы».

Проведенный анализ патентного фонда говорит о том, что отечественные изобретатели вносят достойный вклад в решение проблем, связанных с развитием высокоскоростного транспорта. Более того, разрабатываемые технологии и решения найдут (и находят) применение не только в ж.-д. отрасли, но и в других сферах народного хозяйства, способствуя развитию транспортной инфраструктуры страны, стимулируя производство новых материалов и оборудования [6].

В целом уже сейчас можно говорить о том, что проект ВСМ Москва – Санкт-Петербург является катализатором технологического развития России, так как открывает новые возможности для применения инновационных решений в инфраструктурных проектах различного масштаба.

**Список литературы**

1 **Бухтенкова, А. В.** Инновационные решения в рамках строительства первой высокоскоростной магистрали Москва – Санкт Петербург / А. В. Бухтенкова, М. В. Волкова // Техника и технология транспорта. – 2021. – № 2 (21). – С. 16. – URL: http://transport-kgasu.ru/files/N21-16TI221.pdf (дата обращения : 10.08.2025).

2 **Валинский, О. С.** Научное обеспечение проектирования и строительства высокоскоростных железнодорожных магистралей / О. С. Валинский, И. П. Киселёв // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2024. – № 1 (110). – С. 11–28.

3 **Помыткина, Н. А.** Высокоскоростные магистрали России и их влияние на экономику / Н. А. Помыткина, Н. В. Кочарин // Автоматика, связь, информатика. – 2025. – № 6. – С. 13–17.

4 Основополагающие требования к конструкции земляного полотна высокоскоростных железнодорожных линий / А. Ф. Колос, А. В. Петряев, И. В. Колос [и др.] // Бюллетень результатов научных исследований. – 2018. – № 1. – С. 36–48.

5 **Никитин А. Б.** Технические нормы и требования к системам автоматики и телемеханики высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Санкт Петербург / А. Б. Никитин, В. В. Моисеев // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2024. – № 1 (110). – С. 49–52.

6 **Кашкин, Н. В.** О развитии в России высокоскоростного движения в 2017–2023 годах и на ближайшую перспективу до 2035 года / Н. В. Кашкин, А. Ю. Трошин // Транспортное строительство. – 2023. – № 4. – С. 2–6.

УДК 004.942:656.2

## ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

*А. А. ЕРОФЕЕВ, И. Н. БАБАРИКО*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Динамика современного транспортного рынка и растущие требования со стороны клиентов создают серьёзные вызовы для предприятий транспорта, связанные с необходимостью поддерживать качество транспортных услуг на должном уровне. Клиенты ожидают быструю и своевременную доставку грузов при безусловном обеспечении безопасности перевозок, при этом транспортные услуги должны быть гибкими, адаптированными под индивидуальные потребности каждого отдельного клиента. Для того чтобы сохранить конкурентоспособность, железнодорожный транспорт должен своевременно адаптироваться под современные потребности грузовладельцев. Это требует от железных дорог эффективного распоряжения имеющимися техническими средствами, такими как путевая инфраструктура и подвижной состав, равно как и непрерывного поддержания их в тех-

нически исправном и работоспособном состоянии. Кроме того, требуется оперативное и точное реагирование на нештатные ситуации, с тем чтобы минимизировать их негативные последствия. Развитие информационных технологий способно внести значительный вклад в решение указанных задач. Одним из наиболее перспективных способов применения современных достижений в управлении производственным процессом является создание цифровых двойников (ЦД) [1].

Технология «Цифровой двойник» (англ. *«Digital Twin»)* стремительно набирает популярность в последние годы, и во многих отраслях радикально изменяет подходы к оперативному управлению. Под ЦД понимается виртуальный клон некоей одушевлённой или неодушевлённой сущности, который может обмениваться информацией и обратной связью между реальным и цифровым миром. ЦД можно рассматривать как результат объединения многих передовых технологий, среди которых ключевыми являются следующие [2].

1 Интернет вещей. Функционирование ЦД требует обязательного наличия датчиков, которые собирают данные о состоянии моделируемого объекта. Помимо сбора данных от датчиков необходим обмен информацией между всеми физическими устройствами, задействованными в функционировании ЦД, такими как исполнительные и вычислительные устройства, что обусловливает применение технологии интернета вещей в создании ЦД.

2 Облачные вычисления. Под ними понимается модель предоставления услуг информационно-коммуникационных технологий по компьютерной сети для сбора и обработки информации. Облачные службы включают в себя физические сетевые устройства, серверы и хранилища, программное обеспечение, операционные системы и приложения, то есть прикладные компьютерные программы. Целью облачных служб является предоставление конечным пользователям безопасных, надежных и мощных вычислительных возможностей для своих пользователей. Это эффективная технология, которая позволяет пользователям, таким как железные дороги, получить за умеренную плату в распоряжение все преимущества развитой IT-инфраструктуры, без необходимости создавать собственные вычислительные центры, что может быть долго, дорого и для чего у железных дорог, как правило, нет необходимых компетенций.

3 Анализ биг дата. Термин «биг дата» происходит от английского Big Data, что означает «Большие данные». Под ним понимается массив информации значительного объёма, полученной из широкого спектра источников, который невозможно обработать традиционными методами, такими как экспертный анализ, в силу слишком большого количества информации. Для обработки биг дата были выработаны специальные инструменты, такие как статистический анализ и машинное обучение. Их использование позволяет принимать оптимальные управленческие решения, повысить уровень безопасности и выявлять глубинные причины тех или иных проблем.

4 Искусственный интеллект. Существует множество подходов к определению искусственного интеллекта, в том числе философских и метафизических, однако в технике под искусственным интеллектом (ИИ), как правило, понимаются программные решения, основанные на методах нелинейной оптимизации, применяемых к большим массивам предварительно подготовленных данных. В результате такие системы приобретают способность решать задачи, не входившие в исходный (обучающий) набор, демонстрируя свойства обобщения и адаптации. Технологии ИИ активно внедряются во все сферы человеческой деятельности, и ЦД не являются исключением. Применительно к ЖД транспорту они имеют большой потенциал для повышения безопасности движения, снижения себестоимости транспортных услуг и решения оптимизационных задач.

Сферы применения ЦД включают поддержку принятия управленческих решений в промышленности, обучение, постановку диагнозов в медицине, прогнозирование выхода из строя оборудования. В последнее время ЦД широко используется для обслуживания пассажиров на железнодорожном транспорте, однако в целом по отрасли данная технологии находится всё ещё в стадии становления. Тем не менее уже на данном этапе существуют масштабные проекты цифровых двойников для железнодорожного транспорта (ЦДЖ), которые находят применение в производственной деятельности [1].

Примером может служить ЦДЖ для железных дорог Германии [3]. Его разработкой занимается структурное подразделение Deutsche Bahn Digitale Schiene Deutschland («Цифровая ЖД для Германии») в сотрудничестве с корпорацией NVIDIA. В нём должна быть физически точно отражена вся сеть железных дорог Германии, насчитывающая около 5700 станций и 33000 км путей. Уделяется внимание визуальному представлению моделируемых объектов, которые должны быть в 3D и фо-

тореалистичными. Развитие ЦД должно дать возможность увеличивать пропускную способность инфраструктуры без строительства новых ЖД путей, создать условия для автоматического вождения поездов с минимальными интервалами и высоким уровнем безопасности. Ожидается, что технологии NVIDIA, в частности мультивселенной Omniverse, могут стать началом воплощения в жизнь видения полностью автоматической железной дороги, которая будет иметь лучшие показатели провозной способности, эффективности и качества, сможет успешно конкурировать с автомобильным транспортом и уменьшить выбросы углерода в атмосферу. Когда ЦД будет идеально синхронизирован с реальным миром, он может быть использован для оптимизационных тестов и для оценки сценариев «что если», чтобы прогнозировать последствия тех или иных изменений в системе.

Италия [4] также работает над созданием цифрового двойника для своей железной дороги, которая насчитывает 16000 км путей. Его разработкой занимается компания «Transportation and Logistics Business Unit at AlmavivA». ЦД включает в себя все объекты железнодорожной инфраструктуры, такие как станции, мосты, тоннели, объекты энергоснабжения. Так же, как и в Германии, ведутся работы над созданием 3D реплики реальной ЖД. Одним из способов применения цифрового клона в Италии видится улучшение управляемости системы, поскольку менеджеры линейного уровня получат доступ к исчерпывающей информации об инфраструктуре и смогут благодаря этому принимать решения без консультаций со специалистами на более высоком уровне. Более того, это должно мотивировать линейных менеджеров быть более проактивным и предупреждать проблемы вместо того, чтобы на них реагировать. Уже на настоящем этапе развития ЦКЖ в Италии он даёт хорошие результаты в том, что касается ускорения бизнесс-процессов за счёт быстрого доступа специалистов ко всей нужной информации.

ЦД может использоваться также для контроля за состоянием объектов инфраструктуры, таких как мосты, с использованием технологии SHM (structure health monitoring – структурный мониторинг исправности). Под ним понимается процесс оценки состояния, объекта основанный на информации от установленной на данном объекте аппаратуры [5]. Данный процесс включает в себя четыре фазы.

1 Измерения. Комплекс аппаратуры, расположенный на объекте, собирает сведения об его состоянии, которые можно контролировать и анализировать.

2 Мониторинг, для обеспечения которого требуются технологии передачи информации и её отображения.

3 Анализ, который понимается как набор техник, которые на основании данных, поступающих от датчиков, позволяют делать выводы о состоянии контролируемого объекта и распознавать неисправности.

4 Поддержка принятия решений, касающихся обслуживания контролируемого объекта.

Известен экспериментальный пример использования ЦД для мониторинга состояния одного из ЖД мостов в Испании [5]. Для сбора информации используются акселерометры, установленные в контролируемых точках моста. Информация от них концентрируется в шлюзе, с которым датчики объединены при помощи технологии Wi-Fi. Чтобы не перегружать систему избытком информации и сократить потребление энергии датчиками, сбор информации запускается только при движении поездов по мосту. Электроснабжение датчиков и шлюза является автономным и осуществляется с использованием солнечных панелей. Со шлюза информация передаётся в локальную сеть, где принимается в режиме реального времени и обрабатывается с сохранением в базе данных. Далее информация поступает в облачную сеть. В облачной сети информация сохраняется в «озере данных» в виде, пригодном для машинного обучения, и на основании данной информации происходит собственно машинное обучение, цель которого – научиться выявлять структурные дефекты на основе данных о вибрациях элементов моста при проследовании по нему поездов. Например, увеличение величин вибраций при прочих равных условиях (то есть при проследовании сходных по параметрам поездов), лежащих в определённых диапазонах частот, позволяет сделать вывод о снижении жёсткости конструкции. Появление новых пиков вибраций, то есть интенсивных вибраций на таких частотах, где раньше их не наблюдалось, также может означать, что конструкции нанесён вред. Это происходит, например, когда из-за изменений амортизационных свойств элементов моста его колебания продолжаются некоторое время после проследования поезда. Достигнутая при машинном обучении точность выявления отклонений от нормы превысила 99,9 %. Однако исследователями сделан вывод, что такая технология мониторинга состояния мостов является дорогостоящей

и применима лишь для наиболее важных или же находящихся в угрожающем техническом состоянии мостов.

Другим перспективным направлением использования ЦД на железнодорожном транспорте является обучение персонала. Они незаменимы при отработке действий в опасных ситуациях, где в реальности человек может ошибиться только один раз, а также при обучении персонала управлению сложными дорогостоящими техническими объектами, особенно если они существуют в единственном экземпляре. Примером второго могут служить крупные железнодорожные станции, каждая из которых имеет некие особые местные условия, и при этом ошибки в управлении ими могут иметь тяжёлые последствия. Использование ЦД в обучении имеет множество преимуществ. Это экономит ресурсы по сравнению с обучением на реальных объектах, позволяет отрабатывать широкий диапазон различных ситуаций, в том числе опасных и редко встречающихся.

При внедрении ЦД на железнодорожном транспорте важно принимать в расчёт специфику, обусловленную высокими требованиями безопасности и надёжности, предъявляемыми к железнодорожному транспорту. Скорость цифровизации на ЖД ограничивается наличием строгих нормативов по безопасности, которым обязаны следовать перевозчики [2]. Необходимо постоянно обеспечивать соблюдение требований информационной безопасности при сборе, хранении и обработке информации, поскольку сбой, вызванный ошибками в программном обеспечении, поломкой оборудования или злонамеренным вмешательством, может иметь самые тяжёлые последствия вплоть до массовой гибели людей. Внедрение цифровых двойников связано с кратным ростом числа датчиков и объёма передаваемой от них информации, что требует принятия мер для обеспечения её конфиденциальности, таких как использование шифрования и протоколов для контроля целостности переданной информации. Также необходимы системы контроля и управления доступом и надежные механизмы аутентификации. В случае применения ЦД для обслуживания пассажиров приобретает важность обеспечения сохранности персональных данных пассажиров.

**Список литературы**

1 **Werbińska-Wojciechowska, S**. Digital Twin Approach for Operation and Maintenance of Transportation System – Systematic Review / S. Werbińska-Wojciechowska, R. Giel, K. Winiarska // Sensors. – 2024. – 24 (18), 6069. – http: //doi.org/10.3390/s24186069.

2 Digitalization of railway transportation through AI-powered services: digital twin trains / S. Sarp, M. Kuzlu, V. Jovanovic [et al.] // European Transport Research Review. – 2024. – 16.10.1186/s12544-024-00679-5.

3 Всемирный геоматический журнал. – URL: https://www.gim-international.com/content/news/germany-builds-digital-twin-of-rail-network-in-nvidia-omniverse.

4 Прогноз от Нутаникс. – URL: https://www.nutanix.com/theforecastbynutanix/industry/how-digital-twin-technology-is-helping-build-a-smart-railway-system-in-italy (дата обращения: 19.10.2025).

5 **Armijo, A.** Integration of Railway Bridge Structural Health Monitoring into the Internet of Things with a Digital Twin: A Case Study // A. Armijo, D. Zamora-Sánchez // Sensors. – 2024. – 24 (7), 2115. – http://doi.org/10.20944/ preprints202401.1805.v1.

УДК 656.21/.22

## ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОТКЛОНЕНИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ СОРТИРОВОЧНОЙ СТАНЦИИ

*А. А. ЕРОФЕЕВ, А. А. НАУМЕНКО*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Технология управления сортировочной станцией базируется на многоуровневом планировании: от годовых и квартальных планов до оперативного планирования на сутки и часы смены [1]. Эффективность работы железнодорожной станции напрямую зависит от качества ее планирования. Основная задача сменно-суточного планирования – своевременная доставка груза на станции назначения с учетом минимальных затрат [2].

Суточный план-график является основным инструментом, который координирует взаимодействие всех подсистем станции, выявляет узкие места, проверяет достаточность пропускной и перерабатывающей способности станции [3].

Выполнение сменных заданий контролируется начальником смены, осуществляющим текущее планирование на основе поступающей информации о подходе поездов, вагонов, локомотивов и их наличии на начало планируемого периода. Функции планирования и оперативного управления маневровой работой на станции возложены на маневрового диспетчера [5].

На железнодорожной станции при производстве маневровой работы в процессе смены часто возникают отклонения от плана работы. Основные виды отклонений представлены на рисунке 1.

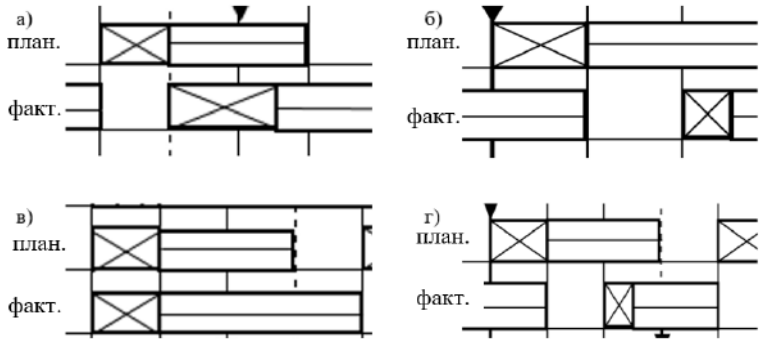



Рисунок 1 – Основные виды отклонений в работе сортировочной станции:
*а* – фактическое время надвига больше, чем планируемое; *б* – фактическое время надвига меньше, чем планируемое; *в* – фактическое время роспуска больше, чем планируемое; *г* – фактическое время роспуска меньше, чем планируемое

Причиной таких отклонений в работе сортировочной горки являются ситуации, приводящие к увеличению времени выполнения маневровых операций: превышающая норму масса состава, наличие вагонов, запрещенных к роспуску и другие.

Отклонения могут возникать во всех подсистемах железнодорожной станции. В зависимости от идентификации отклонений в производстве маневровой работы применяются различные корректировки: изменение путей приема и роспуска, использование дополнительных маневровых локомотивов, перераспределение персонала и другие. Эти действия направлены на минимизацию простоев и выполнение сменно-суточного плана работы станции.

В настоящее время маневровый диспетчер выявляет отклонения в работе сортировочной станции и оперативно вносит корректировки в планирование и управление маневровой работой. Однако ввиду большой загруженности и недостатка времени на принятие решения диспетчер часто принимает неверное решение, которое влияет на время выполнения маневровых операций. Контроль за определением времени начала и окончания технологических операций осуществляется дежурным оперативным персоналом. Для этого используется визуальное наблюдение, обмен информацией через внутреннюю связь и другое.

На сортировочных станциях внедрены автоматизированные системы, из которых возможно получение информации о моменте начала и окончания технологической операции. Например, информация о начале и окончании операции «прибытие состава» может быть получена из автоматизированного рабочего места дежурного по станции (сообщение об отправлении/проследовании составом станции, сообщение о прибытии состава на станцию).

Расчетная формула определения времени прибытия состава на станцию в данном случае будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} t_{\text{пр.с.ф.}} = t_{\text{ок.пр.с.ф.}} - t_{\text{нач.пр.с.ф.}}, \\ t_{\text{пр.с.пл.}} = t_{\text{ок.пр.с.пл.}} - t_{\text{нач.пр.с.пл.}}, \\ t_{\text{пр.с.ф.}} = t_{\text{пр.с.пл.}}, \\ t_{\text{пр.с.ф.}} < t_{\text{пр.с.пл.}}, \\ t_{\text{пр.с.ф.}} > t_{\text{пр.с.пл.}}, \end{cases}$$

где $t_{пр.с.ф.}$, $t_{пр.с.пл}$ – фактическое и плановое время выполнения технологической операции «прибытие состава»; $t_{ок.пр.с.ф.}$, $t_{нач.пр.с.ф.}$ – фактическое время окончания и начала операции «прибытие состава»; $t_{ок.пр.с.пл.}$, $t_{нач.пр.с.пл.}$ – плановое время окончания и начала операции «прибытие состава».

В условиях автоматизации маневровой работы возможно распознавание возникающих отклонений и принятие решений, а также внесение корректировок в оперативное планирование и управление работой на железнодорожной станции. Для этого необходимо внедрение интеллектуальных систем управления на основе методов искусственного интеллекта и машинного обучения. Такие системы способны автоматически распознавать отклонения в работе станции, прогнозировать риски срывов в маневровой работе и оптимизировать корректирующие решения. Разработка модулей с возможностью самообучения позволит уменьшить влияние человеческого фактора, связанного с высокой нагрузкой и ограничениями по времени, с повышением надежности и эффективности управления [6].

Интеграция различных автоматизированных систем и создание на основе этой информации единой интеллектуальной системы обеспечит комплексное управление процессами с учетом множества факторов и оперативной обстановки. Расширение и анализ данных для создания прогностических моделей позволит повысить точность и адаптивность управления.

Таким образом, интеллектуализация управления сортировочными станциями трансформирует традиционные методы планирования в процессы, способные адаптироваться и прогнозировать, что обеспечит существенное повышение пропускной способности и устойчивость железнодорожных перевозок. Это актуальное направление для модернизации транспортной инфраструктуры с большим научно-практическим потенциалом.

**Список литературы**

1 Эксплуатация железных дорог : учеб. пособие / под ред. профессоров В. В. Повороженко, В. М. Акулиничева. – М. : Транспорт, 1974. – 472 с.

2 Алгоритм сменно-суточного планирования формирования и пропуска поездов методом оптимального сетевого потока / А. Б. Шабунин, А. К. Такмазьян, А. В. Есаков, С. В. Зайцев // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2019) : тр. восьмой науч.-техн. конф., Москва, 21 нояб. 2019 г. – М. : Науч.-исслед. и проектно-конструкторский ин-т информатизации, автоматизации и связи на ж.-д. трансп., 2019. – С. 42–46. – EDN QIYKGE.

3 **Кузнецов, В. Г.** Технология работы сортировочной станции : пособие по курсовому проектированию / В. Г. Кузнецов, А. А. Ерофеев, Е. А. Фёдоров ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2022. – 126 с.

4 Управление эксплуатационной работой на железнодорожном транспорте : учеб. для студентов вузов ж.-д. трансп. В 2 т. Т. 1 / под ред. В. И. Ковалева и А. Т. Осьминина. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. трансп., 2009. – 263 с.

5 **Белых, А. А.** Оценка влияния искусственного интеллекта на оперативное управление участковой железнодорожной станции / А. А. Белых, В. В. Широкова // Национальная Ассоциация Ученых. – 2020. – № 56-1(56). – С. 36–41. – DOI: 10.31618/nas.2413-5291.2020.1.56.229.

6 **Ерофеев, А. А.** Интеллектуальная система управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте : монография / А. А. Ерофеев ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2022. – 407 с. – ISBN 978-985-554-972-8.

УДК 159.9

## СТРУКТУРА СОЦИАЛЬНО-ПСИХОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РУКОВОДИТЕЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЕЙ РУКОВОДСТВА БЕЛОРУССКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КАДРОВОГО РЕЗЕРВА

*А. Г. ЗЕНКЕВИЧ*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Руководителю ГО «Белорусская железная дорога» требуются знания психологических особенностей работников для работы по формированию кадрового резерва. Сегодня качество комплексного изучения действующих и потенциальных руководителей зависит от многих факторов, в частно-

сти – доступности для психологического анализа максимально полной совокупности данных, характеризующих личность работника; наличия методического обеспечения психологической работы; профессионализма психолога [1].

Обоснование концепции психологического обеспечения и попытка развернутого ее изложения содержатся в трудах отечественных и зарубежных ученых (Г. С. Никифоров, М. А. Дмитриева, Л. Н. Корнеева).

В современных условиях работа с кадровым резервом руководителей приобретает всё большую актуальность. Важное место ей отводится в Концепции государственной кадровой политики Республики Беларусь. Учеными разрабатываются научные подходы к анализу потребностей в кадрах руководителей, определяются критерии оценки работников на соответствие занимаемой ими должности, методы формирования эффективных технологий расстановки, продвижения кадров и др.

С позиций общегосударственных интересов руководитель Белорусской железной дороги ориентирован на создание эффективных механизмов государственного регулирования трудовой деятельности, включая систему мер организационного, нормативного, экономического и иного характера, обеспечивающих защиту жизненно важных интересов личности, имущества, общества и государства.

Формирование кадрового резерва – это действия, направленные на развитие профессиональных навыков тех сотрудников, которые наиболее отвечают требованиям должности определенного ранга, обладают способностями управленческой деятельности и прошли систематическую целевую квалификационную подготовку.

Современные организации создают специальные системы подбора, развития и продвижения сотрудников, рассматривают управление этой системой как стратегически важную задачу.

В целях повышения эффективности профессионального труда, а также для разработки информационных, диагностических, коррекционных и формирующих практических рекомендаций для руководителей необходимо использовать профессиографию.

Профессиографический анализ по каждой должности руководителя Белорусской железной дороги должен проводиться с привлечением специалистов – от трех до пяти экспертов-сотрудников, имеющих длительный практический опыт работы по данной специальности.

Оценка деловых и личных качеств работника, составление характеристик на кандидатов в кадровый резерв и выбор направлений их подготовки должны выполняться с применением установленных методов и в определенном порядке.

При формировании кадрового резерва руководителей с различным уровнем руководства должна быть разработана и принята модель формирования кадрового резерва, которая содержит [2]:

– цели формирования кадрового резерва;
– принципы формирования кадрового резерва;
– критерии зачисления в кадровый резерв;
– оценку готовности кадрового резерва;
– принципы и механизм формирования и дальнейшего использования кадрового резерва;
– обязанности руководителей по работе с кадровым резервом и работников кадровой службы.

При формировании кадрового резерва УВО учитываются:

– требования к должности;
– профессиональная характеристика работника;
– предельные ограничения критериев подбора кандидатов;
– результаты оценки;
– выводы и рекомендации последней аттестации;
– мнение руководителей;
– результаты оценки потенциала кандидата.

Необходимо правильно подготовить работников, способных и готовых к продвижению по карьерной лестнице. Подготовка работников может осуществляться в виде:

– обучения по планируемой должности кадрового резерва руководителей;
– индивидуальной подготовки под руководством вышестоящего руководителя;
– стажировки в своем или другом предприятии в той должности, на которую работник зачислен в кадровый резерв.

В работе с кадровым резервом руководители допускают следующие ошибки:

– кадровый резерв формируется формально;

– выдвижение работников в кадровый резерв вышестоящим руководителем осуществляется без их ведома, т. е. они не проинформированы о нахождении в кадровом резерве;

– работники находятся в кадровом резерве длительное время без конкретной перспективы продвижения по карьерной лестнице, так как кадровый резерв существует только на бумаге; отсутствует мотивация у работников кадрового резерва.

Положение о кадровом резерве отражает модель кадрового резерва и выполняет стимулирующую роль. Его содержание должно быть известно всем работникам.

Структура социально-психологических характеристик управленческих кадров высшего уровня руководства включает факторы «Способность к эффективной управленческой деятельности», «Избегание взаимодействия, уход от сотрудничества», «Избегание конфронтации», «Организация текущей работы, решение текущих вопросов, сосредоточенность на текущей работе», «Авторитарность/непоколебимость», «Способность к планированию деятельности». Для управленцев среднего уровня руководства характерны «Способность к эффективной управленческой деятельности», «Активная коммуникация», «Сотрудничество», «Соперничество», «Исполнительность, направленность на решение текущих вопросов».

Факторная модель управленцев низового уровня руководства включает «Способность к активной и эффективной управленческой деятельности», «Доминирование/авторитарность», «Стремление к конструктивному взаимодействию», «Коммуникативные способности», «Стремление и способность к достижению цели» [3].

**Список литературы**

1 **Нижегородцева, Н. В.** Системогенетический анализ готовности к обучению / Н. В. Нижегородцева. – Ярославль : Аверс-пресс, 2004. – 338 с.

2 **Ботвинник, С. Л.** Разработка практических рекомендаций по формированию системы кадрового резерва / С. Л. Ботвинник // Экономика и право. – 2012. – № 4. – С. 10–12.

3 **Зенкевич, А. Г.** Психологическое обеспечение работы с кадровым резервом руководителей учреждения высшего образования : монография / А. Г. Зенкевич, Т. В. Казак. – Гомель : БелГУТ, 2024. – 167 с.

УДК 656.212.5:656.2.08

## ОЦЕНКА ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПОТЕНЦИАЛА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

*В. Г. КОЗЛОВ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Современный железнодорожный транспорт представляет собой сложную иерархическую систему, в которой каждый элемент инфраструктуры играет ключевую роль в обеспечении стабильности перевозочного процесса. В условиях динамичных изменений объемов и структуры перевозок, а также повышения требований к качеству транспортного обслуживания особую актуальность приобретает задача достоверной оценки перевозочного потенциала железнодорожной сети. Традиционные методы, основанные на аналитических расчетах пропускной и перерабатывающей способности участков и станций, не всегда адекватно отражают реальные эксплуатационные условия. Их основными недостатками являются статичность и наличие допущений, игнорирующих пространственно-временную динамику формирования и распределения транспортных потоков.

В качестве альтернативы предложено использовать метод моделирования транспортных потоков, основанный на интеграции динамических, сетевых и имитационных подходов. Методика включает формирование топологии железнодорожной сети, идентификацию корреспонденций вагонопотоков, расчет параметров транспортных потоков на объектах железнодорожной инфраструктуры и имитационное моделирование эксплуатационной работы железнодорожной станции с применением сетей Петри.

Ключевым направлением исследования является построение сетевой динамической модели транспортного потока, учитывающей как количественные, так и качественные характеристики его формиро-

вания и распределения. Такая модель позволяет рассматривать транспортный поток не только как совокупность корреспонденций, но и как систему маршрутов их следования, представленных в виде векторных характеристик. Это обеспечивает формирование исходных данных о планируемом потоке, его пространственно-временном распределении по сети, выявление железнодорожных участков с неравномерной нагрузкой, прогнозирование изменений структуры вагонопотоков и корректировку плана формирования поездов с учетом текущих эксплуатационных условий [1].

Для повышения достоверности оценки перевозочного потенциала используется методика имитационного моделирования, позволяющая учитывать динамику транспортных потоков и параллельность выполнения перевозочных процессов. В ее основе лежит применение сетей Петри – математического инструмента анализа динамических систем с параллельными процессами. Это особенно актуально для железнодорожных станций, где одновременно выполняются многочисленные операции по пропуску и переработке транспортного потока. Сети Петри обеспечивают формализованное описание работы элементов станции (горловин, парков, сортировочных устройств, стрелочных переводов и др.), что позволяет выявлять потенциальные эксплуатационные затруднения и неэффективное использование маневровых ресурсов. Имитационная модель, построенная на их основе, дает возможность оценивать пропускную и перерабатывающую способность объектов, анализировать устойчивость функционирования станции при различных сценариях распределения транспортных потоков, определять «узкие места» и прогнозировать последствия управленческих решений [2, 3].

В отличие от традиционных аналитических методов, опирающихся на нормативные и усредненные значения параметров, предложенный подход позволяет более достоверно оценивать перевозочный потенциал железнодорожной инфраструктуры за счет учета реальных условий эксплуатации, временных задержек, последовательности операций и взаимодействия параллельных процессов. Это создает основу для оптимизации эксплуатационной работы станций, повышения эффективности планирования и более рационального использования ресурсов в условиях изменяющейся структуры перевозок.

Одним из результатов исследования стала разработка методики рационального распределения транспортного потока (вагонопотока) между техническими станциями железнодорожной сети. Проведено исследование методов расчета и оперативной корректировки плана формирования поездов. Предложенная методика основана на относительной оценке целесообразности выделения вагонопотоков в сквозные назначения поездов и учитывает как количественные, так и эксплуатационные характеристики транспортного потока. Это позволяет повысить точность определения рациональной системы организации вагонопотоков и распределения эксплуатационной работы. Реализация методики обеспечивает сокращение затрат на организацию и пропуск вагонопотоков по сети примерно на 13 % и расширяет возможности аналитических методов для полигонов различной конфигурации [4, 5].

Особое значение имеет возможность интеграции разработанной методики в информационные системы управления перевозками. Автоматизированная система «Динамическая карта вагонопотоков», основанная на предложенных методах моделирования транспортных потоков и сетевых подходах, реализует принцип динамического расчета параметров транспортных потоков в реальном времени. В качестве исходных данных используются заявки на перевозку, фактически выполненные перевозки и план формирования поездов. Система позволяет рассчитывать показатели пропускной и перерабатывающей способности объектов инфраструктуры, моделировать пропуск потоков по различным критериям (минимальное время, кратчайшее расстояние, оптимальная загрузка станций) и формировать рекомендации для оперативного управления перевозками.

Результаты внедрения модели на примере Белорусской железной дороги показали, что использование динамических методов позволяет снизить затраты на организацию вагонопотоков на 10–15 % и повысить точность оценки наличной пропускной способности железнодорожной станции. Кроме того, при значительных колебаниях объемов перевозок система обеспечивает своевременную корректировку плана формирования поездов, что способствует более рациональному распределению транспортного потока по железнодорожной сети.

Таким образом, предложенный подход открывает новые возможности для управления железнодорожной инфраструктурой. Использование сетей Петри и динамических моделей транспортных потоков способствует повышению эффективности планирования, устойчивости функционирования системы и снижению затрат на перевозочный процесс. Внедрение подобных решений является шагом к созданию интеллектуальных систем управления перевозками, способных адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации и требованиям рынка транспортных услуг.

**Список литературы**

1 **Козлов, В. Г.** Моделирование пропуска и расчет параметров корреспонденций вагонопотоков на объектах инфраструктуры транспортной железнодорожной сети / В. Г. Козлов // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2020. – № 2. – С. 76–79.

2 **Козлов, В. Г.** Моделирование транспортных потоков и эксплуатационной работы железнодорожных станций и узлов на основе сетей Петри / В. Г. Козлов // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2022. – № 2. – С. 114–116.

3 **Козлов, В. Г.** Прогнозирование эксплуатационных затруднений в работе железнодорожной станции на основе моделирования с использованием сетей Петри / В. Г. Козлов // Известия Транссиба. – 2025. – № 1 (61). – С. 59–68.

4 **Козлов, В. Г.** Оценка использования аналитических методов при расчете плана формирования одногруппных грузовых поездов / В. Г. Козлов, В. Г. Кузнецов // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2013. – № 1. – С. 49–51.

5 **Козлов, В. Г.** Использование общего условия оценки выделения назначений при расчетах плана формирования методом совмещенных аналитических сопоставлений / В. Г. Козлов // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2014. – № 1. – С. 58–60.

УДК 656.2

# РАЗВИТИЕ МЕЖДУНАРОДНОГО СОТРУДНИЧЕСТВА РОССИЙСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

*А. Д. КОНДАКОВА, Л. С. КУЩЕНКОВА*
*Нижегородский институт путей сообщения –*
*филиал Приволжского университета путей сообщения, Российская Федерация*

Развитие международного сотрудничества Российской железной дороги (РЖД) играет важную роль в укреплении транспортных связей между Россией и странами Евразии, Европы и Азии. В рамках этого процесса реализуются совместные проекты, участвуют в международных транспортных коридорах и внедряются современные технологии. Стратегические инициативы способствуют повышению эффективности перевозок, расширению географии маршрутов и укреплению экономических связей. В условиях глобализации и новых вызовов развитие международного сотрудничества РЖД становится ключевым фактором обеспечения устойчивого развития транспортной системы страны и интеграции в международные транспортные системы.

В начале 2000-х годов РЖД активно развивала международные маршруты, включая пассажирские и грузовые перевозки с соседними странами: Казахстаном, Беларусью, Монголией, Китаем, Финляндией и другими странами.

Запуск высокоскоростных и международных пассажирских маршрутов: в 2010-х годах началось развитие высокоскоростных маршрутов и международных поездов, например, «РЖД Ласточка» и маршруты с Финляндией, Китаем, Монголией.

Развитие Единой транспортной системы: в сотрудничестве с международными партнерами внедрялись современные информационные системы, обеспечивающие координацию грузоперевозок и управление движением на границах.

Создание международных логистических центров: в Москве, Санкт-Петербурге и за рубежом были открыты логистические терминалы и склады, что повысило конкурентоспособность российской транспортной системы.

Участие в международных инфраструктурных проектах: в 2014 году Россия стала участником проекта «Восточный коридор» (Трансазиатский транзит), а также развивала маршруты через Евразийский экономический союз.

Развитие цифровых технологий: внедрение систем цифровизации, автоматизации контроля границ, электронных билетов и платформ для международных перевозок.

Расширение сотрудничества с Китаем и Европой: Активизация участия в проектах по развитию Нового Шелкового пути, создание совместных предприятий для грузовых перевозок, модернизация инфраструктуры вдоль Транссибирской магистрали.

Инвестиции в международную логистику: в 2021 году РЖД объявила о планах инвестировать в развитие контейнерных центров и мультимодальных перевозок, чтобы повысить объем международных грузоперевозок.

Экологические инициативы и устойчивое развитие: в рамках глобальных трендов РЖД участвует в международных экологических проектах, снижая углеродный след и внедряя экологичные технологии.

За последние два десятилетия РЖД существенно расширила свои международные связи, укрепила позиции в транзитных перевозках и внедряет современные технологии для повышения эффективности. Эти усилия позволяют России играть ключевую роль в евразийском транспортном коридоре, способствуют развитию международного сотрудничества и интеграции транспортных систем стран региона.

*Стратегические планы развития международного сотрудничества РЖД*

1 Расширение транспортных коридоров и маршрутов.

РЖД планирует активизировать участие в реализации международных транспортных коридоров, таких как Евразийский транспортный коридор (ЕврАзЭС), «Восточный коридор», а также развитие новых маршрутов, соединяющих Европу, Азию и Ближний Восток. Эти инициативы направлены на увеличение грузопотока, сокращение времени доставки и снижение транспортных издержек, что повысит конкурентоспособность российских транспортных услуг.

2 Инвестиционные проекты и инфраструктурное развитие.

В рамках стратегического плана предусмотрено привлечение инвестиций для модернизации существующей инфраструктуры и строительства новых объектов. В числе приоритетных – развитие высокоскоростных железных дорог, логистических центров, таможенных терминалов и цифровых платформ для управления грузопотоками. Особое внимание уделяется сотрудничеству с Китаем, Европейским союзом и странами Азиатско-Тихоокеанского региона.

3 Внедрение инновационных технологий и цифровизация.

РЖД намерена активно внедрять современные технологии, такие как автоматизация управления движением, системы мониторинга и диагностики подвижного состава, а также развивать цифровые платформы для оптимизации логистики и повышения безопасности перевозок. Международное сотрудничество в области технологий позволит обмениваться опытом и внедрять лучшие практики.

Российские железные дороги (РЖД) являются одним из ключевых элементов транспортной системы страны и важным игроком на международной арене. В условиях глобализации, роста международных торговых потоков и необходимости интеграции в глобальные транспортные цепочки, развитие международного сотрудничества становится стратегической задачей для компании.

Развитие международного сотрудничества Российской железной дороги является важнейшим фактором укрепления позиций России на глобальной транспортной арене. За более чем вековую историю РЖД прошла путь от первоначальных межгосударственных соглашений до интеграции в современные международные транспортные системы, реализуя масштабные проекты и создавая стратегические партнерства. Постсоветский период стал временем активной адаптации к новым реалиям, модернизации инфраструктуры и расширения транзитных возможностей, что позволило России стать ключевым участником международных железнодорожных маршрутов между Европой и Азией. В настоящее время развитие международного сотрудничества продолжает играть стратегическую роль в обеспечении экономического роста, укреплении дипломатических связей и создании условий для устойчивого и инновационного развития российской железнодорожной отрасли. Таким образом, международное сотрудничество РЖД – это не только средство повышения эффективности перевозок, но и важный инструмент реализации национальных интересов России на мировой арене.

**Список литературы**

1 **Тимофеев, А.** Развитие транспортной инфраструктуры России: игра на опережение / А. Тимофеев // The Boston Consulting Group. – 2012. – URL: http://www.pppi.ru/sites/all/themes/pppi/img/ppp_ transport_sphere.pdf (дата обращения : 09.09.2025).

2 **Рустамзаде, М. Н.** Контракт жизненного цикла как инструмент государственно-частного партнерства на железнодорожной инфраструктуре / М. Н. Рустамзаде, С. Е. Конджария // Nauka-rastudent.ru. – 2017. – № 01 (037). – URL: http://nauka-rastudent.ru/37/3971/ (дата обращения : 09.09.2025).

3 **Бондаренко Е. М**. «Контейнерный кризис»: причины и пути решения проблемы / Е. М. Бондаренко, В. А. Гладунов // Глобальные проблемы научной цивилизации, пути совершенствования : материалы XV Междунар. науч.-практ. конф. (Ставрополь, 28 февр. 2022 г.). В 2 ч. – Ставрополь : Ставропольское издательство «Параграф», 2022. – С. 448–451.

4 **Форсель, Д. А.** Анализ кризисных ситуаций в сфере контейнерных перевозок грузов / Д. А. Форсель, Е. Ю. Васильева // Форум молодых ученых. – 2024. – № 6 (94). – С. 349–352.

УДК 656.2:629.3.083

# РАСЧЕТ ВРЕМЕН ОПТИМАЛЬНЫХ ЗАМЕН ИЛИ РЕМОНТОВ ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ

*О. И. КОС, В. Ю. СМИРНОВ*
*Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация*

Для обеспечения эксплуатационной надежности и эффективности функционирования сложных технических систем (СТС) при планировании частоты обслуживания можно выделить два принципиально разных подхода:

− с постоянным периодом между обслуживаниями, рассчитанным по некоторым усредненным для систем показателям, т. е. обслуживание по нормативу;

− с переменным периодом, определяемым на основе оценки фактического состояния систем, т. е. обслуживание по фактическому состоянию.

В настоящее время периодичность замен или ремонтов элементов СТС, например таких как искусственные сооружения на железных дорогах, определяется на основании среднестатистических данных. Нормативные сроки, определенные на основании этих данных, представлены в соответствующих документах.

Поставим задачу управления техническим состоянием СТС по фактическому состоянию. Рассмотрим в качестве объекта управления СТС, например, железнодорожный мост, состоящий из большого количества элементов, таких как пролетные строения, опорные части, подферменные блоки, устои, ригели, опоры.

Субъектом управления будет эксплуатирующая организация, например, дистанция пути.

Исходными данными для управления являются результаты обследования технического состояния, а также пропущенная нагрузка.

Механизмом управления будем считать проводимые в определенные моменты времени замены и ремонты элементов конструкции СТС, причем эти определенные моменты времени должны рассчитываться не на основе нормативных сроков, а на основе математических методов, учитывающих фактическое техническое состояние СТС и всю предыдущую историю эксплуатации СТС.

Целевой функцией управления техническим состоянием будет величина затрат на эксплуатацию СТС, т. е. функция приспособленности. Критерием эффективности управления будем считать минимум целевой функции при выполнении заданных ограничений, то есть минимизацию затрат на эксплуатацию при условии обеспечения заданной надежности. Это фактически означает эксплуатацию СТС в соответствии с критерием «надежность – затраты», что обеспечивает экономический эффект и безопасность эксплуатации одновременно.

Рассмотрим метод управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами, который позволяет осуществлять замены или ремонты элементов через оптимальные интервалы времени [1, 2].

Задача расчета оптимального интервала замены (ремонта) элемента СТС ставится математически следующим образом.

Пусть $t$ – время эксплуатации СТС; $T_1$ – средняя длительность плановой предупредительной замены или ремонта элемента; $T_2$ – средняя длительность внеплановой аварийной замены или ремонта элемента; $x$ – интервал безотказности элемента; $F(t)$ – функция распределения интервалов времени между внеплановыми заменами или ремонтами, возникающими при обнаружении отказа, т. е. функция отказов элемента; $G(t)$ – функция распределения интервалов времени между плановыми заменами или ремонтами; $H(t)$ – математическое ожидание числа отказов за время от 0 до $t$; $p\,(x, t)$ – коэффициент оперативной готовности [3, 4].

Пусть заданы времена $T_1$, $T_2$, $x$, функции $F(t)$ и $H(t)$.

Найти: оптимальный интервал замены или ремонта элемента:

$$\tau_0 = \underset{G(t)}{\arg\max}\; p(x,t). \tag{1}$$

В качестве показателя надежности СТС возьмем коэффициент оперативной готовности $p(x, t)$, т. е. вероятность того, что в момент $t$ элемент будет в работоспособном состоянии и после момента $t$ проработает время $x$. Ограничениями при решении задачи будут требования следующие: $T_2 > T_1$; $\lambda'(t) > 0$, где $\lambda(t) = f(t) / (1 - F(t))$, $f(t) = F'(t)$; $x << T_0$, где $T_0$ – среднее время безотказной работы элемента. Критерий оптимальности решения задачи: максимизация выбранного показателя надежности $p(x, t)$.

В рассматриваемой задаче под оптимальным решением будем понимать оптимальный интервал замены (ремонта) $\tau_0$ для данного элемента СТС. Максимизация выбранного показателя надежности обеспечивается за счет выбора $G(t)$. Коэффициент оперативной готовности $p(x, t)$ при $t \to \infty$ можно представить в виде [4]

$$p(x) = \frac{\int_0^\infty [1 - G(t)][1 - F(t + x)]\,dt}{\int_0^\infty [1 - G(t)][1 - F(t)]\,dt + T_1 \int_0^\infty G(t)dF(t) + T_2 \int_0^\infty F(t)dG(t)}. \quad (2)$$

Максимум дробно-линейного функционала (2) ищется на вырожденном распределении вида

$$G(t) = \begin{cases} 0 \text{ при } t \le \tau, \\ 1 \text{ при } t > \tau. \end{cases} \quad (3)$$

С учетом (3) выражение (2) приводится к виду (4):

$$p(x, \tau) = \frac{\int_0^\tau [1 - F(t + x)dt]}{\int_0^\tau [1 - F(t)]\,dt + T_1 + (T_2 - T_1)F(\tau)}. \quad (4)$$

Дифференцируя (4) по $\tau$ и приравнивая полученный результат к нулю, получаем уравнение (5), из которого определяется точка экстремума функции $p(x, \tau)$:

$$\frac{T_1}{T_2 - T_1 + x} = \lambda(\tau)\int_0^\tau [1 - F(t)]\,dt - F(\tau). \quad (5)$$

С учетом заданных ограничений единственным решением этого уравнения является $\tau_0$ – величина оптимального интервала замены (ремонта) элемента СТС.

Решение уравнения (5) находится с помощью численного метода Симпсона для каждого элемента СТС. В результате получаются оптимальные интервалы замен (ремонтов) для всех элементов СТС.

**2 Расчеты для эксплуатируемых объектов.**

Проведены расчеты оптимальных интервалов замен или ремонтов элементов для ряда эксплуатируемых в настоящее время СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами. В частности, для разнородных типов элементов металлического пролетного строения моста, пропускающего реку Нерусса, расположенного на 478 км II пути участка Брянск – Суземка Брянской дистанции пути, рассчитаны оптимальные интервалы замен или ремонтов этих элементов.

**Список литературы**


1 **Кос, О. И.** Оптимальный интервал предупредительных замен для искусственных сооружений железных дорог / О. И. Кос, В. Ю. Смирнов // Мир транспорта. – 2013. – Т. 1, № 1. – С. 152–155.

2 **Кос, О. И.** Схема управления техническим состоянием искусственных сооружений / О. И. Кос // Мир транспорта. – 2016. – Т. 4, № 5. – С. 199–201.

3 **Smirnov, V. U.** Program module for calculating the optimal interval of preventive substitutions / V. U. Smirnov, O. I. Kos // Quality management, Transport and information. Security Information Technologies (IT&QM&IS). – Saint Petersburg, Russia, 24–30 September, 2017. – DOI: 10.1109/ITMQIS.2017.8085811.

4 **Kos, O. I.** Mathematical Model of Control of the Technical Condition of Elements of Complex Technical Systems on the Basis of the Distribution Law of the Function of Element Failures / O. I. Kos, V. U. Smirnov // Journal of Computer and Systems Sciences International. System Theory and General Control Theory. Springer Nature. Pleiades Publishing. – 2022. – Vol. 61. – P. 885–892.

УДК 656.2

# АКТУАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ВЕЛИЧИНЫ РИСКОВ НАРУШЕНИЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ РОССИИ

*А. А. КУДРИНА, О. И. КОРОВКИНА, К. А. ЧЕРНЫШЕВ*
*Российский университет транспорта (МИИТ), Российская Федерация*

Обеспечение безопасности движения поездов является приоритетной задачей железнодорожного транспорта, так как любые нарушения в этой сфере могут привести к тяжелым последствиям, включая человеческие жертвы и значительный материальный ущерб. В современных условиях, характеризующихся увеличением объемов перевозок и усложнением технологических процессов, актуальность управления рисками в области функциональной безопасности движения поездов значительно возросла.

Согласно ГОСТ 33433-2015 [1] риск определяется как сочетание вероятности возникновения события и его негативных последствий. В контексте железнодорожного транспорта это означает необходимость комплексного подхода к оценке как вероятности нарушений безопасности движения, так и потенциального ущерба от таких нарушений.

В современной практике управления рисками на железнодорожном транспорте России применяется комплексный подход, основанный на ГОСТ 33433-2015 «Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте». Согласно этому стандарту [1] в реестр рисков включаются следующие виды нарушений безопасности движения:

1) столкновения и сходы железнодорожного подвижного состава при маневрах, экипировке и других передвижениях;

2) прием или отправление поезда по неготовому маршруту;

3) перевод стрелки под железнодорожным подвижным составом;

4) прием поезда на занятый железнодорожный путь;

5) несанкционированное движение подвижного состава на маршрут приема, отправления поезда или на перегон;

6) взрез стрелки;

7) неисправности пути, железнодорожного подвижного состава, устройств СЦБ, связи, контактной сети и других технических средств, приводящие к задержке поезда на 1 час и более.

Анализ статистических данных за 2013–2019 гг. показывает, что наиболее распространенными видами нарушений являются сходы железнодорожного подвижного состава при маневрах и при роспуске с сортировочной горки, а также прием или отправление поезда по неготовому маршруту. При этом наблюдается тенденция к снижению количества некоторых видов происшествий, что свидетельствует об эффективности принимаемых мер по повышению безопасности.

Проведенный анализ выявил комплекс факторов, влияющих на возникновение нарушений безопасности движения. Для каждой станции могут быть определены специфические факторы риска, которые формируют ее «профиль риска».

Традиционная методика оценки рисков [1], применяемая на железнодорожном транспорте России, основана на статистическом анализе исторических данных и включает следующие этапы:

1) сбор данных о транспортных происшествиях и событиях за определенный период;

2) классификация происшествий по видам;

3) расчет частоты возникновения каждого вида происшествий;

4) оценка последствий каждого вида происшествий;

5) построение матрицы рисков.

Однако традиционная методика имеет ряд ограничений, особенно при работе с малыми выборками данных или при прогнозировании рисков для конкретных станций. В связи с этим разработана новая методика, основанная на применении искусственных нейронных сетей (ИНС).

Методика с использованием ИНС включает следующие этапы:

1) формирование обучающей выборки на основе исторических данных о нарушениях безопасности движения;

2) определение входных переменных, соответствующих выявленным факторам риска;

3) обучение нейронной сети на исторических данных;

4) применение обученной сети для прогнозирования рисков на конкретных станциях.

Математическая модель представляет собой двухслойную нейронную сеть, где входные переменные соответствуют факторам риска, а выходные переменные – прогнозируемым видам нарушений безопасности движения.

Преимущества новой методики:

1) возможность работы с неполными данными;

2) учет взаимосвязей между различными факторами риска;

3) повышенная точность прогнозирования для конкретных станций;

4) возможность раннего выявления потенциальных рисков.

Проведенный анализ современных методик расчета рисков нарушений безопасности движения на железных дорогах России позволяет сделать следующие выводы.

1 Существующая методика оценки рисков, основанная на ГОСТ 33433-2015, требует дополнения современными методами анализа данных, особенно в условиях цифровой трансформации железнодорожного транспорта.

2 Применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования рисков безопасности движения позволяет повысить точность прогнозов на 20–25 % по сравнению с традиционными методами, что особенно важно для станций с малой статистикой происшествий.

3 Выявленные факторы риска могут быть систематизированы на кадровые, технологические и инфраструктурные группы, что позволяет разрабатывать целевые меры по снижению рисков для конкретных станций.

**Список литературы**

1 ГОСТ 33433-2015. Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200127759 (дата обращения 10.09.2025).

2 Об утверждении стандарта ОАО «РЖД» «Классификация инцидентов, вызывающих нарушения графика движения поездов» : распоряжение ОАО «РЖД» от 19 мая 2014 г. N 1223р. – URL: https://base.garant.ru/70697466 (дата обращения 10.09.2025.

3 **Иванов, Д. А.** Риск-менеджмент на железнодорожном транспорте / Д. А. Иванов, И. В. Охотников, И. В. Сибирко. – М. : Макс-пресс, 2022. – 120 с.

4 **Кудрина, А. А.** Риски в области функциональной безопасности движения поездов / А. А. Кудрина, О. И. Коровкина, К. А. Чернышев // ПОЛИТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ : материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 24–25 окт. 2024.

5 **Максимова, Е. С.** Вопросы экономической оценки рисков производственной деятельности / Е. С. Максимова // Экономика железных дорог. – 2022. – № 2. – С. 35–43.

УДК 656.212.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАСФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВОВ НА УЧАСТКОВОЙ СТАНЦИИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СОРТИРОВОЧНОЙ РАБОТЫ

*В. Г. КУЗНЕЦОВ, И. М. ЛИТВИНОВА*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Основными объектами железнодорожной транспортной системы, участвующими в организации вагонопотоков и распределении сортировочной работы, являются технические станции, которые можно представить как сложные транспортные технологические подсистемы, имеющие ресурсы для преобразования поездо- и вагонопотоков в соответствии с планом формирования грузовых поездов.

Технологическая роль участковых станций в системе распределения сортировочной работы на железнодорожной сети зависит от структуры транзитного вагонопотока и функциональной значимости при формировании местных поездов в районе местной работы. В этом случае участковая станция выступает как опорная и имеет региональное значение в системе организации вагонопотоков. Особенностью участковой станции регионального значения является формирование всех кате-

горий местных поездов в железнодорожных узлах и на прилегающих участках. Для обеспечения своевременной реализации процесса расформирования-формирования местных поездов, участковая станция регионального значения должна обладать достаточными технико-эксплуатационными ресурсами, мощность которых характеризует пропускную и перерабатывающую способность станции.

В зависимости от варианта плана формирования грузовых поездов изменяется уровень использования перерабатывающей способности участковой станции, и соответственно простои в парках станции, а также дополнительные простои в ожидании выполнения процессов. Например, реализация процесса «расформирование составов на сортировочной горке» характеризуется интервалами в обслуживании, от которых зависят момент перехода к следующему процессу, своевременность выполнения реализации технологической линии «Пропуск и переработка вагонопотока на станции» в целом, а также ключевые показатели работы станции – простой вагонов на станции [1].

Процесс расформирования установлен в технологическом процессе работы участковой станции через нормы времени, необходимые на выполнение горочных операций для расчетных характеристик вагонопотока, поступающего на станцию в переработку.

Нормативы времени в технологическом процессе установлены расчетным путем с использованием статистических методов на основании обработки данных требуемого множества составов различных категорий грузовых поездов. К параметрам, установленным в технологическом процессе, относятся:

– средний состав грузового поезда $(\overline{m})$, ваг.;

– удельный вес количества поездов, в составе которых имеются вагоны, запрещенные к спуску с сортировочной горки $(\beta_{зсг})$;

– среднее количество групп $(\overline{x})$ в составе;

– среднее количество групп с вагонами ЗСГ $(\overline{x_{зсг}})$ в составе;

– среднее количество отцепов с вагонами ЗСГ $(\overline{g_{зсг}})$ в составе;

– среднее количество вагонов ЗСГ $(\overline{m_{зсг}})$ в составе.

Существующая методика расчета продолжительности выполнения операций по расформированию состава позволяет учесть данные параметры составов грузовых поездов, поступающих в расформирование. В то же время структура вагонопотока, поступающего в переработку, неоднородна, что существенно влияет на выполнение операций, связанных с управлением процессом, и вызывает неопределенность в затратах времени. Наличие механизма формализации структурных характеристик вагонопотока позволит более достоверно моделировать время реализации процесса, а также моменты перехода из одного процесса в другой.

Для анализа времени нахождения вагонов при выполнении операций расформирования определены элементарные операции, между которыми установлены взаимосвязи, существующие в реальном процессе расформирования на станции. На основе пооперационного сравнительного анализа нормативов технологического процесса работы участковой станции установлено, что для реализации процесса «расформирование составов на сортировочной горке» выделены нормативы времени на операции: закрепление состава, снятие закрепления, заезд горочного локомотива под состав, вытягивание, надвиг, роспуск, осаживание состава.

Для параметрической оценки процесса расформирования составов на сортировочной горке участковой станции проведен анализ статистической выборки поступающего в переработку вагонопотока на станцию. По данным статистической выборки установлено, что в среднем за сутки на участковой станции расформировывается 13 составов, из них 3 состава – это участковые и сквозные поезда с предельной минимальной нормой состава, которая устанавливается в ГДП, а остальные 10 составов – это составы местных поездов (вывозных, передаточных) с произвольной величиной составов, которая определяется исходя из реального процесса поездообразования. По данным установлен вариационный размах числа вагонов в составах поездов, так для большинства передаточных и вывозных поездов состав поезда находится в диапазоне от 20 до 30 вагонов, для участковых и сквозных – 55–63 вагона. Установлен значительный диапазон затрат времени на расформирование состава – от 30 до 90 минут, а также высокая неопределенность продолжительности расформирования, например, расформирование состава 58 вагонов составляет 80 минут, а состава из 63 вагонов –

30 минут. Кроме того, в расчете на один вагон время расформирования составов составляет 1,6 минуты, что значительно выше времени, установленного в технологическом процессе работы участковой станции.

Результаты статистической выборки продолжительности расформирования состава на сортировочной горке участковой станции в зависимости от количества вагонов в составе представлены на рисунке 1.

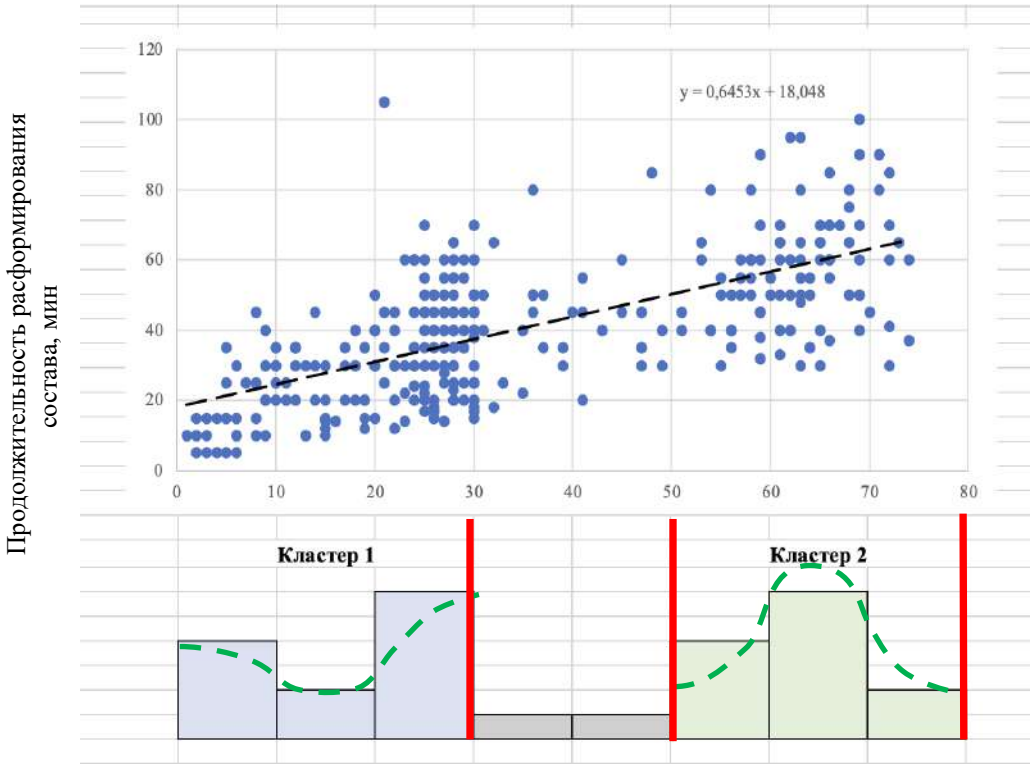



Рисунок 1 – Продолжительность расформирования состава в зависимости от количества вагонов в составе

На основании данных, представленных на рисунке 1, установлена общая тенденция зависимости затрат времени на расформирование одного состава от количества вагонов в составе. В то же время следует отметить значительный разброс значений времени при одинаковом количестве вагонов в составе. Так, при 30 вагонах в составе диапазон изменения времени расформирования составляет от 15 до 70 минут. Выделены два кластера грузовых поездов. К кластеру 1 относятся составы с количеством вагонов от 2 до 30 – составы от передаточных, сборных поездов и угловых передач. Продолжительность расформирования при количестве вагонов, близких к установленному в технологическом процессе кластера 2 (61 вагон), составляет от 32 до 95 минут. Такой разброс значений времени выполнения процесса свидетельствует о влиянии иных факторов, которые необходимо учитывать при анализе задержек выполнения процесса и соответственно выполнения ключевых качественных показателей работы станции (простои вагонов).

Установленная зависимость между продолжительностью расформирования составов и числом вагонов в составе поезда подтверждает необходимость установления зависимости времени расформирования не только от характеристик составов, но и от других структурных факторов вагонопотока, имеющих значительно бóльшее влияние на продолжительность реализации данного процесса и не отражаемых в существующей системе учета и анализа работы станции.

Таким образом, для достоверной оценки и определения перерабатывающей способности ресурсов участковой станции при решении задач распределения сортировочной работы на полигоне сети требуется установление дополнительных факторов, влияющих на ход реализации процессов в реальной модели работы участковой станции.

**Список литературы**

1 **Литвинова, И. М.** Расчетные нормативы плана формирования грузовых поездов и их влияние на уровень загрузки технических станций / И. М. Литвинова // Вестник транспорта Поволжья. – 2025. – № 2 (110). – С. 63–71. – EDN QAFHNG.

2 Методические рекомендации по организации вагонопотоков на Белорусской железной дороге : утв. приказом № 1294 НЗ от 30.12.2013. – Минск : Бел. ж. д., 2013. – 320 с.

3 Оценка распределения эксплуатационной работы по организации вагонопотоков на технических станциях Белорусской железной дороги/ А. Б. Макриденко, Т. В. Пигульгун, В. Г. Кузнецов [и др.] // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2018. – № 2 (37). – С. 23–26.

УДК 656.212.05

# СТРУКТУРНОЕ И ВРЕМЕННОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЕЗДНОЙ РАБОТЫ НА ТЕХНИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ УЧАСТКАХ

*В. Г. КУЗНЕЦОВ, И. М. ЛИТВИНОВА*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

*Е. Н. ЗАВОДЦОВ*
*Белорусская железная дорога, г. Минск*

Резервирование в эксплуатационной работе – это способ обеспечения надежности выполнения операций поездной и маневровой работы на железнодорожных станциях и участках за счет увеличения емкости путевой инфраструктуры, использования дополнительных средств и (или) ресурсов сверх минимально необходимых для выполнения потребной транспортной работы и расчетных норм времени на выполнение технологических операций [1].

Резервирование в транспортных системах обеспечивается различными способами [2]. Структурное (элементное) резервирование – метод повышения эксплуатационной надежности станций и участков, предусматривающий использование избыточных элементов, входящих в инфраструктуру или ресурсы подсистемы, которые можно представить как каналы транспортного обслуживания. Временное резервирование – метод повышения эксплуатационной надежности объекта, который предусматривает использование свободного от обслуживания расчетного транспортного потока времени суток, оставшегося после выполнения технологических процессов обслуживания [3]. Временное резервирование обеспечивается при планировании поездной работы на технических станциях или участках, при котором создается резерв рабочего времени, достаточный для выполнения дополнительной транспортной работы.

Наиболее существенным способом структурного резервирования, обеспечивающим устойчивость выполнения технологических процессов в условиях сгущенного поступления транспортного потока на обслуживание или возникновения отказов в использовании путей парков и устройств, является наличие на технических станциях достаточного путевого развития (количество путей и их емкость в вагонах), позволяющего беспрепятственно принимать поезда (составы) в подсистемы технической станции (парки). При этом следует учитывать условия транспортного обслуживания в парках: прием и отправление поездов, структуру поездопотока, затраты времени на обслуживание поездов различных категорий, выполнение операций маневровой работы с вагонами и поездными локомотивами, пропуск пассажирских поездов и т. п. Благодаря резервированию увеличивается пропускная способность станции, ее подсистем (парков, горки, втяжных путей и т. п.), создается необходимый резерв пропускной способности, который может использован для регулирования поездной маневровой работы и соответственно снижения потерь в эксплуатационной работе [4, 5].

Например, при обнаружении нарушений, препятствующих выполнению технологических операций с пассажирскими поездами в приемоотправочном парке (ПОП), требующих закрытия пути, структурное резервирование позволяет провести регулировочные меры по приему и отправлению поездов за счет переноса их обслуживания на иные пути ПОП и проработки вариантных маршрутов, с соблюдением норм времени выполнения технологических операций (рисунок 1).

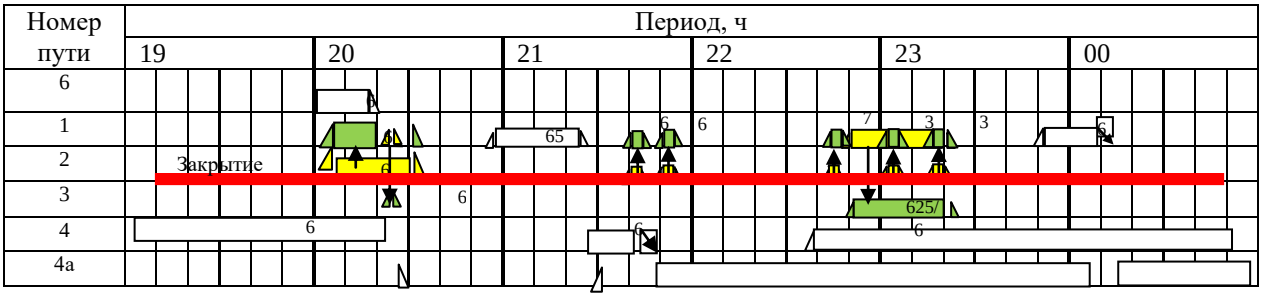



Рисунок 1 – Схема пропуска при закрытии 2-го пути пассажирского ПОП станции

Возникновение нестандартных ситуаций, связанных с закрытием для движения пути, приводит к уменьшению пропускной способности ПОП на 20 %. Обеспечение устойчивости в обслуживании пассажирских поездов достигается за счет:

– оперативной разработки вариантного графика приема пассажирских поездов;

– согласованности действий ДСП, ДНЦ, ДНЦО;

– заблаговременного предупреждения пассажиров об изменении путей приема (отправления) пассажирских поездов, что обеспечивает безопасный и заблаговременный их проход.

Временное резервирование включает три компоненты: часть суточного бюджета, которая резервируется исходя из уровня надежности инфраструктуры и подвижного состава ($\alpha^{о}_{н}$); часть времени, на погашения неравномерности грузовых перевозок (для однопутных перегонов $\beta_р$ = 0,75; для двухпутных перегонов $\beta_р$ = 0,85); свободный резерв времени из-за неиспользования пропускной способности (рисунок 2). Свободный временной резерв устанавливается исходя из баланса времени на выполнение технологических операций в соответствии с ТНПА и использования суточного бюджета времени для пропуска всех категорий поездов по объектам инфраструктуры:

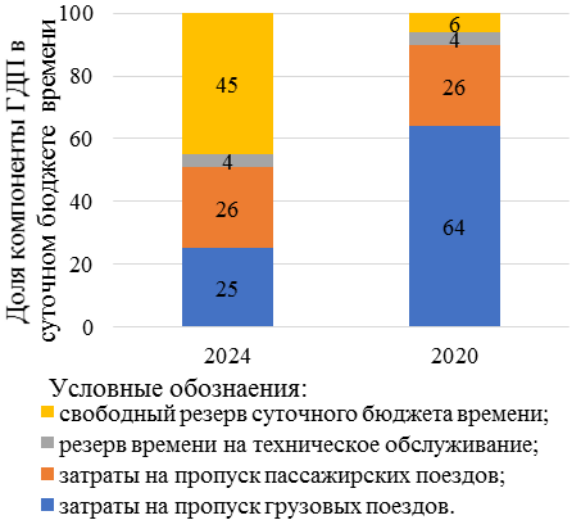



Рисунок 2 – Использование суточного бюджета времени в поездной работе участка

– для станций:

$$\Delta T^{тс}_{рез} = (1440 - \sum T)\alpha^{о}_{н} - \left[T^{с}_{пас} + (T^{с}_{гр} + T^{с}_{ман})\beta_р\right]; \quad (1)$$

– для перегонов участка:

$$\Delta T^{пу}_{рез} = (1440 - \sum T)\alpha^{о}_{н} - \left[T^{с}_{пас} + T^{с}_{гр})\beta_р\right]. \quad (2)$$

где $\alpha^{о}_{н}$ – коэффициент надежности объекта инфраструктуры железнодорожной станции либо участка с учетом состояния технических устройств и подвижного состава, обращаемого в подсистеме; $T^{с}_{пас}$ – бюджет времени в течение суток, занятый пропуском (обслуживанием) пассажирских поездов различных категорий, мин; $T^{с}_{гр}$ – бюджет времени в течение суток, занятый пропуском (обслуживанием) грузовых поездов различных категорий, мин; $T^{с}_{ман}$ – бюджет времени в течение суток, занятый выполнением маневровых передвижений, мин.

Например, изменение объемов и направлений перемещения вагонопотока привело к увеличению свободного резерва времени в ГДП на однопутном участке с 6 (2020 г.) до 45 % (2024 г.).

Таким образом, анализ временного и структурного резервирования, их соотношения на технических станциях и участках позволяет дать оценку соответствия объемов эксплуатационной работы, технического оснащения и технологии перевозочного процесса.

**Список литературы**

1 **Грунтов, П. С.** Эксплуатационная надежность станций : монография / П. С. Грунтов. – М. : Транспорт, 1986. – 247 с.

2 **Северцев, Н. А.** Надежность сложных систем в эксплуатации и отработке : учеб. пособие / Н. А. Северцев. – М. : Высш. шк., 1989. – 432 с.

3 **Каретников, А. Д.** График движения поездов : монография / А. Д. Каретников, Н. А. Воробьев. – М. : Транспорт, 1979. – 301 с.

4 **Кузнецов, В. Г.** Оценка технологической устойчивости работы железнодорожных станций при их модернизации / В. Г. Кузнецов // Сб. трудов 7-й Междунар. науч. конф. специалистов ж.-д. трансп., 4–6 окт. 2000 г., Враньска Баня, Югославия. – Белград : Совет инженеров и техников, 2000. – С. 600–603.

5 **Кузнецов, В. Г.** Моделирование использования суточного бюджета времени при оценке пропускной способности объектов железнодорожного узла / В. Г. Кузнецов, А. А. Ерофеев, П. М. Дулуб // Проблемы безопасности на транспорте : материалы X междунар. науч.-практ. конф. Ч. III / под ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2020. – С. 36–38.

УДК 656.21

# ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ТЕХНИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ УЧАСТКОВ

*В. Г. КУЗНЕЦОВ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

*О. В. МЛЯВАЯ*
*Белорусская железная дорога, г. Гомель*

Качество эксплуатационной работы на железнодорожном транспорте определяется исходя из выбранной на железной дороге единой технологии перевозочного процесса (ЕТПП), а также технологии работы железнодорожных направлений (линий, коридоров) и их подсистем: технических станций и железнодорожных участков. Устойчивость движения поездов и выполнения маневровой работы является одной их характеристик качества перевозочного процесса и устанавливается на основе оценки соответствия динамики изменений в объемах транспортной нагрузки, надежности инфраструктуры и подвижного состава, системы мер адаптивного оперативного управления и параметров ЕТПП. Поэтому параметры устойчивости процессов на технических станциях и участках должны устанавливаться с учетом множества эксплуатационных факторов: эксплуатационной нагрузки, технологий работ, технического оснащения и т. п. [1, 2].

Параметры качества эксплуатационной работы на технических станциях и участках устанавливаются исходя из нормативных требований как по обеспечению потребных объемов перевозки с учетом динамики (неравномерности), так и по обеспечению безопасности поездов и маневровые работы, сохранности перевозимых грузов и иных условий [3].

Устойчивость эксплуатационной работы таких сложных подсистем, как техническая станция и железнодорожный участок может быть оценена комплексом характеризующих ее параметров и показателей. Технические характеристики (путевое развитие, уровень технического оснащения, эксплуатационная надежность и т. п.), параметры ПФ (структура вагонопотока, количество и мощность назначений и т. п.), ГДП (структура поездопотока, равномерность и интенсивность поездной нагрузки и т. п.) определяют параметры устойчивости и могут быть выражены такими интегральными параметрами, как пропускная, провозная и перерабатывающая способность, а также наличие резерва ресурсов для компенсации неравномерности перевозок и отказов в эксплуатационной работе.

Оценка параметров состояния эксплуатационной работы на технических станциях и участках позволяет установить изменения характеристик поездной и маневровой работы и исследовать связь между показателями экономичности эффективности и устойчивости. Организационно-техническое обеспечение устойчивой работы технических станций и участков должно быть экономически обосновано во взаимосвязи с их функционированием и величиной издержек при нахождении системы в неустойчивом состоянии.

Параметры устойчивости следует рассматривать как показатели качества перевозочного процесса, характеризующие способность подсистем железной дороги адаптироваться к эксплуатационным условиям и обеспечивать свою деятельность в пределах допустимых нормативов, установлен-

ных в НПА. Под устойчивостью эксплуатационной работы технических станций и участков следует понимать свойства этих подсистем, заключающиеся в их способности выполнять технологические процессы в заданных условиях эксплуатации [4].

Для технической станции устойчивость эксплуатационной работы связана с беспрепятственным приемом поездов на станцию в соответствии с ГДП и дальнейшим их пропуском и переработкой на станции в соответствии с нормами технологического процесса. Всякое недопустимое отклонение от технологических норм, вызывающее задержки в обслуживании вагонопотока, можно считать свойством нарушения устойчивости работы станции. Для железнодорожного участка устойчивость эксплуатационной работы связана с пропуском заявленного поездопотока по установленным ниткам в соответствии с нормативами ГДП (в том числе вариантных и актуальных ГДП). Степень устойчивости железнодорожных подсистем зависит от быстродействия проведения регулировочных мер по восстановлению эксплуатационного состояния в нормы, определенные в локальных НПА.

Кортеж параметров для оценки устойчивости может включать: для железнодорожной станции – рабочий парк вагонов различных категорий, темп приема, расформирования, формирования, отправления поездов, простой вагонов и т. п.; для железнодорожного участка – темп приема поездов на участок, интенсивность движения, плотность расположения поездов на участке, участковую скорость, выполнение графика движения поездов и т. п.).

Возникающие в подсистемах возмущения (внутреннего и внешнего характера), как правило, носят случайной характер и дискретны по времени. Нахождение подсистем в неустойчивом состоянии возможно установить на основе риск-ориентированного подхода [5], позволяющего моделировать процесс перехода в неустойчивое состояние и возникновение эксплуатационных и иных потерь. Система оперативного управления на железной дороге должна обеспечивать мониторинг состояния эксплуатационной работы в реальном масштабе времени на основе прикладных программ АСУ и быть готова к проведению мер предупредительного или последующего характера [3, 4].

Процесс оперативного регулирования выполняется на основе контроля параметров насыщения подсистем транспортным потоком (вагонами, составами, поездами). Процесс предельного насыщения может быть вызван множеством причин: увеличение подхода поездов в подсистему (неравномерность перевозок), отказ технических устройств, технологический сбой в обслуживании транспортного потока на объектах подсистем. Оценка значения регулируемого параметра проводится по отклонению текущего (прогнозного) значения ($П_н$) от допустимого ($П_{доп}$): ($\Delta П_{доп} = П_н - П_{доп}$). Степень отклонения (рассогласования) определяет характер и длительность мер регулирования [2].

Устойчивость в обслуживании транспортного потока взаимосвязано с работоспособностью железнодорожных подсистем. Исходя из этого можно установить коэффициент оперативной готовности подсистем как вероятность того, что объект, находясь в режиме обслуживания транспортного потока, окажется работоспособным в произвольный момент времени в процессе эксплуатации и начиная с этого момента будет работать безотказно в течение заданного интервала времени:

$$R(t_о) = 1 - \frac{T_в}{T_р + T_в},$$

где $T_р$ – математическое ожидание времени безотказной работы подсистемы в течение заданного (планового) периода времени $t_0$ ; $T_в$ – математическое ожидание (среднее значение) времени восстановления работоспособности системы.

Коэффициент $R(t_0)$ является важным параметром оценки устойчивости подсистем, и его возможно определить как статистическим путем, так и моделированием возникновения нестандартных ситуаций. Например, при моделирования ситуаций, связанных с нарушением обслуживания в поездной работе на технических станциях (уменьшение путей обслуживания, замена поездных локомотивов, прием поездов длинносоставных или повышенной длины и т. п.), установлены негативные процессы, характеризующиеся снижением коэффициента $R(t_0)$ до 0,73–0,84, а нарушения в выполнении маневровой работ на станции (отказы при расформировании составов, отказ маневровой радиосвязи, переработка вагонов с опасными грузами и т. п.) могут приводить к снижению коэффициента $R(t_0)$ до 0,81–0,92 и существенным эксплуатационным издержкам.

Анализ функционирования технических станций и участков в различных эксплуатационных условиях показывает, то большинство станций имеют устойчивый характер работы, случаи возникновения нарушения работоспособности по отдельным процессам и объектам маловероятны, а пери-

оды времени восстановления минимальны и в большинстве случаев не приводят к предельному насыщению подсистем поездами (вагонами). В то же время при переходе работы технических станций и железнодорожных участков к загруженному режиму эксплуатационной работы возможны системные задержки в обслуживания транспортного потока.

Определение параметров устойчивости процессов на станциях или участках как сложных динамических систем, отдельных их объектов позволяет дать системную оценку качества эксплуатационной работы и решать оперативные задачи поездной и маневровой работы с учетом реальных условий, выбирать меры по выполнению технологических процессов, ПФ, ГДП, плановых заданий и нормативов, совершенствованию ЕТПП и усилению пропускной и провозной способности, использованию ресурсов.

**Список литературы**

1 Управление эксплуатационной работой железных дорог и качеством перевозок : учеб. / П. С. Грунтов, Ю. В. Дьяков, А. М. Марочкин [и др.] ; под общ. ред. П. С. Грунтова. – М. : Транспорт, 1994. – 542 с.

2 **Грунтов, П. С.** Эксплуатационная надежность станций : монография / П. С. Грунтов. – М. : Транспорт, 1986.– 247 с.

3 **Пищик, Ф. П.** Безопасность движения на железнодорожном транспорте : учеб. пособие / Ф. П. Пищик. – Гомель : БелГУТ, 2009. – 267 с.

4 Автоматизированные диспетчерские центры управления эксплуатационной работой железных дорог : монография / П. С. Грунтов, С. А. Бабенко, В. Г. Кузнецов [и др.] ; под ред. П. С. Грунтова. – М. : Транспорт, 1990. – 288 с.

5 **Млявая, О. В.** Параметрическое представление рисков в процессах регулирования движением поездов / О. В. Млявая, В. Г. Кузнецов // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов : материалы междунар. науч.-практ. конф. В 2 ч. Ч. 1. – Гомель : БелГУТ, 2023. – С. 160–163.

УДК: 656.078

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ТРАНСПОРТНОГО РЫНКА НА ПОДХОДЫ К РАЗВИТИЮ СИСТЕМЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

*О. Н. ЛИСОГУРСКИЙ, В. Г. КУЗНЕЦОВ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Деятельность на железнодорожном транспорте выполняется достаточно большим количеством участников перевозочного процесса, каждый из которых руководствуется целевыми отраслевыми показателями и собственными экономическими интересами [1]. В таких условиях актуальным является наличие согласованной системы показателей, позволяющей объективно оценивать деятельность каждого участника и обеспечивать сбалансированное стратегическое управление перевозочным процессом на железнодорожном транспорте.

Организационное взаимодействие участников перевозки регламентируется системой нормативно-правовых актов (НПА) и единым технологическим процессом перевозки (ЕТПП). Для организации и реализации ЕТПП на железнодорожном транспорте определена система показателей эксплуатационной работы [1]. Каждый участник перевозочного процесса определяет собственные целевые показатели исходя из целевых задач государства, отрасли, организации бизнес-процессов и формирует меры по их достижению. Наличие нечеткого множества локальных показателей работы участников перевозочного процесса не всегда позволяет достичь максимального синергетического эффекта, приводит к увеличению энтропии и снижению управляемости всей транспортной системы, системно ухудшаются показатели эксплуатационной работы: время оборота вагона, использование провозной способности железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава и т. п.

Сложившаяся на железнодорожном транспорте и регламентированная в ЕТПП и других НПА система показателей, методология их расчета не позволяет учесть бизнес-интересы участников перевозочного процесса и их взаимодействие для достижения общесистемных целей [2–4]. Необходимы изменения подходов к нормированию и анализу эксплуатационной деятельности на железнодорожном транспорте, которые должны учитывать важные тенденции рынка перевозок:

– увеличение числа участников перевозочного процесса во многих сферах транспортных услуг;

– нормирование показателей транспортной деятельности участников перевозочного процесса с учетом их бизнес-процессов, прав и обязанностей на рынке перевозок;

– увеличение парка вагонов различных собственников, структуры парка, способов их привлечения и использования в перевозках;

– существенное влияние на эксплуатационную деятельность маршрутов следования груженых и порожних вагонопотоков, высокая энтропия динамических карт вагонопотоков в сети;

– актуализация комплексного подхода к нормированию показателей с детализацией по уровням управления: общегосударственному, отраслевому и уровню предприятий (организаций);

– развитие структурной композиции показателей: дорога – отделение – станция в рамках железных дорог путем моделирования маршрутов следования вагонопотоков в сети;

– развитие информационных систем и переходом к пономерному учету операций с вагонами;

– потребностью в увеличении точности в расчетах и оперативной корректировке показателей;

– расширение декомпозиции показателей по новым учетным признакам транспортно-логистических цепей доставки грузов и перемещения вагонов;

– другими факторами.

Таким образом, динамика изменения условий перевозки на транспортном рынке показывает необходимость предметного совершенствования системы планирования и анализа эксплуатационной деятельности железнодорожного транспорта, разработки взаимоувязанной системы ключевых показателей (КП) эффективности деятельности каждого участника перевозочного процесса с оценкой бизнес-процессов в рамках общесистемных показателей ЕТПП.

Развитие системы показателей возможно проводить по следующим этапам:

1) анализ и моделирование перевозочного процесса – описание ЕТПП как совокупности стадий (фаз) перевозки; определение и параметрическая идентификация функций участников перевозочного процесса и их взаимодействия при реализации бизнес-процессов;

2) определение и формализация целей участников ЕТПП – определение общесистемных целей (государственного уровня); декомпозиция целей на отраслевом уровне и участников перевозочного процесса (организаций); определять целевые показатели необходимо по ключевых критериям эффективности: время, стоимость, ресурсы и качество их использования, безопасность и др.;

3) разработка методологии расчета ключевых показателей эффективности перевозочного процесса (КП) – определение показателей эффективности для каждой цели отраслевого уровня на основе определения показателей бизнес-процессов участников перевозочного процесса; установление методологической взаимосвязи между показателями;

4) комплексные системы нормирования показателей – разработка порядка и методов нормирования плановых норм для уровней управления с учетом транспортно-логистических схем перевозки в сети; установление параметрической связи между техническими и сменно-суточными планами;

5) система анализа выполнения плановых норм – определение источников мониторинга данных; идентификация информации и предоставление аналитических отчетов; разработка методологии факторного анализа с оценкой влияния участников ЕТПП на выполнение общесистемных и локальных показателей.

Совершенствование системы нормирования и анализа показателей целесообразно проводить комплексно с учетом следующих направлений развития:

1) цифровизация и автоматизация расчета показателей: автоматизация сбора и обработки данных; внедрение новых продуктов в информационных системах, позволяющих производить декомпозицию показателей по различным признакам; использование технологий больших данных и интеллектуального обучения; разработка систем мониторинга и факторного анализа причин отклонений КП от норм;

2) совершенствование методологических подходов к определению и анализу КП: переход от ситуационно-объектных методов общесистемной иерархической структуры (дорога – отделение – станция) к расчету показателей на основе формирования динамических карт по заявленным корреспонденциям транспортных потоков (переход от скалярных показателей к векторным); переход от статичных методов моделирования КП к динамическим; разработка сквозных (интегральных) показателей, отражающих общий результат взаимодействия участников; введение баз данных относительных показателей для сравнения эффективности деятельности на разных уровнях;

3) повышение согласованности и системности КП: согласование показателей между участниками перевозочного процесса; разработка балансов количественных и качественных показателей;

4) совершенствование аналитических методов нормирования и анализа: переход от сравнительного анализа показателей к факторному аналитическому моделированию процессов анализа – выявление причин, зависимостей и трендов рядов целевых и локальных показателей; формирование комплексных индексов эффективности; связь КП с рисками и устойчивостью перевозочного процесса;

5) нормативное регулирование взаимодействия участников ЕТПП: разработка необходимых НПА, регламентирующих условия взаимодействия участников, их права и обязанности;

6) расширение методов оценки эффективности бизнес-процессов, внедрение новых подходов к оценке деятельности: энергоэффективность перевозок, товаро-транспортная согласованность маршрутных перевозок, клиентоориентированность технологий, инновационность технических и технологический решений, синергетический подход к транспортному балансу в сети и др.

Таким образом, предложенный подход к совершенствованию системы показателей позволяет сформировать новый механизм КП в развивающейся многоуровневой системе управления на железнодорожном транспорте. Показатели участников перевозочного процесса агрегируются в показатели отраслевого и государственного уровней, обеспечивая целостное представление о состоянии транспортной системы. Это позволит осуществлять более достоверное стратегическое и оперативное планирование; выявлять несогласованность бизнес-процессов и дисбалансы использования ресурсов; повышать взаимодействие участников в рамках ЕТПП; принимать обоснованные решения при регулировании транспортной деятельности.

**Список литературы**

1 **Сметанин, А. И.** Техническое нормирование эксплуатационной работы железных дорог : монография / А. И. Сметанин. – М. : Транспорт, 1984. – 295 с.

**2 Шатохин, А. А**. Управление вагонными парками в рыночных условиях / А. А. Шатохин. – М. : РУТ (МИИТ), 2024. – 122 с.

3 **Иванков, А. Н.** Эффективное управление вагонными парками на основе развития железнодорожной сети и тарифного регулирования / А. Н. Иванков, П. К. Рыбин, М. В. Четчуев // Бюллетень ученого совета АО «ИЭРТ». – 2025. – № 10-1. – С. 56–58.

4 Расчет показателей использования вагонов на основе автоматизированного учёта их состояния и местонахождения/ В. Г. Кузнецов, О. Н. Лисогуркий, Е. И. Усенков, Т. В. Лытко // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2011. – № 2 (23). – С. 29–35.

УДК 656.212.5:004.02

## ДЕРЕВО РЕШЕНИЙ КАК МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СТАНЦИИ

*А. А. НАУМЕНКО*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Железнодорожный транспорт является важнейшим элементом транспортной системы Республики Беларусь. С его помощью осуществляется значительная часть грузооборота и пассажирских перевозок страны [1].

Сортировочная станция представляет собой сложный объект, в котором множество технологических процессов взаимосвязаны и требуют оперативного и точного управления. В условиях растущего объема грузоперевозок и усложняющихся оперативных задач повышение эффективности работы станции приобретает стратегическое значение. Перспективным направлением совершенствования системы управления сортировочной станции является внедрение интеллектуальных систем управления, способных к автоматизированному распознаванию и идентификации отклонений и выбору наилучших корректирующих воздействий. Одним из эффективных методов, подходящих для реализации такой функциональности, является метод дерева решений [2].

Дерево решений – это структура, которая позволяет формализовать процесс выбора решения, с помощью последовательности критериев и условий, представленных в виде древовидной схемы. Этот метод широко применяется в медицине, финансах, инженерии, логистике и, в частности, в управлении транспортными системами [3].

Применение метода дерева решений обеспечивает автоматизацию идентификации отклонений и выбор корректирующих действий, что значительно сокращает время реакции и повышает точность управления. Этот метод характеризуется логичностью принятия решений, что облегчает его разработку, адаптацию и верификацию. Кроме того, дерево решений легко объединяется с другими интеллектуальными методами, такими как нейронные сети или алгоритмы машинного обучения, позволяя системе адаптироваться к изменяющимся условиям и совершенствовать свои модели на основе накопленного опыта [3].

Применение дерева решений в оперативном управлении железнодорожной станцией представляет собой перспективное направление развития интеллектуальных систем управления на железнодорожном транспорте. Этот метод машинного обучения позволяет диспетчеру или автоматизированной системе визуализировать возможные сценарии развития событий, оценить риски и выгоды каждого варианта и выбрать стратегию, максимизирующую заданный критерий [2].

Построение дерева решений для интеллектуальной системы управления сортировочной станцией начинается с определения корневого узла, которым является факт фиксации отклонения. Данное событие начинает работу дерева решений.

От корневого узла строится набор проверяемых атрибутов (вопросов), которые позволяют идентифицировать конкретную причину отклонения. Каждый атрибут проверяется в определенном узле дерева. В зависимости от результата проверки система переходит по соответствующей ветви к следующему узлу.

Конечными узлами (листьями) дерева являются рекомендуемые корректирующие воздействия.

На сортировочной станции входными параметрами для дерева могут служить данные о времени прибытия и составах, техническом состоянии вагонов, занятости путей и других факторов, влияющих на работу станции. На основе этих параметров дерево решений помогает выявить отклонения от планового режима и определить оптимальные корректирующие мероприятия [4].

Применение дерева решений особенно актуально при отклонениях от штатного режима работы станции: при задержках поездов, отказах технических средств, аварийных ситуациях или изменении объёма грузопотока. В таких условиях диспетчер сталкивается с множеством вариантов, каждый из которых имеет различные последствия. Дерево решений помогает формализовать эти альтернативы, присвоить им вероятности и определить наиболее верное решение [5].

На практике деревья решений часто интегрируются в автоматизированные системы управления станцией (АСУ СТ). Современные системы собирают данные в реальном времени (положение поездов, состояние путей, прогнозы задержек), а встроенный модуль на основе дерева решений генерирует рекомендации для пользователя автоматизированной системы [1].

Основными преимуществами использования дерева решений являются интерпретируемость получаемых моделей, возможность работы с разнородными данными и относительная простота реализации алгоритмов. В контексте железнодорожных станций эти качества особенно важны, поскольку обеспечивают прозрачность процесса принятия решений и сохраняют возможность контроля со стороны дежурного персонала.

Вместе с тем необходимо учитывать определенные ограничения. Эффективность дерева решений во многом зависит от качества и полноты исходных данных, так как чрезмерное усложнение структуры дерева может привести к снижению общей эффективности из-за избыточной детализации. Для минимизации этих рисков важна оптимизация структуры дерева, включающая в себя отбор ключевых факторов и объединение схожих признаков. Обучение с помощью накопленного опыта помогает улучшить структуру дерева и повысить качество принимаемых решений [3].

Важно, что дерево решений особенно эффективно при краткосрочном и среднесрочном оперативном планировании – от нескольких минут до нескольких часов вперед. Оно не предназначено для стратегического планирования, но идеально подходит для реагирования на возникающие отклонения и перераспределение ресурсов.

Таким образом, дерево решений является высокоэффективным инструментом в интеллектуальной системе управления сортировочной станции, позволяющим повышать качество управления технологическими процессами, своевременно выявлять отклонения и эффективно корректировать выполнение операций. В перспективе возможно создание комплексных гибридных систем управления, объединяющих различные подходы искусственного интеллекта, что обеспечит устойчивое и адаптивное функционирование станции даже при возникновении большого количества неопределенностей.

**Список литературы**

1 **Ерофеев, А. А.** Интеллектуальная система управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте : монография / А. А. Ерофеев. – Гомель : БелГУТ, 2022. – 407 с.

2 **Браништов, С. А.** Вопросы автоматизации управления поездной работой / С. А. Браништов, Д. А. Тумченок, А. М. Ширванян // Информационно-управляющие системы. – 2014. – № 1 (68). – С. 32–42.

3 **Лемешкина, В. Р.** Дерево решений как метод принятия управленческого решения / В. Р. Лемешкина // Аллея науки. – 2022. – Т. 1, № 2 (65). – С. 375–380.

4 АСУ сортировочными станциями (на примере АСУ СС НПО «Агат» / И. Д. Иванюто, С. С. Галуза, А. А. Ерофеев, Н. Н. Казаков. – Гомель : БелГУТ, 2003. – 159 с.

5 **Борознов, В. О.** Системный анализ работы сортировочной станции на основе метода «дерево целей» / В. О. Борознов, Г. А. Попов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2009. – № 2. – С. 13–21.

УДК 656.222.3

## БЕЗОПАСНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЛИНИЙ

*В. Я. НЕГРЕЙ, С. В. ДОРОШКО*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Пропускная способность двухпутного перегона определяется отдельно по каждому пути при одностороннем и безостановочном проследовании поездов промежуточных раздельных пунктов и частичном (неполном) оборудовании тягового подвижного состава автоматической локомотивной сигнализацией:

$$n_{\text{нал}} = \frac{(1440 - t_{\text{тех}})}{I_{\text{р}}}, \tag{1}$$

где $t_{\text{тех}}$ – суточный бюджет продолжительности выполнения работ по текущему содержанию и плановых видов ремонта инфраструктуры двухпутного перегона железнодорожной линии, мин; $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент надежности железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава; $I_{\text{р}}$ – расчетный интервал между поездами при движении поездов по перегону с фиксированными границами блок-участков, мин.

Теоретически коэффициент надежности $\alpha_{\text{н}}$ представляет собой вероятность безотказной работы перегона, на котором осуществляется взаимодействие подсистем:

а) пути и путевого хозяйства ($P_{\text{п}}$);

б) локомотивов ($P_{\text{л}}$);

в) вагонов ($P_{\text{в}}$);

г) устройств железнодорожной автоматики, телемеханики и связи ($P_{\text{а}}$);

д) железнодорожных станций ($P_{\text{с}}$).

Другими словами, допустив зависимость работы подсистем и случайность технических отказов

$$\alpha_{\text{н}} = P_j = \prod_{j=1}^{n} P_{\text{Б}j}, \tag{2}$$

где $P_j$ – вероятность безотказной работы $j$-й подсистемы.

Если $n = 5$, то

$$P_{\text{Б}j} = \prod_{n=1}^{n=5} P_{\text{п}1} P_{\text{л}2} P_{\text{А}4} P_{\text{с}5}, \tag{3}$$

где $P_{\text{п}1}$, $P_{\text{л}2}$, $P_{\text{в}3}$, $P_{\text{а}4}$, $P_{\text{с}5}$ – соответственно вероятность безотказной работы устройств пути, локомотивов, вагонов, систем автоматики и связи, железнодорожных станций (по приему поездов с перегона).

Для частного случая, когда $P_j$ = const, формула для расчета $\alpha_{\text{н}}$ (или $P_{\text{Бр}}$) примет вид

$$P_{\text{Бр}} = P_j^5. \tag{4}$$

Например, вероятность безотказной работы подсистемы при $P_{\text{Бр}} = 0{,}93$

$$0{,}93 = P_j^5. \tag{5}$$

Преобразовав (5), получим

$$\ln 0{,}93 = 5 \ln P_j. \quad (6)$$

Из (6) следует, что

$$\ln P_j = \frac{\ln 0{,}93.}{5}. \quad (7)$$

$$\ln P_j = \frac{0{,}072570693}{5} = -0{,}014514139.$$

Потенцируя на ходим, что $P_j$ = 0,98559.

Другими словами, если на пропускную способность перегона влияет работа (5) подсистем, то безотказность работы перегона 0,93 может быть достигнута только при условии, что вероятность безотказной работы отдельных подсистем составит не менее 0,98559, или на 6 % больше вероятности безотказной работы перегона. Аналогичные расчеты, выполненные для других значений $\alpha_н$ и $P_j$, показали, что с ростом $P_j$ нелинейно возрастает и коэффициент $\alpha_н$.

Если обозначить долю опасных отказов через $\gamma_j$, то вероятность безотказного функционирования перегона

$$P_{бф} = \prod_{j=1}^{n} P_j \gamma_j. \quad (8)$$

Например, если $P_j$ = 0,98559 и $\gamma_j$ = 0,05, то $P_{оф} = (0{,}98559 \cdot 0{,}05)^5 = 0{,}0000003$.

Если доля опасных отказов $\gamma_j$ = 0,1, то $P_{оф}$ = 0,000009, или возрастает в 31 раз.

Вероятность безопасного функционирования

$$P_{бф} = 1 - P_{оф}. \quad (9)$$

Для рассматриваемого случая

$P_{бф}$ = 1 – 0,000003 = 0,999997.

Дальнейшее развитие теории безопасности функционирования железнодорожных линий связано с ослаблением условия независимости отдельных подсистем. В частности, ряд опасных и неопасных отказов могут «прикрывать» друг друга и влиять на пропускную способность железнодорожной линии.

**Список литературы**

1 **Дорошко, С. В**. Повышение эффективности и безопасности при организации сортировочной работы станции / С. В. Дорошко, С. А. Пожидаев // Тихомировские чтения: Инновационные технологии перевозочного процесса : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. А. А. Ерофеева. – Гомель : БелГУТ, 2019. – С. 131–135.

2 **Дорошко, С. В**. Влияние безопасности сортировочного процесса на систему организации вагонопотоков / С. В. Дорошко // Тихомировские чтения: Наука и современная практика технологии перевозочного процесса : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. А. А. Ерофеева. – Гомель : БелГУТ, 2023. – С. 106–108.

3 **Негрей, В. Я.** Развитие интеллектуальной системы организации вагонопотоками / В. Я. Негрей, С. В. Дорошко // Тихомировские чтения: Наука и современная практика технологии перевозочного процесса : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. А. А. Ерофеева. – Гомель : БелГУТ, 2023. – С. 108–115.

УДК 656.08

## ВОПРОСЫ СТРАТЕГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ И ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

*В. Я. НЕГРЕЙ, С. А. ПОЖИДАЕВ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Последние 30 лет развития транспортных систем радикально изменили сложившиеся структурные основы и принципы построения взаимодействия между всеми участниками перевозочного процесса. Поэтому в настоящее время требуется переосмысление представлений о повышении уровня

безопасности транспортных систем и их экономической эффективности, о принципах построения иерархий управления.

Принципиальным вопросом новой концепции безопасности является переход от идеи тотального контроля и администрирования, недопущения неожиданностей (которые могут носить вероятностный характер) расчетов стратегии развития на прогнозируемый период с нулевой ошибкой и устойчивого роста к идее прогнозирования рисков, возникающих в результате сдвигов в технологиях, демографии, экологии, размещении районов добычи сырья и центров его переработки, стиля жизни и других факторов.

Важнейшее место в современных условиях занимает проблема оптимальной структуры транспортной системы и уровня концентрации управления однотипными функциональными процессами. В первую очередь, целесообразно повысить уровень концентрации сортировочной (маневровой) работы, транспортно-грузовых операций, системы ремонта и технического обслуживания подвижного состава, бухгалтерской и других систем. Целесообразно отказаться от частичных решений в пользу интеллектуальных комплексных программ развития. Построение таких программ требует повышения открытости для различных форм деятельности, устранения межфункциональных ограничений, наличия доступа к информации, возможности формирования экспертных групп, анализа финансовых и материальных потоков на одном уровне с транспортными потоками.

В теории безопасности транспортных систем можно выделить следующие основные этапы.

1 Детерминированный с использованием элементов технико-экономического сравнения вариантов развития транспортных систем. Этот этап позволил сформулировать проблему безопасности и основные подходы к количественной оценке безопасности, обеспечить накопление информации об опасных происшествиях.

2 Вероятностный, который открыл теоретические возможности для описания случайных событий, связанных с опасными отказами. В рамках этого этапа произошла информатизация и создание элементов АСУ «Безопасность», которые хотя и продвинули теорию, однако не решили в полной мере ключевые задачи безопасности.

3 Логико-вероятностный, который характеризуется гармоничным сочетанием детерминированных и вероятностных методов, широким использованием междисциплинарных особенностей явления, достижений прикладных и фундаментальных наук.

Важной методологической особенностью понятия «безопасность» является его принципиальное отличие от понятия «надежность». Сегодня первое находится, скорее, в тени второго. Приведем основные методологические особенности и отличия. Первое – теория надежности изучает, в основном, устойчивые и часто повторяющиеся события, а теория безопасности относительно редкие (чаще – «хвосты» вероятностных распределений), уникальные риски и другие события. Кроме того, теория надежности тесно связана с понятием «отказ», которое можно установить для относительно простых (чаще – элементов) систем. Под безопасностью понимается свойство транспортной системы не создавать опасности для перевозимого груза, технических средств, объектов окружающей среды, а также для здоровья и жизни пассажиров, технического персонала, населения, находящегося в зоне перевозочного процесса. Надежность – это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях, применения технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования. Второе – из ненадежных элементов путем дублирования можно создать абсолютно надежную систему.

УДК 656.212.5.08

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАЗВИТИЯ И ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТЫ ГОРОЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ

*В. Я. НЕГРЕЙ, С. А. ПОЖИДАЕВ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Сортировочные горки по-прежнему играют важную роль по обеспечению перерабатывающей способности железнодорожных станций, распределению транзитных и местных вагонопотоков по

участкам, линиям и целым направлениям, способствуют концентрации сортировочной работы и оптимизации перевозочного процесса. Однако условия функционирования горочных сортировочных комплексов и их устройств в настоящее время значительно изменились и усложнились. Так, сегодня на горках перерабатывается инновационный подвижной состав с улучшенными конструкциями и ходовыми качествами, увеличивается грузоподъемность вагонов, растет осевая нагрузка, значительно возрастают линейные размеры вагонов. К проблемным типам вагонов, которые требуется пропускать через сортировочные горки с особой осторожностью, относятся восьмиосные вагоны, фитинговые платформы-контейнеровозы, вагоны-щеповозы, «лесовозы», для перевозки автомобилей, а в перспективе и сочлененные многоосные вагоны и др.

Известной проблемой на сегодняшний день является переработка на горках длиннобазного подвижного состава, особенно повышенных линейных размеров. Помимо затрудненного прохода таких вагонов через горку, автоматического их сцепления с другими вагонами в кривых участках пути, особенно в *S*-кривых и на разносторонних стрелочных переводах, возникают сложности также с выполнением других маневровых передвижений из-за воздействия ряда неблагоприятных факторов:

– наличие в отцепах длиннобазных вагонов увеличенных линейных размеров (длина 25,69 м по осям автосцепок) в осаживаемом составе, особенно в хвостовой его части по направлению движения;

– S-образные кривые, образованные закрестовинной кривой и переводной кривой стрелочного перевода с минимальной прямой вставкой, а также разносторонними стрелочными переводами;

– неблагоприятное сочетание груженых и порожних групп вагонов, расположенных соответственно в первой и во второй части осаживаемого состава по направлению его движения, т. е. когда порожние длиннобазные вагоны могут оказаться между группой груженых вагонов и локомотивом;

– сила толчка маневрового локомотива для продвижения состава в глубину сортировочного парка и освобождения стрелочных переводов и рельсовых цепей (маневры «толчком»). При этом наибольшее воздействие испытывают близко расположенные вагоны к локомотиву;

– параметры продольного профиля участков спускной части горки и начала сортировочных путей, особенно стрелочной зоны и перевальной частей горки как наиболее ответственных за качество сортировочного процесса, но в большей степени подверженные деформациям профиля в осложненных условиях их содержания в соответствии с проектными решениями;

– зимние условия работы, что увеличивает сопротивление движению вагонов, особенно при длительном простое, как правило, местных вагонов (сопротивление от снега и инея, повышенная ветровая нагрузка и т. д.) и др.

В этих условиях важна также очередность скатывания отцепов с горки, т. к. после длительного простоя первые отцепы будут иметь худшие ходовые качества по сравнению с последними. Кроме того, в пределах спускной части горки и тормозных позиций по маршруту движения удельные сопротивления движению вагонов выше по сравнению с остальными участками пути, т. к. меньше длина пройденного пути от вершины горки. Эти обстоятельства способствуют недокатыванию отцепов до точки прицеливания на пути сортировочного парка.

Усложнение условий функционирования сортировочных комплексов железнодорожных станций требует применения более сложных логико-вероятностных методов оценки и обоснования основных параметров конструкций и технического оснащения сортировочных устройств, включая методы моделирования движения отцепов для проверки соблюдения условий безопасности, комплексной оценки влияния различных факторов на сортировочный процесс, в т. ч. нормативных требований. Таким образом, требуется разработка комплексного обследования и обоснование основных параметров новых или реконструируемых сортировочных устройств. Так, согласно Правилам проектирования сортировочных устройств ВСН-207-89 расчетная высота горки определяется для «трудных» путей каждого пучка сортировочного парка. В современных условиях при обследовании существующих устройств целесообразно такой проверочный расчет производить для каждого пути парка для выработки эффективных проектных и технико-технологических решений.

Данный подход был применен для одной из сортировочных станций Белорусской железной дороги. Полученные результаты позволили обеспечить минимально необходимую высоту горки для крайних пучков путей за счет понижения уровня расчетной точки этих путей сортировочно-отправочного парка станции с учетом приведения конструкции продольного профиля путей в парке к вогнутому очертанию, а не при повышении высоты сортировочной горки. В целом проектные решения, применимые в различных ситуациях, удалось систематизировать по трем уровням.

1 Организационно-технологические мероприятия:

– осаживание вагонов на крайние пути сортировочно-отправочного парка (наихудшие условия роспуска на «трудные» пути в краткосрочные периоды значительного снижения объемов работы. Перевод горки в категорию меньшей мощности при значительном снижении объемов работы в долгосрочной перспективе (10 и более лет). В этом случае уменьшаются расчетная минимально необходимая высота сортировочной горки, скорости движения и степень торможения отцепов;

– регулирование скорости роспуска с ее снижением или кратковременной остановкой для обеспечения интервалов времени на разделительных элементах при отрицательном «дифе»;

– применение режима роспуска с переменной скоростью для обеспечения докатывания ОП бегунов до РТ путей с недостаточной высотой сортировочной горки;

– обеспечение рациональной степени торможения отцепов ХБ (доля погашения энергетической высоты) на каждой тормозной позиции для обеспечения скорости входа ХБ в РТ с допустимой скоростью соударения при неблагоприятных условиях скатывания и достаточных интервалов между отцепами;

– регулирование скорости выпуска отцепов в парк (в РТ каждого пути) путем рационального торможения на всех тормозных позициях и ее снижение при обеспечении остановки отцепов в пределах полезной длины путей при их свободности и предотвращения ухода вагонов в противоположную горловину без использования и с использованием тормозных башмаков.

2 Предложения, реализуемые в порядке текущего содержания устройств:

– приведение продольного профиля спускной части и начала сортировочных путей к индивидуальному очертанию в соответствии с нормативными требованиями (устранение дефектов элементов профиля в основном стрелочной зоны и начала сортировочных путей);

– выправка продольного профиля на участках горки с пологими уклонами для приведения его к нормативному очертанию с гладким сопряжением всех элементов профиля;

– увеличение фактической конструктивной высоты горки для крайних пучков путей за счет понижения отметок точек поперечного профиля путей и формирования поперечных уклонов к крайним путям. Допустимая разность отметок головок рельсов смежных путей составляет 0,15 м;

– размещение участков стрелочной зоны, парковой тормозной позиции и начальных участков сортировочных путей на нулевом уклоне, что, однако, требует дополнительных исследований;

– приведение очертания продольного профиля сортировочно-отправочных путей парка к нормативному виду за счет продления уклона путей крутизной 0,6 ‰ в глубину парка до участка с противоуклоном крутизной 2 ‰ и длиной 100 м в концевой части путей парка с сохранением высотных отметок выходной горловины или их увеличением.

3 Предложения, требующие переустройства горочного комплекса:

– совершенствование конструкции горочной горловины с ее переустройством с учетом уположения кривых участков путей в плане радиусом не менее 200 м, что будет способствовать понижению минимально необходимой высоты сортировочной горки для крайних путей СО-парка;

– изменение конструкции продольного профиля головного участка горки (до начала второй тормозной позиции) для обеспечения допустимой скорости входа ОХБ на эту позицию без использования или с частичным использованием первой тормозной позиции;

– размещение в конце сортировочно-отправочных путей механических балочных устройств для заграждения путей БЗУ-ДУ-СП2К или других типов;

– оптимизация конструкции сортировочной горки и усиление ее технического оснащения, что заключается в механизации или частичной механизации сортировочной горки.

УДК 656.212.5:625.173.5

## ОЦЕНКА ГЛАДКОСТИ СОПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ СОРТИРОВОЧНЫХ УСТРОЙСТВ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА *IRI*

*Д. Д. ПУЧКОВ*
*Белорусская железная дорога, г. Минск*

Надлежащая характеристика гладкости железнодорожного полотна в продольном профиле необходима для качественного технического обслуживания, обеспечения безопасности и плавности

движения транспортных средств, а также для снижения динамической нагрузки на транспортное средство и железнодорожный путь. Международный индекс ровности (*IRI – International Roughness Index*) является наиболее распространенным и используемым во всём мире показателем, характеризующим как фактическую, так и проектную продольную неровность земляного полотна. Индекс *IRI* служит показателем эксплуатационных характеристик продольного профиля и качества передвижения транспортных средств. Индекс *IRI* сильно коррелирует с общим уровнем вибрации при движении и нагрузке на покрытие или железнодорожный путь. Величина *IRI* может быть определена как среднее абсолютное значение уклонов всех элементов продольного профиля:

$$IRI = \sum_{j=1}^{n} \left| i_j \right| \Big/ n ,$$

где $\sum_{j=1}^{n} \left| i_j \right|$ – суммарный уклон элементов профиля, ‰; $n$ – количество элементов профиля.

Для выявления возможности практического использования метода *IRI* произведем оценку гладкости сопряжения элементов продольного профиля сортировочной горки с помощью специального прикладного программного обеспечения, в котором реализуется сплайновый метод анализа конструкции сортировочных устройств. Согласно Правилам проектирования сортировочных устройств ВСН 207-89 разность сопрягаемых уклонов не должна превышать 25 ‰ лишь для смежных элементов профиля, в то время как при использовании сплайнового метода продольный профиль проектируется как единое целое и представляет собой гладкосопряженную конструкцию. Количественной мерой оценки качества сопряжения элементов профиля уже на стадии разработки проектных решений предлагается использовать аналог индекса *IRI*. Обеспечение гладкости сопряжения элементов продольного профиля дает возможность повысить эксплуатационные характеристики конструкции сортировочной горки за счет снижения уровня образования дефектов продольного профиля (ямы, трамплины, противоуклоны и другие неровности, приводящие к отклонению фактических параметров профиля от проектных) и сократить потребность в выправке продольного профиля земляного полотна спускных путей, особенно в зоне тормозных позиций, скоростных и межпозиционном участках горки, а также уменьшить основное сопротивление движению вагонов при скатывании с горки и диссипацию энергии отцепов в окружающую среду, тем самым более точно прогнозировать их динамические характеристики.

Конструкция существующего продольного профиля сортировочной горки представлена на рисунке 1, а вариант проектной конструкции продольного профиля – на рисунке 2.

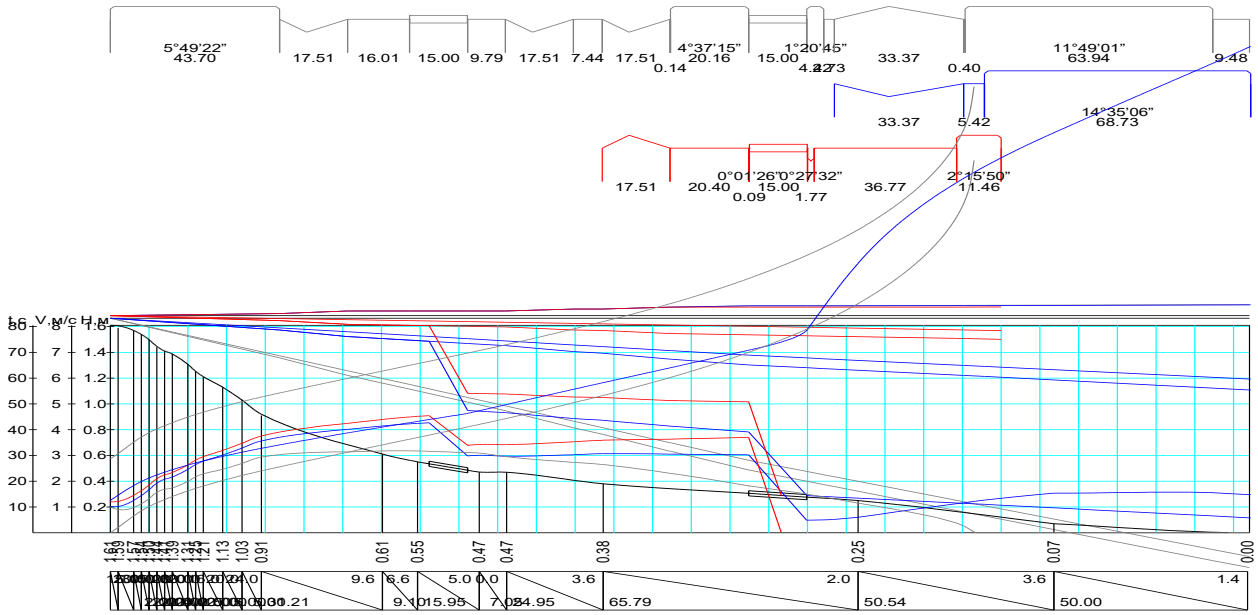



Рисунок 1 – Существующая конструкция продольного профиля сортировочной горки

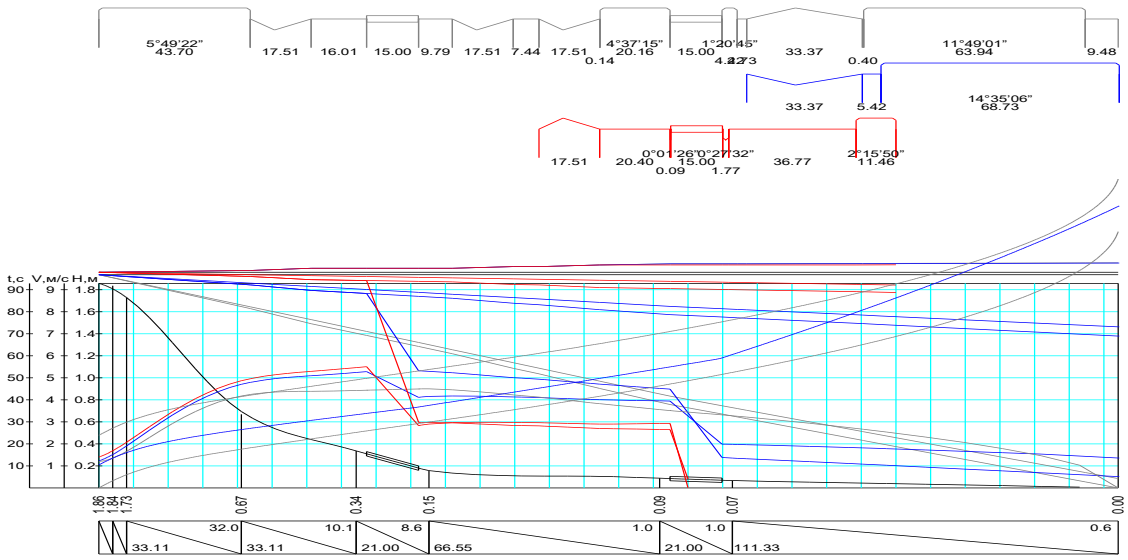



Рисунок 2 – Гладкосопряженный проектный продольный профиль сортировочной горки

Данная оценка производится для сравнения гладкости сопряжения проектных и фактических элементов конструкции сортировочной горки. Гладкость сопряжения элементов продольного профиля обеспечивает, помимо прочего, снижение образования дефектов земляного полотна, особенно при его недостаточной жесткости, также с грунтами в основании так называемого «торфоболотного» типа, а сплайновый анализ позволяет прогнозировать образования дефектов земляного полотна на проектном профиле в процессе эксплуатации.

Для существующей конструкции профиля $IRI_{сп} = \dfrac{2,6496}{214} \cdot 1000 = 12,38$ ‰.

Для проектного варианта конструкции профиля $IRI_{сп} = \dfrac{0,8674}{84} \cdot 1000 = 10,33$ ‰.

Тогда расхождение в оценочной характеристике гладкости сопряжения элементов продольного профиля $\Delta = 12,38 - 10,33 = 2,05$ ‰.

Таким образом, примененный аналог индекса *IRI* для существующей конструкции сортировочной горки составил 12,38 ‰, для проектной конструкции – 10,33 ‰, следовательно, запроектированный вариант конструкции продольного профиля сортировочной горки обеспечивает лучшую гладкость сопряжения элементов продольного профиля по сравнению с существующим. Сравнительные графики изменения индекса *IRI* для существующего и проектного вариантов конструкции продольного профиля сортировочной горки приведены на рисунке 3.

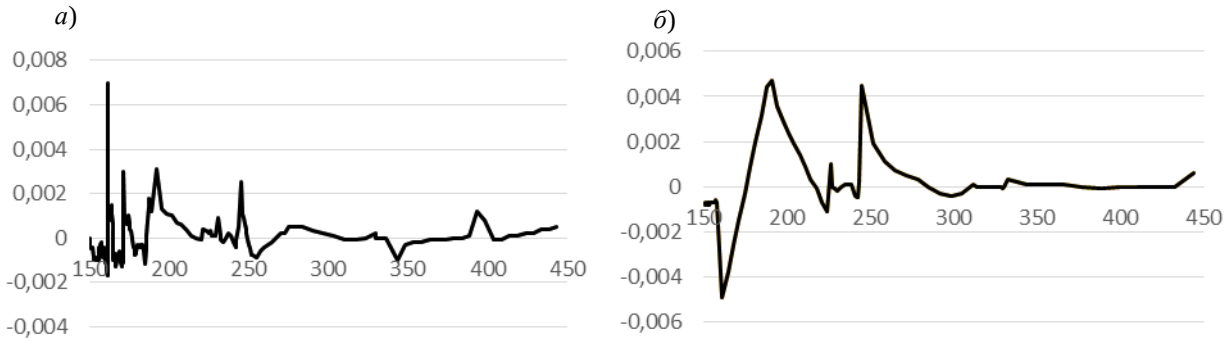



Рисунок 3 – Мгновенные значения индекса *IRI* для существующей (*а*)
и проектной (*б*) конструкций продольного профиля сортировочной горки

Использование сплайнового метода анализа гладкости конструкции продольного профиля сортировочной горки с оценкой качества сопряжения ее элементов на основе подходов *IRI* обеспечивает исследователя достаточно достоверной информацией о влиянии неровностей конструкции продольного профиля на сопротивление скатыванию вагонов с сортировочной горки, позволяет сравнить проектные варианты для улучшения эксплуатационных качеств их конструкций и повышения безопасности сортировочного процесса.

УДК 656.225

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ВЫБОРА ОПЕРАТОРОМ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА РАЦИОНАЛЬНОГО МАРШРУТА СЛЕДОВАНИЯ ВАГОНОПОТОКОВ

*А. Н. СЛАДКЕВИЧ*
*Республиканское логистическое унитарное предприятие «БЕЛИНТЕРТРАНС», г. Минск*

*А. А. ЕРОФЕЕВ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В соответствии с [1] система организации вагонопотоков на железной дороге должна обеспечивать:

– организацию вагонопотоков в поезда на основе использования установленных экономических критериев и логистических принципов;

– минимизацию эксплуатационных расходов по продвижению вагонопотоков за счет выбора наиболее эффективного плана формирования поездов различных категорий и т. д.

Однако в настоящее время на полигоне Белорусской железной дороги значительную часть от общего парка вагонов занимают приватные вагоны, принадлежащие различным операторам подвижного состава. При этом отдельные операторы, например, Республиканское логистическое унитарное предприятие «БЕЛИНТЕРТРАНС», фактически выполняют функции перевозчиков, определяя систему организации вагонопотоков и направления их следования [2]. В отдельные периоды времени такие операторы подвижного состава могут сталкиваться с запретами на перевозки грузов по отдельным направлениям в связи с дефицитом пропускной способности по отдельным элементам инфраструктуры: техническим станциям, железнодорожным участкам и направлениям, пунктам перехода вагонов и т. п. Такие запреты могут иметь как краткосрочный (несколько дней), так и долгосрочный характер.

В таком случае возникает сложная эксплуатационная задача – спрогнозировать, в каком случае суммарные затраты на организацию перевозки будут меньше: если вагоны будут следовать по действующему плану формирования (кратчайшему маршруту следования) с последующими длительными простоями по отдельным объектам инфраструктуры или если направить эти вагоны по кружным маршрутам, предполагающим увеличение поездо-километров пробега, но сокращение оборота вагонов. При этом такая задача должна решаться в оперативных условиях с учетом складывающейся обстановки на железнодорожном полигоне и прогнозных заявляемых объемов перевозок на этот период.

Для решения данной задачи необходимо решить ряд локальных эксплуатационных задач.

*1 Определение наличной пропускной способности технических станций на основном и альтернативных направлениях следования вагонопотоков.*

Для станций и их сортировочных систем устанавливаются ограничения размеров переработки вагонов по плану формирования и поездов по графику движения, при которых станция (система) обеспечит высокую эксплуатационную надежность работы всех ее объектов.

Для транзитного без переработки поездопотока указанные ограничения характеризуются количеством транзитных поездов, определяемых по критерию их беспрепятственного приема станцией. Для транзитного с переработкой поездопотока ограничения характеризуются вагонопотоком, поступающим в переработку за сутки, в зависимости от количества назначений формируемых поездов и от количества маневровых локомотивов, занятых на расформировании-формировании поездов (на горке и на вытяжных путях).

Например, максимальный размер вагонопотока, поступающего в парк прибытия, может быть определен исходя из условия

$$\Pi_{\text{сущ}}^{\text{ПП}} \geq \Pi_{\text{расч}}^{\text{ПП}}, \tag{1}$$

где $\Pi_{\text{сущ}}^{\text{ПП}}$ – существующее количество путей; $\Pi_{\text{расч}}^{\text{ПП}}$ – расчетное количество путей.

Расчетное количество путей в парке прибытия определяется из условия, что вероятность задержки поездов по неприему станцией не превышает заданной величины:

$$\Pi_{\text{расч}}^{\text{ПП}} = \frac{T_{\text{зан}}^{\text{пп}}}{I_{\text{г}}} - \frac{T_{\text{к}}}{I_{\text{г}}} + \bar{r}_{\text{пер}} T_{\text{к}} + u\sigma, \tag{2}$$

где $T_{\text{зан}}^{\text{пп}}$ – технологическое время занятия пути поездом; $I_{\text{г}}$ – горочный технологический интервал; $T_{\text{к}}$ – период наибольшего сгущенного поступления поездов в парк прибытия, в течение которого возникают наибольшие простои; $r_{\text{пер}}$ – плотность потока перерабатываемых поездов; σ – среднее квадратическое отклонение количества поступающих в подсистему поездов за время $T_{\text{к}}$.

Аналогичные расчеты должны быть выполнены по всем подсистемам станций, входящих в маршруты следования вагонопотоков.

Основной проблемой решения данной задачи является сложность установления как прогнозной загрузки объектов инфраструктуры, так и фактического их состояния. Это связано с тем, что в отдельные периоды времени могут выполняться строительные и ремонтные работы, организовываться приоритетный пропуск отдельных категорий вагонопотоков, возникать временный дефицит в тяговых перевозочных ресурсах и т. д.

*2 Расчет нормативов по железнодорожным участкам для оценки маршрута следования вагонопотоков.*

При расчете используются следующие измерители:

– временные (вагоно-часы, локомотиво-часы поездной работы и бригадо-часы локомотивных бригад);

– пробежные (вагоно-километры, поездо-километры, локомотиво-километры, тонно-километры брутто вагонов и локомотивов);

– энергетические (тонно-километры механической работы, расход топлива, киловатт-часы электроэнергии).

При определении величины измерителей по железнодорожным участкам учитываются следующие основные факторы: размеры движения, число главных путей, профиль пути, вид и кратность тяги, серия локомотива, нормы веса и длины поездов, участковая скорость движения, время оборота локомотивов по элементам, время работы локомотивных бригад и другое.

Очевидно, что в течение года фактические значения измерителей могут существенно отличаться от заложенных в план формирования поездов нормативных измерителей: существенно изменяются размеры движения грузовых и пассажирских поездов, меняется тип графика, на отдельных электрифицированных линиях тяговое обслуживание может быть организовано на тепловозной тяге и др.

*3 Распределение вагонопотоков между железнодорожными направлениями и выбор маршрута следования.*

Решение данной задачи в настоящее время выполняется при гипотезе о постоянном техническом состоянии и с учетом ограничений загрузки железнодорожных участков, норм участковой скорости. Порядок решения задачи выбора маршрута следования вагонопотока на полигоне железной дороги:

– установление расчетного полигона на железной дороге;

– построение картосхем эксплуатационных расходов;

– формирование вариантов направления следования вагонопотоков;

– построение динамической карты следования вагонопотоков по вариантам, определение расстояния и среднесуточных потоков вагонов и поездов, следующих по участкам и техническим станциям;

– расчет по вариантам натуральных показателей;

– расчет по каждому из сравниваемых вариантов эксплуатационных расходов;

– выбор маршрута следования вагонопотоков исходя их минимума эксплуатационных затрат;

В общем виде расходы на передвижение рассматриваемого вагонопотока по каждому $i$-му параллельному железнодорожному направлению

$$E_i = n_{pq}\left(\sum_{i=1}^{k_у} E_{учi} + \sum_{i=1}^{s} E_{стi}\right) + \sum_{i=1}^{k_о} E_{одi}\ , \qquad (3)$$

где $n_{pq}$ – величина рассматриваемого вагонопотока, ваг./сут; $\sum_{i=1}^{k_у} E_{учi}$ – сумма эксплуатационных расходов, зависящих от размеров движения, на передвижение вагона по всем $k_у$-м участкам рассматриваемого направления, руб./ваг.; $\sum_{i=1}^{s} E_{стi}$ – расходы на попутных $s$-х технических станциях, руб./ваг.; $\sum_{i=1}^{k_о} E_{одi}$ – расходы, связанные с одиночным следованием поездных локомотивов по участкам $k_о$, где изменяются размеры грузового движения, руб./сут.

Дополнительно учитываются затраты по начальным и конечным станциям сравниваемых направлений, так как различные маршруты предполагают отличие в установленных нормах массы и длины поездов.

В данной работе обозначены только основные эксплуатационные проблемы. Очевидно, что задача выбора оператором подвижного состава рационального маршрута следования вагонопотоков является гораздо более сложной и для ее решения необходима разработка как отдельных новых методов и методик расчетов, так и новых информационно-управляющих систем, в том числе с использованием технологий искусственного интеллекта.

**Список литературы**

1 Методические рекомендации по организации вагонопотоков на Белорусской железной дороге: утв. приказом первого заместителя Начальника Бел. ж. д. 30.12.2013 № 772 НЗ. – Минск, 2014. – 324 с.

2 **Сладкевич, А. Н.** Совершенствование поездных сервисов на трансъевразийских маршрутах на основе инновационных решений в области организации перевозочного процесса // Тихомировские чтения: Технологические модели и развитие систем принятия решений в перевозочном процессе : материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : БелГУТ, Гомель, 24–25 окт. 2024 г. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп.; под общ. ред. А. А. Ерофеева, 2025. – С. 12–17.

УДК 656.2

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ ГОРОЧНЫХ ТОРМОЗНЫХ БАШМАКОВ. АКТУАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

*В. М. ФЕДИН, К. А. ЧЕРНЫШЕВ, А. Ю. СИДОРОВ*
*Институт управления и цифровых технологий*
*Российского университета транспорта (МИИТ), г. Москва*

В 1857 году в Германии впервые создан ручной тормозной башмак, который первоначально использовался только для остановки и закрепления транспортных средств на стоянках [1]. Данное устройство отличалось компактностью, универсальностью, эффективностью, что позволило впоследствии получить широчайшее распространение на всех железных дорогах мира. При использовании тормозной башмак укладывали на рельс перед движущимися вагонами. В результате наезда колесной пары на тормозной башмак, оказывалось значительное тормозное воздействие. Применение такого типа устройств на немеханизированных сортировочных горках позволяло осуществлять регулирование скорости движения отцепов, а в подгорочных парках они использовались и для закрепления вагонов. Тормозной эффект основан на замене трения качения вагона трением скольжения башмака по рельсу и второго колеса заторможенной колесной пары по другому рельсу [2]. Од-

ним из таких башмаков, который позднее стал применяться и в России, был немецкий башмак системы Бюссинга (одно- и двубортный). Хорошо зарекомендовали себя также башмаки системы Ширенко.

С 1900 года башмаки стали широко применять для регулирования скорости движения отцепов на сортировочных горках после изобретения башмакосбрасывателя [1]. Это позволило регулировать скорость скатывающихся отцепов башмаками без полной остановки, а также существенно повысило надежность регулирования скорости движения вагонов. В 1969 г. производство нескольких видов башмаков и разделение их на горочные и стояночные было прекращено. Новый башмак 1969 г. проектировался как горочный, но стал использоваться также и как стояночный, для закрепления составов на стоянках. В данном башмаке изменилась конструкция колодки, колодка стала отливаться как единое целое с накладкой. Отверстия в полозе выполнялись при штамповке. Материал полоза был изменен со стали Ст3 на Ст4пс или Ст4сп, материал колодки со стали 15Л1 на сталь 40Л1 или 45Л1 [3]. В настоящее время наиболее распространенной является сборная металлическая конструкция башмака, состоящая из полоза толщиной 6–8 мм и колодки высотой 120–125 мм, соединенной с полозом двумя заклепками [2].

К началу 2010-х годов эксплуатируемые в России модели башмаков имели ряд существенных недостатков, приводящих к их частому выходу из строя: разгиб бортов, отрыв носка, коробление полоза. Это обусловливало высокие эксплуатационные расходы и снижало общую безопасность сортировочного процесса. В наши дни тормозной горочный башмак применяется на железнодорожных путях в России для регулирования скорости отцепов и закрепления подвижного состава на станционных путях [4]. В современной практике применяются два основных типа тормозных башмаков, что закреплено в соответствующей технической документации ОАО «РЖД»: башмаки для закрепления вагонов (ручные) и башмаки для регулирования скорости (механизированные и автоматические) [5].

Ручной тип используется для предотвращения самопроизвольного ухода вагонов и составов на станционных путях, депо и пунктах технического обслуживания, а также используются на немеханизированных сортировочных горках. Так как значительное количество сортировочных горок на сети дорог России, особенно на промышленных предприятиях и станциях регионального значения, являются немеханизированными или частично механизированными, здесь применение горочных башмаков имеет свою специфику и является основным, а зачастую и единственным средством торможения отцепов. На таких горках весь процесс торможения осуществляется вручную. Работники (регулировщики скорости) располагаются на определенных точках спуска – в зонах расчетного торможения. Их задача – своевременно набросить башмак на колесную пару движущегося отцепа, ориентируясь на его массу и скорость. После прохода отцепа башмак снимается и используется повторно. Ключевыми проблемами эксплуатации в этих условиях являются: высокие физические нагрузки и травмоопасность: процесс требует от работника высокой квалификации, внимания и физической силы.

Именно для условий немеханизированных горок разработка ОАО «ВНИИЖТ» 2015 года имела особое значение, так как повышенная прочность и износостойкость новых конструкций напрямую влияли на безопасность труда и снижение эксплуатационных расходов. Как отмечают исследователи, было несколько ключевых направлений доработки конструкции [5]. Усиление наиболее нагруженных элементов (носка и бортов) за счет оптимизации геометрии и применения более рациональных схем распределения металла, а также совершенствование технологии изготовления, в частности, методов термической обработки, для повышения износостойкости и ударной вязкости материала.

Проведенные на экспериментальной базе ВНИИЖТ испытания подтвердили эффективность принятых решений. Модернизированные образцы показали значительное снижение количества критических дефектов. Так, было установлено, что изменения в конструкции позволили сократить количество таких дефектов, как разгиб бортов, отрыв носка, коробление полоза, и увеличить срок службы башмаков в 1,3–1,5 раза по сравнению с серийными образцами предыдущего поколения [5]. Внедрение башмаков повышенной работоспособности позволяет не только снизить прямые затраты на приобретение запасных частей, но и минимизировать риски схода подвижного состава из-за разрушения тормозного устройства, тем самым повышая уровень безопасности сортировочных работ [6].

Несмотря на регистрацию первого патента на тормозной башмак еще в 1857 г. [1], разработка его идеальной и надежной конструкции остается актуальной. Проведенные в РУТ (МИИТ) работы

по модернизации тормозного башмака, включающие оптимизацию химического состава стали и новую технологию закалки, подтвердили свою высокую эффективность в ходе промышленных испытаний [6]. Основным результатом стало трехкратное превышение работоспособности опытного образца (239048,6 против 78196,1 т), что обеспечивает снижение сходов подвижного состава, кратное увеличение срока службы и устранение эффекта «схватывания» с рельсом. Указанное достижение задало новые стандарты надежности, сохраняющие актуальность для ОАО «РЖД» и по сей день.

**Список литературы**


1 Железнодорожные тормозные горочные башмаки: история и перспективы / С. А. Сапожников, Д. П. Марков, Ж. Г. Воробьёва [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. – 2014. – № 5. – С. 38–43.

2 **Антонов, А. Н.** Устройство и оборудование сортировочных горок : учеб. пособие / А. Н. Антонов, В. А. Лукьянов. – Магнитогорск, 2016. – 50 с.

3 Марка стали для тормозных башмаков. – URL: https://obuv.comp-lenta.ru/marka-stali-dlya-tormoznykh-bashmakov/ (дата обращения: 09.09.2025).

4 Технические средства обеспечения безопасности на железнодорожном транспорте. – URL: https://fgosonline.ru/wp-content/uploads/2025/01/konspekt-lekczij-nesvetova-tipografiya.pdf (дата обращения: 09.09.2025).

5 Расширенные эксплуатационные испытания железнодорожных тормозных горочных башмаков новой конструкции / М. В. Забавина, Д. П. Марков, С. А. Сапожников [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. – 2015. – № 5. – С. 33–38.

6 Повышение экономической эффективности сортировочной работы на сортировочных горках с немеханизированной парковой позицией / В. М. Федин, К. А. Чернышев, С. П. Вакуленко, О. И. Коровкина // Экономика железных дорог. – 2023. – С. 45–52.


УДК 625.8

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В МИРНОЕ И ВОЕННОЕ ВРЕМЯ


*А. И. ФЁДОРОВ, Ю. А. НИКОНЧУК*

*Военная академия Республики Беларусь, г. Минск*


Транспортная инфраструктура является «кровеносной системой» современного государства, основой его экономической стабильности, социального благополучия и обороноспособности. Она включает в себя комплекс объектов и систем: автомобильные и железные дороги, мосты, туннели, аэропорты, морские и речные порты, железнодорожные вокзалы, станции метрополитена, логистические центры и системы управления движением.

Значение обеспечения безопасности транспортной инфраструктуры сегодня невозможно переоценить. В условиях роста глобализации, урбанизации и увеличения интенсивности транспортных потоков эта инфраструктура становится высокоуязвимой для различных видов угроз.

К ним относятся:

– техногенные аварии (износ фондов, человеческий фактор, технологические сбои);

– природные катастрофы (наводнения, землетрясения, оползни);

– умышленные противоправные действия (террористические акты, вандализм, кибератаки на системы управления).

Любой сбой, повреждение или разрушение ключевого транспортного узла способны парализовать работу целых регионов, нанести колоссальный экономический ущерб, привести к массовой гибели людей и спровоцировать серьезные социально-политические последствия. Поэтому вопросы защиты, устойчивости и живучести транспортной системы выходят на первый план в национальных стратегиях безопасности большинства стран мира.

Рассмотрим один из объектов транспортной инфраструктуры – мосты. Мосты, как железнодорожные, так и автомобильные являются критически важными объектами транспортной инфраструктуры в любой стране. Их состояние и функционирование весьма важно для экономики и логистики государства. В условиях любых конфликтов обеспечение безопасности и сохранности такой инфраструктуры является одной из ключевых задач для соответствующих государственных служб. К сожалению, в настоящее время мосты через небольшие реки не имеют практически никакой охраны и средств защиты.

В общем плане можно отметить, что защита критической инфраструктуры, в частности мостов, является комплексной задачей. Она может включать в себя, помимо прочего:

– организационные меры: усиление охраны, введение особых режимов доступа;

– технические средства: системы видеонаблюдения, датчики движения, средства противодействия;

– радиоэлектронные средства: подавление каналов связи и навигации беспилотных летательных аппаратов (далее – БЛА).

Решение о применении конкретных видов техники, включая постановщики помех, их типы, дислокацию и тактику использования, относится к исключительной компетенции органов, отвечающих за оборону и безопасность, и основываются на оперативной обстановке.

Рассмотрим один из вариантов защиты мостов, а именно от использования БЛА. Основная цель защиты – создание «умного» защитного периметра вокруг критического объекта, который обнаруживает, идентифицирует, нейтрализует нарушителя и фиксирует инцидент для последующего разбирательства с правоохранительными органами.

1 Обнаружение и идентификация.

Для этого осуществляется радиочастотный мониторинг: сканируется эфир на предмет стандартных частот управления и передачи видеосигналов в диапазоне 2,4–5,8 ГГц. Это позволяет обнаружить БЛА и определить направление на оператора. Обнаружение БЛА в радиочастотном диапазоне может осуществляться малогабаритными радарами. Они эффективны для обнаружения на дальней дистанции в любых погодных условиях, особенно малозаметных и не передающих радиосигнал (запрограммированных на автономный полет).

Обнаружение БЛА в оптическом диапазоне длин волн может осуществляться оптическими средствами, работающими в видимом и ИК-диапазонах. Элементы искусственного интеллекта в современных системах способны отличать птиц от дронов. В ночных условиях хорошо себя зарекомендовали тепловизионные камеры.

Кроме радиолокационных и оптических обнаружителей могут использоваться акустические датчики, которые способны распознать уникальный звуковой «отпечаток» двигателей мультикоптеров.

2 Нейтрализация.

После точного определения параметров движения цели и ее легитимности (проверка, не является ли цель, например, служебным дроном правоохранителей) могут быть применены как пассивные так и активные средства нейтрализации. К ним можно отнести постановку помех, перехват сигнала, физическое уничтожение дрона.

Постановка помех осуществляется путем генерации мощного сигнала на частотах управления, GPS/ГЛОНАСС и передачи видео. Результат воздействия помех – дрон теряет управление и связь с оператором. Современные системы не «глушат» все частоты вокруг, а воздействуют только на конкретный выявленный дрон, минимизируя влияние на окружающую связь (в том числе и на свои сотовые сети, Wi-Fi). Для постановки помех личный состав охраны может использовать переносные комплексы для точечного применения.

Перехват сигнала является более технологическим решением. При этом сигнал управления не глушат, а подменяют его своим сигналом. Система «обманывает» дрон, отправляя ему ложные команды (например, приказание сесть рядом с охраной) или ложные координаты GPS.

Для физического уничтожения БЛА в зависимости от важности моста могут быть использованы различные огневые средства (стрелковое оружие, зенитные установки ЗУ-23-2 или ЗПУ-4, переносные зенитные ракетные комплексы, огневые роботизированные комплексы, лазерные системы уничтожения БЛА).

3 Документирование и анализ.

Эта функция осуществляется с целью возможного определения типа и направления появления БЛА или координат его взлета. Эти данные передаются в правоохранительные органы для оперативного поиска и привлечения виновных к ответственности по статьям о нарушении работы транспорта или хулиганстве.

Для практической реализации защиты моста необходимо:

– определить наряд сил и технических средств для охраны моста с учетом его важности;

– определить наиболее вероятные маршруты полета БЛА для нанесения удара;

– организовать патрулирование сил охраны и их взаимодействие с силовыми органами;

– обучить личный состав правилам охраны и правилам пользования техническими средствами охраны.

Тренировки войск территориальной обороны в последнее время касаются и вопросов охраны и обороны мостов от диверсионно-разведывательных групп и БЛА.

Таким образом, защита мостов от ударов БЛА в современных условиях является актуальной задачей, которая предусматривает комплексный подход к ее решению. Ее реализация позволит минимизировать риск уничтожения объектов транспортной инфраструктуры и улучшить безопасность транспортных путей.

УДК 656.212.4.001.2

## БЕЗОПАСНОСТЬ МАНЕВРОВОЙ РАБОТЫ В СТРЕЛОЧНЫХ ГОРЛОВИНАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ

*Е. А. ФИЛАТОВ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В конструкциях стрелочных горловин станций Белорусской железной дороги, как правило, применяются стандартные или близкие к ним элементы путевого развития (прямые вставки, кривые, стрелочные переводы). Однако применение действующих норм проектирования не всегда гарантирует безопасность маневров с подвижным составом, особенно увеличенных размеров [1–3]. Устойчивый тренд увеличения доли длиннобазных вагонов на сортировочных горках приводит к необходимости актуализации требований к технологии маневровой работы. Для оценки безопасности конструкции стрелочных горловин разработан комплексный критерий технической совместимости подвижного состава и путевого развития, который предусматривает в первую очередь ограничения по возможности автоматического сцепления [5]. Поэтому при выполнении маневров со сцеплением вагонов увеличенных размеров в стрелочных горловинах требуется выполнять контроль взаимодействия автосцепок причастными работниками [4], что снижает риски ненормативного взаимодействия подвижного состава. Если же на станции реализован высокий уровень контроля процесса сцепления, то комплексный критерий следует применять к условию обеспечения движения вагонов в сцепе [6].

Следует отметить, что при маневровой работе стандартная автосцепка в зависимости от условий движения и параметров пути может занимать четыре основных положения: с перекосом или без перекоса тягового хомута, в нормальном или заглубленном положениях автосцепки [7]. Согласно исследованиям [8] для оценки эффективного и безопасного прохода кривых целесообразно определять возможность поворота корпуса автосцепки до совмещения центра его зацепления с осью пути без силового взаимодействия в конструкции автосцепного механизма.

При проектировании ударно-тяговых устройств нормируется в первую очередь возможный угол отклонения корпуса автосцепки α, который зависит от кривизны участка пути и типа выполняемых маневров (для стандартной автосцепки СА-3 угол α изменяется в пределах от 5°20' до 12°17' [9]). Условие определения допустимой величины радиуса кривой имеет следующий вид [7]:

$$R_{\text{ДС}} \geq \frac{n(2l+n)-l_{\text{т}}^2}{2a \cdot \text{tg}\,\alpha},$$

где $n$ – длина консоли от пятникового сечения вагона до оси автосцепки, мм; $2l$ – длина базы вагона, мм; $2l_{\text{т}}$ – длина базы тележки, мм; $a$ – расстояние от оси поворота до центра зацепления, мм.

Произведем расчет минимальной величины радиуса кривой, обеспечивающий отсутствие силового взаимодействия узлов автосцепки при движении группы сцепленных длиннобазных фитинговых платформ модели 13-9570 при нормальном положении автосцепки без перекоса и выполнении маневров локомотивом вперед ($\alpha_{\text{н}} = 8°$ [9]),

$$R_{\text{ДС}}^{\min} = (3595(18500+3595)-925^2)/(2 \cdot 870 \cdot \text{tg}8) = 321320\ \text{мм} = 322\ \text{м}.$$

Полученная величина существенно превышает радиусы кривых участков путей и переводных кривых стрелочных переводов марок 1/6 и 1/9 (200 м), широко применяемых в горловинах станций. Данная ситуация еще больше усугубляется при движении с заглубленным положением хвостовика (при маневрах вагонами вперед $\alpha_н$ = 5°20'). Движение в сцепе при таких условиях происходит со значительным превышением допустимых горизонтальных отклонений автосцепки, а некомпенсированные механизмом ударно-тягового устройства боковые силы передаются на кузов вагона, стремясь изменить его положение, что в свою очередь вызывает пропорциональные нагрузки в зоне контакта «колесо – рельс». Это приводит к повышенному износу элементов конструкции автосцепки: в контуре зацепления, зоне контакта корпуса автосцепки и окна ударной розетки, месте шарнирного соединения хвостовика с клином тягового хомута (большая часть всех повреждений) и др. В конечном итоге появляются соответствующие неисправности ударно-сцепного оборудования вагона. Кроме того, прижатие гребня колеса к головке рельса значительно повышает вероятность накатывания колеса на рельс, особенно при маневрах *осаживанием*, когда между локомотивом и основной (тяжелой) частью маневрового состава находятся *порожние длиннобазные вагоны*. Сжатие сцепа при таких обстоятельствах вызывает значительные силы, стремящиеся выдавить легкий вагон из колеи. Сочетание описанных условий (кривая небольшого радиуса, осаживание (проталкивание) порожним длиннобазным подвижным составом тяжелой группы вагонов, наличие обратного направлению маневров уклона) может приводить к выкатыванию сцепленных вагонов на рельсы с последующим сходом. Минимальные величины радиусов кривых, обеспечивающих безопасные условия движения в сцепе фитинговых платформ модели 13-9570, показаны в таблице 1.

*Таблица 1* – **Величины радиусов кривых, обеспечивающие техническую совместимость криволинейного участка пути и сцепленных вагонов модели 13-9570 при выполнении маневровых передвижений**

| Условия выполнения маневров (положение автосцепки) | | Наибольший угол отклонения автосцепки СА-3 γ | Минимальная величина радиуса, м |
|---|---|---|---|
| В кривой (с перекосом до упора в угольник) | локомотивом вперед (нормальное) | 12°17' | 208 |
| | вагонами вперед (заглубленное) | 9°30' | 270 |
| На прямой (без перекоса) | локомотивом вперед (нормальное) | 8° | 322 |
| | вагонами вперед (заглубленное) | 5°20' | 484 |

Как видно из таблицы 1, при движении локомотивом вперед хвостовик автосцепки устанавливается в заглубленное положение, что значительно снижает гибкость автосцепного механизма ($R_{min}$ = = 484 м) и пропорционально повышает нагрузку на него. Поэтому при маневровой работе с вагонами увеличенных размеров в стрелочных горловинах необходимо избегать выполнения маневровой работы с осаживанием длиннобазных вагонов в стрелочной зоне и закрестовинных кривых. Иначе существенно повышается вероятность возникновения неисправностей элементов подвижного состава и пути, возникает риск схода вагонов.

Произведенные расчеты подтверждают, что движение вагонов ряда моделей увеличенных размеров в сцепе по кривым с радиусами 200 м может быть обеспечено только в нормальном положении автосцепки с предельным перекосом хвостовика (см. таблицу 1). Учитывая, что существующие горловины железнодорожных станций запроектированы с применением кривых, в том числе переводных радиусов 200 м, то выполнение маневров с осаживанием на заполненные пути групп порожних вагонов увеличенных размеров в этих зонах должно быть ограничено.

**Список литературы**

1 **Филатов, Е. А.** Безопасность маневровой работы в стрелочных зонах железнодорожных станций / Е. А. Филатов // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии : сб. науч. статей / М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск : БНТУ, 2024. – С. 45–52.

2 **Филатов, Е. А.** Адаптация требований к стрелочным горловинам улучшенных эксплуатационных качеств для практического использования / Е. А. Филатов // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. (Гомель, 24–25 нояб. 2022 г.) : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж.д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2022. – С. 74–76.

3 **Филатов, Е. А.** Расчет параметров путевых структур железнодорожных станций по критерию безопасности / Е. А. Филатов // Транспортные системы и технологии перевозок : сб. науч. работ Днепропетр. нац. ун-та ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна. – Днепр : ДНУЖТ, 2017. – Вып. 14. – С. 86–94.

4 Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М. : ГосНИИВ, ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.

5 **Филатов, Е. А.** Обоснование параметров стрелочных горловин для обеспечения технической совместимости с подвижным составом / Е. А. Филатов // Проблемы безопасности на транспорте : материалы X Междунар. науч.-практ. конф. (Гомель, 26–27 ноября 2020 г.) : в 5 ч. Ч. 3 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2020. – С. 70–72.

6 ГОСТ 22235–2010. Вагоны грузовые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие требования по обеспечению сохранности при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ. – М. : Стандартинформ, 2011. – 19 с.

7 **Филатов, Е. А**. Обоснование технической совместимости горловин железнодорожных станций и подвижного состава / Е. А. Филатов // Транспортные системы и технологии перевозок : сб. науч. работ Днепропетр. нац. ун-та ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна. – Днепр : ДНУЖТ, 2020. – Вып. 19. – С. 25–36.

8 Вагоны. Основы конструирования и экспертизы технических решений : учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / А. П. Азовский, Е. В. Александров, В. В. Кобищанов [и др.] ; под ред. В. Н. Котуранова. – М. : Маршрут, 2005. – 490 с.

9 Динамика вагона : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, В. Д. Хусидов ; под ред. С. В. Вершинского. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1991. – 360 с.

УДК 656.078

# СЦЕНАРНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ГРУЗОВОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

*А. А. ХОРОШЕВИЧ*
*Белорусская железная дорога, г. Минск*
*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Развитие рынка грузовых железнодорожных перевозок на современном этапе во многом обуславливается внутренними и внешними трансформациями, происходящими в результате существенного изменения экономических и геополитических условий, а также сложившимися глобальными тенденциями. В условиях быстро меняющейся конъюнктуры мировых рынков под действием западных санкций и ответных контрсанкций полностью изменился привычный ритм внешнеэкономической деятельности, в результате чего произошел разрыв ряда логистических цепочек между производителями товаров/сырья и покупателями. Разрушение цепочек поставок, нарабатываемых годами, напрямую повлияло на организацию грузовых железнодорожных перевозок. Одновременно произошла трансформация финансовых потоков и усложнение цепочек, формируемых для получения оплаты за оказанные услуги [1].

Наблюдаемая нестабильность внешней среды грузовых перевозок, обуславливающая существенный рост рисковой составляющей функционирования железнодорожного транспорта, предусматривает необходимость рассмотрения перспектив его развития в границах нескольких альтернативных сценариев. В данном контексте экономическая безопасность грузовых железнодорожных перевозок может быть обеспечена за счет принятия во внимание всех факторов неопределенности и своевременного реагирования на них на основе комплекса мер, разработанных в результате применения сценарного планирования и имитационного моделирования (с учетом взаимной обусловленности текущих решений и последующих событий).

Сценарное планирование в классическом понимании предусматривает проведение анализа внешней и внутренней среды объекта управления на предмет наличия ключевых факторов влияния и их последующего комбинирования для создания альтернативных сценариев развития. Рассмотрение различных сценариев позволяет посредством многоступенчатого процесса обосновывать возможные направления развития и разрабатывать соответствующие стратегические меры реагирования. Выстроенная на основе сценарного анализа стратегия обладает высоким уровнем гибкости и адаптивности, что обеспечивает высокую конкурентоспособность в постоянно меняющихся условиях внешней среды.

Проецирование классического понимания сценарного подхода на область управления железнодорожным транспортом требует учета его специфических особенностей, включая:

– характер перевозочного процесса: динамичность средств железнодорожного транспорта, наличие ограниченного перечня мест доставки;

– существенную зависимость от установившихся взаимосвязей с иными железнодорожными администрациями (при осуществлении международных перевозок);

– структуру системы управления, включающую три ключевые области: организацию перевозок, подвижной состав и железнодорожную инфраструктуру.

Применение сценарного подхода в области управления грузовыми железнодорожными перевозками, учитывающее отмеченные особенности, в целом предусматривает последовательное прохождение пяти этапов.

На первом этапе использование сценарного планирования предполагает оценку условий внешней среды и возможных сценариев развития транспортно-логистического рынка. В данном контексте наиболее рациональным является рассмотрение научных и статистических исследований ученых и экономистов, специализирующихся на прогнозировании развития мирового рынка и национальных экономик, а также применение многочисленных методов анализа внутренней и внешней среды.

На втором этапе реализация сценарного планирования в области грузового железнодорожного транспорта предусматривает обоснование возможных сценариев развития на базе проработанного перечня факторов воздействия с последующим выбором наиболее вероятных из них. В данном контексте первоначально осуществляется формирование широкого перечня всех возможных изменений с их последующей систематизацией, выделением альтернатив и оценкой значимости. При этом важно подчеркнуть, что проработка сценариев должна осуществляться как при единичном влиянии факторов, так и при их возможном системном воздействии. Дополнительно при обосновании сценариев важен учет глобальных тенденций и особенностей государственного управления. Результатом данного этапа является формирование полного перечня возможных альтернатив и списка наиболее вероятных из них, требующих разработки мер реагирования.

Третий этап подразумевает оценку направленности и уровня влияния изменений на экономическую безопасность грузового железнодорожного транспорта. С целью объективной оценки уровня влияния на данном этапе находят применение различные варианты количественной оценки, наиболее объективным из которых выступает имитационное моделирование.

Имитационное моделирование предусматривает разработку и применение программной системы, отражающей структуру и функционирование (поведение) моделируемого объекта или явления во времени. Основная цель имитационного моделирования состоит в том, чтобы описать поведение исследуемой модели (системы), ссылаясь на результаты статистического анализа. В данном случае создается имитационная модель – упрощенное представление существующей системы со всеми ключевыми взаимосвязями и особенностями, в рамках которого имеется возможность смоделировать поведение экономического субъекта в кризисной ситуации и оценить последствия реализации различных сценариев.

Применение имитационного моделирования в управлении на железнодорожном транспорте обеспечивает получение объективной прогнозной оценки количественных и качественных результатов его функционирования. Изменение входных параметров внешней и внутренней среды в рамках выстроенной имитационной модели железнодорожной организации позволяет оценивать результативность принимаемых управленческих решений в различных областях (трансформация логистических цепочек и маршрутов следования, изменение номенклатуры грузов, пересмотр основ тарифного регулирования и др.) в рамках заданных условий.

Четвертый этап предусматривает формирование мер реагирования, соответствующих выделенным сценариям. Наличие нескольких ключевых сценариев развития обуславливает необходимость соответствующего обоснования перечня мер по каждому из них. При этом в рамках формируемых сценариев, с учетом ограниченного перечня действенных мер, их состав может повторяться для различных условий внешней среды. Сформированные комплексы мер по каждому сценарию могут быть объединены в единый план, включающий наиболее вероятные и желаемые к реализации сценарии развития.

Пятый этап сценарного планирования в области управления грузовыми железнодорожными перевозками предусматривает реализацию сформированного комплекса мер реагирования, соответствующую фактически установившемуся сценарию, а также его корректировку при необходимости. При этом прохождение данного этапа не обуславливает завершение процесса сценарного планирования – предусматривает непрерывное прохождение выделенных этапов на протяжении всего жизненного цикла развития железнодорожной организации.

Систематизация отмеченного позволяет однозначно определить высокую актуальность использования инструментов сценарного планирования (в том числе имитационного моделирования) при обосновании перспектив развития грузового железнодорожного транспорта, обусловленную возможностью единовременного учета множества разнонаправленных факторов и проработки комплекса корректирующих мер, соответствующих любому варианту развития событий. Применение данного инструментария позволит сократить неопределенность и обеспечить рост эффективности и конкурентоспособности функционирования железнодорожного транспорта за счет заблаговременной оценки возможных последствий и своевременного реагирования на изменения условий внешней среды на основе разработанных вариантов развития, обеспечивающих экономическую безопасность.

**Список литературы**

1 **Хорошевич, А. А**. Актуальные вопросы выстраивания взаимоотношений белорусской железной дороги с иными участниками перевозочного процесса / А. А. Хорошевич // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2022. – № 2 (45). – С. 98–101.

УДК 347.4+341.1

# РЕГУЛЯТИВНАЯ И ОХРАНИТЕЛЬНАЯ ФУНКЦИИ ПРАВА ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОСТИ ТРАНСПОРТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

*О. А. ХОТЬКО, Н. М. ШЕВКО*
*Белорусский государственный университет, г. Минск*

Транспорт является одним из ведущих элементов обеспечения достойной жизни и свободного развития человека [1, с. 65]. По мере увеличения численности пользующихся сетями транспортных средств, числа их водителей и пассажиров, а также в связи с ростом объемов внутренней и международной торговли и грузовых перевозок задачи обеспечения безопасности дорожного движения во всём мире приобретают критически важное значение. В этой связи роль права в области регулирования транспортной деятельности велика. Именно право определяет направления деятельности государства в области поступательного социально-экономического развития, выступая нормативным регулятором общественных отношений между субъектами транспортной деятельности, в том числе в условиях укрепления интеграционных процессов. Кроме того, важное значение для развития науки и всесторонних преобразований государства имеют глубокие междисциплинарные связи, которые складываются на стыке нескольких областей знания, прежде всего экономики и права. Транспорт является не только отраслью экономики, связанной с перемещением пассажиров, грузов и багажа, но и сложным комплексом, являющимся основой формирования общего рынка транспортных услуг Евразийского экономического союза, развития сфер образования, здравоохранения, обеспечения экологической безопасности. Учитывая развитие новейших видов транспорта, в настоящее время все более актуальной и приоритетной становится задача обеспечения безопасности транспортной деятельности с позиции права. В нормах права акцент следует делать именно на устойчивое транспортное развитие в свете того, что укрепление интеграции в сфере транспорта рассматривается в качестве механизма обеспечения устойчивого развития, возрастает роль цифровых технологий в углублении интеграционных процессов, вследствие этого важно как внедрять цифровые технологии, так и развивать инфраструктуру, международные транспортные коридоры в целях реализации мер по поддержанию устойчивого транспортного сообщения, формирования новой парадигмы перевозок при взаимодействии ЕАЭС, СНГ, ШОС и цифровой трансформации транспорта.

Общеметодологической основой правового регулирования транспортных отношений является доктрина устойчивого развития. Устойчивое развитие транспортной системы – это такое развитие, которое обеспечивает доступность удовлетворения услуг, их качество и безопасность, а также состояние защищенности окружающей среды. Кроме того, прямое включение вопросов, связанных с транспортом (в частности, транспортная доступность и безопасность) в Повестку дня в области

устойчивого развития на период до 2030 года (далее – Повестка 2030 г.) свидетельствует о значимости транспорта в достижении безопасности. В частности, Цель 3.6 предполагает снижение смертности и травматизма в результате дорожно-транспортных происшествий, а Цель 11.2 направлена на обеспечение доступа к безопасным, недорогим, доступным и устойчивым транспортным системам для всех благодаря повышению безопасности дорожного движения, в том числе за счет расширения сети общественного транспорта. При этом особое внимание уделяется потребностям лиц, находящихся в уязвимом положении: женщин, детей, инвалидов и пожилых людей.

На сегодняшний день транспортное право не выделяется в качестве самостоятельной отрасли права. Однако стоит обратить внимание на существенное значение правовых подходов, недостаточный учет которых может привести к серьезным упущениям развития транспортной отрасли, однако вносящих неоспоримый вклад при принятии решений органами государственного управления и получения нового освещения в теоретических изысканиях в праве. Так, в белорусской науке д-р. техн. наук, профессор Д. В. Капский заложил фундамент развития такой отрасли, как транспортное право, благодаря которому и развиваются положения в юридической науке, расширяются знания правового характера в сфере организации дорожного движения, транспортного планирования, мобильности и устойчивого развития транспортных систем [2, 3]. В свою очередь правоведы не оставляют идеи развития регулирования права соответствующей сферы отношений, что отражается в совместных и единоличных публикациях методического и научного характера [4, 5].

К функциям права относят гносеологическую, сравнительного анализа, обобщения и иные, включающие направления воздействия на общественные отношения, предназначение которых заключается в регулировании сфер деятельности и их охране. Поэтому регулятивная и охранительная функции взаимосвязаны. От качества нормотворческой деятельности зависит эффективность регулятивной функции. Отметим, что законодательство Республики Беларусь в сфере транспортной безопасности не является системным, оно должно охватывать комплекс вопросов, включая применение новых видов транспорта. Неотъемлемым элементом данной деятельности в первую очередь является нейтрализация угроз транспортной безопасности и применение правовых средств, снижающих вредное воздействие на окружающую среду. Однако одной из проблем на современном этапе развития соответствующих отношений также является недостаточное внимание в законодательстве использованию новых видов транспорта (например, беспилотного автомобильного транспорта) и транспортным технологиям, декарбонизации транспорта. Одной из первоочередных задач в совершенствовании регулирования транспортных правоотношений в контексте обеспечения прав и свобод граждан является уточнение принципов транспортной деятельности с позиции и системности правового регулирования, согласованности проводимой правовой политики, что будет отвечать ст.ст. 8, 30, 55 Конституции Республики Беларусь. В этой связи предлагается использовать регулятивные и охранительные правовые средства, а именно обязывания, запреты, условия, которые подлежат закреплению в транспортном законодательстве в качестве требований к использованию новейших видов транспорта [6]. Полагаем, данные функции будут полноценно реализованы при обеспечении законодательства эффективными правовыми нормами. Содержание охранительной функции включает также профилактику правонарушений, регулирование юридической ответственности, деятельность по осуществлению контроля за соблюдением транспортного законодательства и определяется непосредственно назначением права. Полагаем, что уточнение правовых норм, касающихся безопасности транспортной деятельности, является своевременным, поскольку отсутствует системный подход в нормах национального права, с учетом вызовов и угроз национальной безопасности, что важно для каждого и позволит гарантировать обеспечение защиты прав и свобод личности в соответствии с Конституцией Республики Беларусь.

**Список литературы**

1 **Комарова, В. В.** Конституционные основы транспортного права / В. В. Комарова, Г. Д. Садовникова, Н. Е. Таева. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/konstitutsionnye-osnovy-transportnogo-prava (дата обращения: 15.09.2025).

2 **Капский, Д. В.** Методология повышения качества дорожного движения / Д. В. Капский. – Минск : БНТУ, 2028. – 372 с.

3 **Капский, Д. В.** Транспорт в планировке городов Беларуси : учеб. пособие / Д. В. Капский. – Минск : БНТУ, 2023. – 571 с.

4 **Капский, Д. В.** Правовые основы транспортной деятельности : учеб. пособие / Д. В. Капский, О. А. Хотько. – Минск : Выш. шк., 2019. – 317 с.

5 **Хотько, О. А.** Перспективные направления транспортного права и обеспечение научной основы для правового регулирования транспортной деятельности / О. А. Хотько // Право в современном белорусском обществе / Нац. центр зако-

нодательства и правовых исследований Респ. Беларусь ; редкол. : Н. А. Карпович (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Колорград, 2024. – Вып. 19. – С. 435–448.

6 **Хотько, О. А.** Доктринальные подходы к регулированию отношений в сфере правового обеспечения транспортной безопасности в защиту интересов Российской Федерации и Республики Беларусь / О. А. Хотько // Транспортное право. – 2025. – № 1. – С. 6–11.

УДК 358.94

# ЗАЩИТА ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ – ОПЫТ СПЕЦИАЛЬНОЙ ВОЕННОЙ ОПЕРАЦИИ

*В. В. ЦЫБУЛЬКО*
*Военная академия Республики Беларусь, г. Минск*

Все элементы транспортной инфраструктуры (как железнодорожной, так и автомобильной) имеют одинаково важное значение для любого государства и в мирное, и в военное время. От их возможности выполнять свое функциональное предназначение зависит решение различных стратегических задач как отдельных отраслей экономики, так и безопасности всего государства в целом. Всё это подтверждают и ход специальной военной операции, проводимой Российской Федерацией в Украине, и ряд других локальных конфликтов.

Необходимо отметить, что высокую эффективность по поражению элементов транспортной инфраструктуры имеют средства воздушного нападения, в том числе относящиеся к ним беспилотные летательные аппараты. В условиях специальной военной операции наблюдается широкое применение беспилотных летательных аппаратов для разведки, целеуказания и нанесения ударов по наземным целям, включая мосты и дороги. При этом применяются как промышленные беспилотные летательные аппараты, так и дроны кустарного производства.

Использование беспилотных летательных аппаратов связано с рисками для критической инфраструктуры, такой как железные и автомобильные дороги, вокзалы и подвижной состав. При этом нехватка эффективных мер защиты может привести к угрозам как безопасности пассажиров, так и работоспособности самой инфраструктуры в целом. Поэтому быстрое обнаружение беспилотных летательных аппаратов, в первую очередь над транспортными узлами, является важной задачей. Ну а последующей не менее важной задачей становится нейтрализация беспилотных летательных аппаратов или снижение эффективности их применения.

Так, на крупных вокзалах внедряются комплексные системы, которые включают в себя радары, камеры наблюдения и электронные подавители. Они успешно применяются в странах с высокими стандартами безопасности, где угрозы беспилотных летательных аппаратов тщательно анализируются и своевременно нейтрализуются [1].

Говоря о решении первой важнейшей задачи – обнаружения беспилотных летательных аппаратов – можно рассматривать следующие варианты ее решения.

Первое – радиолокационное обнаружение и сопровождение. Для предотвращения проникновения беспилотных летательных аппаратов на объекты транспортной инфраструктуры используются радары. Они позволяют обнаружить малые объекты на расстоянии до нескольких километров. Эти системы фиксируют местоположение и траекторию движения аппарата, что помогает оперативно реагировать на угрозу, исходящую от беспилотных летательных аппаратов.

Второе – оптические системы наблюдения и визуальное обнаружение. Камеры высокого разрешения и тепловизоры применяются для визуальной идентификации летательного аппарата. Они эффективны в условиях ограниченной видимости и ночью обеспечивают точное отслеживание целей.

Пути решения второй важнейшей задачи (нейтрализация, уничтожение и защита от воздействия беспилотных летательных аппаратов) по опыту специальной военной операции и других локальных конфликтов видятся следующие.

Первое – физическая защита:

– укрытие – создание укрытий для мостов и дорог, например, подпорные стенки, насыпи, тунели, которые могут поглотить или рассеять энергию взрыва;

– заграждения – установка заграждений, препятствующих прямому попаданию беспилотных летательных аппаратов в цель, например, сетки, барьеры, а также противотанковые заграждения;

– усиление конструкций – усиление мостов и дорог, чтобы повысить их устойчивость к взрывам и повреждениям, например, использование армированного бетона или специальных материалов.

Второе – скрытие:

– маскировка – маскировка мостов и дорог, чтобы затруднить их обнаружение с воздуха, использование маскировочных сетей, покраска в цвета, соответствующие местности;

– дымовые завесы – создание дымовых завес, которые могут временно скрыть мосты и дороги от визуального наблюдения и наведения;

– ложные цели – размещение ложных целей, которые могут привлечь внимание беспилотных летательных аппаратов и отвлечь их от истинных объектов поражения.

Третье – радиоэлектронная борьба:

– радиочастотное подавление каналов управления – использование средств радиоэлектронной борьбы для подавления каналов управления беспилотного летательного аппарата, что может привести к потере связи с оператором и невозможности наведения беспилотного летательного аппарата на цель;

– постановка помех – создание помех в каналах навигации и позиционирования, что может сбить беспилотные летательные аппараты с курса и затруднить его навигацию;

– перехват сигналов – использование средств перехвата сигналов для выявления местоположения беспилотного летательного аппарата и его оператора для последующего их огневого уничтожения;

– электронная нейтрализация – электронные системы направлены на перехват управления беспилотным летательным аппаратом с помощью передачи фальшивых сигналов; «перехват управления» позволяет безопасно посадить аппарат без его повреждения.

Четвертое – уничтожение беспилотных летательных аппаратов:

– стрелковое и пушечное вооружение – уничтожение дронов с помощью гладкоствольного оружия, автоматов, пулеметов, включая крупнокалиберные, а также зенитных установок, в том числе и спаренных ЗУ-23-2 [2];

– зенитное ракетное вооружение – огневая составляющая, включающая мобильные, маневренные зенитные ракетные комплексы, различной дальности, а также переносные зенитные ракетные комплексы типа «Игла» и «Верба», способные поражать несколько десятков воздушных целей одновременно.

Методики защиты от беспилотных летательных аппаратов становятся важным элементом обеспечения безопасности железнодорожной и автомобильной инфраструктуры. Использование современных технологий, комплексирование различных способов противодействия беспилотным летательным аппаратом позволяет минимизировать риски, связанные с воздействием дронов. Реализация рассмотренных решений борьбы с беспилотными летательными аппаратами на объектах критической транспортной инфраструктуры является необходимым шагом к обеспечению ее безопасной эксплуатации.

**Список литературы**

1 Методики защиты железнодорожной инфраструктуры от беспилотных летательных аппаратов. – URL: http://scbist.com/blogs/babuler114/5163-metodiki-zaschity-zheleznodorozhnoi-infrastruktury-ot-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov.html (дата обращения: 09.07.2025).

2 **Степовой, Б.** Все над путем: воинов-железнодорожников начали обучать борьбе с дронами / Б. Степовой. – URL: https://iz.ru/1867228/bogdan-stepovoi/vse-nad-putem-voinov-zeleznodoroznikov-nacali-obucat-borbe-s-dronami (дата обращения: 09.07.2025).

УДК 656

## КРИТЕРИИ И ЛОКАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ В УПРАВЛЕНИИ ГРУЗОВОЙ И ПОЕЗДНОЙ РАБОТОЙ

*И. Н. ШАПКИН, АН. В. СУГОРОВСКИЙ, АРТ. В. СУГОРОВСКИЙ*
*Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва*

На железнодорожных магистралях большое значение придается надежности в управлении грузовыми и пассажирскими перевозками на всех уровнях. Одним из семи приоритетных направлений

научно-технического прогресса Российской Федерации, согласно Указу Президента, в рамках реализации национальных проектов, являются интеллектуальные транспортные системы [1]. Согласно Транспортной стратегии РФ к основным тенденциям развития транспортных систем в условиях исчерпания пропускной способности железнодорожных линий относятся повышение эффективности грузовых перевозок за счет внедрения инновационных технологических решений; увеличение уровня безопасности движения поездов при оптимизации регулирования потоков [2]. В долгосрочных и комплексных программах развития ОАО «РЖД» с целью повышения эффективности железнодорожных перевозок делается акцент на развитие сквозных цифровых технологий в управлении движением поездов [3, 4]. Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» определяет перечень научных и технологических задач для повышения эффективности работы железнодорожного транспорта, включающий исследование и разработку технологий, обеспечивающих перевозку грузов на основе качественных критериев всего спектра предоставляемых услуг и повышения уровня производительности [5].

Проблема выбора регулировочных мероприятий и определения оптимального критерия эффективности оперативных управленческих решений при организации железнодорожных перевозок является предметом многочисленных научных исследований ведущих ученых страны.

Разработаны меры, созданы методы и выполнены классификации диспетчерских регулировочных приемов на всех уровнях управления, включая применяемые на сетевом, полигонном, дорожном и линейном уровнях.

В настоящее время, на основе информации из наиболее авторитетных источников в области оперативного управления перевозочным процессом, сформированы три классификации диспетчерских регулировочных методов, в которых объединение в группы выполнено по следующим признакам: по принципу ближайшей цели, преследуемой при регулировании; объектам регулирования; территориальному признаку.

Для определения диспетчерского регулировочного воздействия на начальном этапе рекомендуется установить уровень и объект управления; затем собрать и проанализировать данные, выявить «узкие места» в эксплуатационной деятельности; сформулировать задачи по оптимизации; выбрать критерий эффективности и разработать управляющий диспетчерский прием; после этого довести инструкции до соответствующих исполнителей.

В соответствии с классификацией диспетчерских регулировочных методов, созданной на основе опыта применения управляющих воздействий на различных уровнях управления и в различных условиях организации эксплуатационной деятельности, выделены следующие группы, объединенные по принципу ближайшей цели, преследуемой при регулировании: на центральном уровне управления, включающем сеть и направления – сетевые; на полигонном уровне, охватывающем полигон и участки управления тяговыми ресурсами – полигонные; на региональном уровне, включающем дороги и районы управления – дорожные, а также внутриучастковые диспетчерские участки; на линейном уровне, включающем железнодорожные станции, выделяют внутристанционные диспетчерские приемы.

В зависимости от территориального объекта управления, задачи по оптимизации делятся на станционные и предназначенные для участков и направлений. В качестве примера такой задачи на линейном уровне – выбор путей и маршрутов приема поезда; на региональном уровне – определение очередности пропуска поездов перед предоставлением «окна». Для участков и направлений выделены 24 задачи по оптимизации, а для станций – 53.

Локальные показатели эффективности также определяются в зависимости от территориального объекта, то есть от того, где и на каком уровне управления осуществляется регулирование. На станциях для повышения эффективности выполнения поездной работы это может быть минимизация задержек поездов у входных светофоров, а также сокращение различных межоперационных простоев (рисунок 1).

Выбор управляющего воздействия осуществляется в зависимости от территориальной единицы управления, ситуации, возникшей на этом объекте, включая устранение «узких мест» в эксплуатационной деятельности, постановку задач по оптимизации и выбор критерия эффективности.

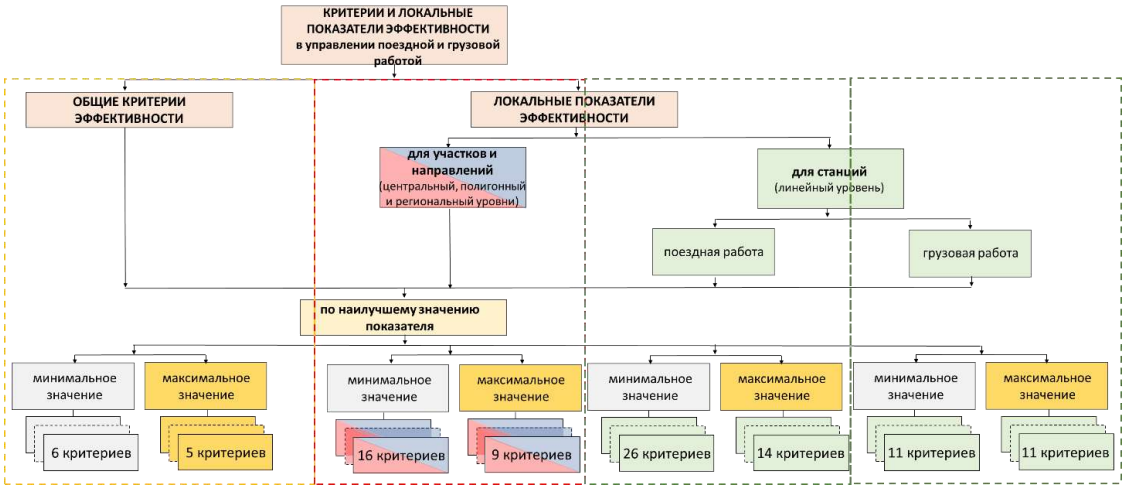



Рисунок 1 – Классификация критериев и локальных показателей эффективности

В условиях развития и перехода к новым, интегрированным принципам управления, в том числе в контексте внедрения полигонных технологий на железнодорожном транспорте, перед транспортной отраслью Российской Федерации поставлены задачи по развитию систем управления перевозочным процессом, обеспечению безопасности, надежности и эффективной организации движения поездов, а также ликвидации лимитирующих зон. Особую роль при этом играет диспетчерское управление. В связи с этим становится важным своевременное создание эффективных мер диспетчерского регулирования на основе критериев и локальных показателей эффективности, с целью создания условий для принятия оперативным персоналом наиболее рациональных решений с использованием интеллектуальных систем поддержки принятия решений для разработки и реализации управляющих мер.

**Список литературы**

1 Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий : Указ Президента Российской Федерации от 18 июня 2024 г. № 529. – URL: http://www.kremlin.ru/acts/bank/50755 (дата обращения: 10.09.2025).

2 Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : распоряжение Правительства РФ от 27 ноября 2021 № 3363-р: с изм. на 6 ноября 2024 г // КонсультантПлюс. Россия : справ. правовая система (дата обращения: 10.09.2025).

3 Об утверждении программы развития ОАО «РЖД» до 2025 года» (вместе с «Долгосрочной программой развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года») : распоряжение Правительства РФ от 19.03.2019 № 466-р (ред. от 13.10.2022) // КонсультантПлюс. Россия : справ. правовая система (дата обращения: 10.09.2025).

4 Об утверждении паспорта Комплексной программы инновационного развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года : распоряжение ОАО «РЖД» от 06.09.2023 № 2274/р. – URL : https://normacs.net/Doclist/doc/253US.html (дата обращения: 10.09.2025).

5 Об утверждении Стратегии научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга) : распоряжение ОАО «РЖД» от 17.04.2018 № 769/р. – URL: http://cipi.samgtu.ru/sites/cipi.samgtu.ru/files/belaya_kniga.pdf (дата обращения: 10.09.2025).

УДК 656.086.1

## СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ НА ТРАНСПОРТЕ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА

*К. М. ШКУРИН*
*Белорусская железная дорога, г. Минск*

*М. И. ШКУРИН*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Современный уровень технического развития характеризуется повышением степени взаимозависимости и интеграции различных технологических систем. При этом высокая взаимозависимость

делает технологические системы более уязвимыми к сбоям, в результате чего отказ одной системы может вызывать каскадные эффекты и приводить к масштабным нарушениям работы других взаимосвязанных систем. Усложнение поведения технологических систем вследствие их глубокой интеграции повышает требования к эффективности управления рисками.

Задача снижения вероятности сбоев и нарушений в работе особенно значима для транспортного комплекса, который обеспечивает связи между государствами и отдельными регионами, секторами экономики, производителями и потребителям продукции. Бесперебойная работа транспорта зависит от влияния множества факторов, среди которых можно выделить факторы внешней среды, нарушения в работе технических средств, несовершенство технологических процессов, человеческий фактор [2].

Согласно данным, приведенным в статье [1], анализ безопасности движения по хозяйству перевозок ОАО «РЖД» показывает, что более 40 % от общего числа нарушений связано с неудовлетворительным выполнением служебных обязанностей со стороны дежурно-диспетчерского персонала. Это может найти выражение как в нарушении требований нормативной документации непосредственно поездным диспетчером, маневровым диспетчером или дежурным по станции, так и в недостаточном контроле за выполнением таких требований оперативно подчиненными ему работниками.

Высокая доля нарушений безопасности движения, связанных с воздействием человеческого фактора, обусловливает необходимость поиска путей минимизации его влияния на бесперебойную работу транспортных систем.

Среди актуальных направлений работы, нацеленной на снижение влияния человеческого фактора, можно выделить следующие [2]:

– обучение и повышение квалификации работников;

– совершенствование методов контроля деятельности работников, что подразумевает как периодическую проверку знаний работников, так и контроль их психофизиологического состояния;

– улучшение мотивации работников (материальные и моральные поощрения, взыскания за нарушения трудовой дисциплины, воспитательная работа в коллективах и т. д.).

Эффективность деятельности по всем этим направлениям в значительной степени определяется выбранным подходом к управлению транспортной системой. При этом следует отметить, что задача теории управления в современных условиях состоит скорее в том, чтобы дать руководителям общие принципы принятия управленческих решений, следуя которым они смогут сохранять организацию отвечающей требованиям внешней среды, чем в предоставлении формализованных ответов на возникающие в работе организации проблемы.

Концептуально различные подходы к управлению подразумевают различные принципы, методы и функции управленческой деятельности. Среди наиболее популярных подходов можно выделить процессный, системный и ситуационный подходы.

При *процессном подходе* предприятие рассматривается как система взаимосвязанных и взаимодействующих процедур (процессов), которые ориентированы на достижение как собственных (различных) целей, так и общей стратегической цели предприятия [4]. Преимуществом процессного подхода является горизонтальный менеджмент – управление на границах процессов, при правильной организации которых обеспечивается значимый синергетический эффект.

Процессный подход подразумевает организацию контроля эффективности как внутри отдельных процессов, так и на их стыках. При этом может оцениваться как коммерческая эффективность процессов (их финансовый результат), так и их технологическая эффективность (максимально рациональное использование ресурсной и технологической базы для достижения требуемой производительности, что предусматривает также минимизацию числа нарушений в работе) [4].

Исследование управления как процесса привело к широкому распространению системных методов анализа. Применение *системного подхода* основано на использовании общей теории систем при принятии управленческих решений.

Организация в рамках данного подхода рассматривается как совокупность взаимосвязанных элементов. Основная идея системной теории заключается в том, что любое решение, направленное на изменение условий функционирования отдельного элемента, имеет последствия для всей системы. Системный подход в управлении позволяет минимизировать риск возникновения ситуации, когда принятое решение, благоприятное для одного из элементов, превращается в проблему для другого.

Тем не менее в рамках системного подхода к управлению сложно было дать ответ на вопрос о том, почему сходные организации в одной и той же внешней среде (например, работающие в одной отрасли) значительно отличаются в отношении достигаемых результатов деятельности. С целью разрешения этого противоречия был разработан *ситуационный подход* к управлению.

Интенсификация работы транспорта приводит к возрастанию динамики и сложности ситуаций, возникающих в управлении движением. Это, в свою очередь, влечет рост информационной нагрузки на работника, принимающего решение. Основой *ситуационного подхода* является создание модели ситуации и последующий ее анализ для принятия оптимального управленческого решения [3].

Ситуационный подход основывается на установлении связей между различными концепциями управления с конкретными ситуациями, возникающими в деятельности предприятия. Теория ситуационности в управлении утверждает, что не может быть единственного универсального набора принципов менеджмента, одинаково эффективных всегда и везде, поскольку в разных условиях лучшие результаты может приносить использование разных стратегий. Попытки руководить на основании каких-либо общих принципов, игнорируя специфику деятельности конкретного предприятия, связаны с нарастанием рисков нарушений в работе.

Реализацию ситуационного подхода традиционно описывают как четырехшаговый процесс [5]:

– руководитель знакомится с существующими методами управления, которые могут оказаться эффективными в работе предприятия, что предусматривает понимание процесса управления, индивидуального и группового поведения, системного анализа, методов планирования и контроля;

– руководитель анализирует существующие методы управления и оценивает вероятные последствия (как позитивные, так и негативные) от их применения;

– руководитель интерпретирует сложившиеся обстоятельства, определяя, какие факторы являются наиболее важными в данной ситуации и какой вероятный эффект может повлечь за собой изменение одной или нескольких переменных;

– руководитель увязывает конкретные приемы и методы, способные повысить эффективность работы предприятия при минимизации вероятности возникновения негативных последствий (нарушений), со сложившимися обстоятельствами, тем самым обеспечивая достижение целей организации наиболее эффективным путем в условиях конкретной ситуации.

Таким образом, можно утверждать, что процессный, системный и ситуационный подходы к управлению влияют на безопасность по-своему, предоставляя руководителям различные инструменты. Процессный подход фокусируется на управлении взаимосвязанными процессами (процедурами), что обеспечивает повышение стабильности и снижение рисков; системный подход рассматривает безопасность как результат взаимодействия всех элементов системы, помогая выявлять скрытые уязвимости; ситуационный подход предлагает гибкое реагирование на меняющиеся обстоятельства, позволяя адаптировать меры безопасности под уникальные условия. Вместе с тем с учетом многообразия ситуаций и угроз, возникающих при работе железнодорожного транспорта, в современных условиях представляется наиболее целесообразным использовать ситуационный подход к обеспечению безопасности и управлению рисками транспортных систем.

**Список литературы**

1 Обеспечение безопасности движения поездов на основе снижения влияния человеческого фактора / В. И. Апатцев, А. М. Завьялов, И. Н. Синякина [и др.] // Наука и техника транспорта. – 2014. – № 2. – С. 75–78.

2 **Кашевская, А. М.** Человеческий фактор как фактор риска безопасности в железнодорожном комплексе / А. М. Кашевская // ПОИСК: Политика. Обществоведение. Искусство. Социология. Культура. – 2022. – № 6 (95). – С. 99–108.

3 **Розенберг, И. Н.** Ситуационное управление в сфере транспорта / И. Н. Розенберг // Образовательные ресурсы и технологии. – 2015. – № 2 (10). – С. 42–48.

4 **Фадеева, Н. В.** Процессный подход в управлении железнодорожными перевозками: теоретические подходы / Н. В. Фадеева // Инновации и инвестиции. – 2022. – № 7. – С. 166–170.

5 **Шестернина, О. И.** Теория менеджмента: история управленческой мысли : учеб. пособие / О. И. Шестернина, Д. В. Устинова. – Пенза : ПГУАС, 2015. – 204 с.

*К 90-летию д-ра техн. наук,*
*профессора Л. А. Сосновского*

# 2 БЕЗОПАСНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА И СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

УДК 629.4, 629.4.063.8

## ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ ФОРСУНОК ПЕСОЧНИЦЫ ЛОКОМОТИВА НА БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

*Г. Г. АНТЮХИН, К. В. ИВАНОВ, А. Г. СИЛЮТА, М. А. АБДОЯН, С. А. СТРУНГАРЬ*
*Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, г. Москва, Российская Федерация*

Ограничение тяговых свойств локомотива по условиям сцепления колеса и рельса оказывает существенное влияние на соблюдение скоростного режима ведения поезда по конкретному участку с учетом критериев безопасности движения и, как следствие, пропускную и провозную способность железных дорог.

Применение песка в качестве абразива в зоне контакта колеса и рельса в настоящее время остается одним из распространенных методов обеспечения устойчивого сцепления и уменьшения проскальзывания колес в режиме тяги и торможения. Правилами эксплуатации локомотивов подача песка каждой форсункой под колеса локомотива, в зависимости от направления движения, строго регламентирована – не более 1,5 кг/мин под первую по ходу поезда колесную пару и 0,9 кг/мин под последующие колесные пары [1].

Надежная и устойчивая пескоподача при работе форсунки песочницы в значительной мере определяется качеством песка, параметры которого должны удовлетворять Техническим требованиям на песок для песочниц локомотивов, следующих по территории государств – участников Содружества (утверждено Советом по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества, протокол № 63 от 4–5 ноября 2015 г., Приложение № 20).

На расход песка оказывают влияние климатические и погодные условия, продольный профиль пути и состояние поверхности рельсов, техническое состояние локомотива и подвижного состава, опыт машиниста и др., что накладывает дополнительные ограничения на пробег локомотива до экипировки с учетом обеспечения 10 % запаса песка в бункерах песочниц.

Для обеспечения дозированной подачи песка из бункера локомотива в зону фрикционного контакта колеса с рельсом используются форсунки песочницы различных типов и конструктивного исполнения: вихревые ОН3-64, продувочно-вихревые 0106ФПЭ [2] и ФПл1710 [3] и эжекторного типа ПЦ25 [4]. Отличительными особенностями указанных форсунок являются принцип формирования и подачи песковоздушной смеси под колеса локомотива. Основные технические параметры вышеупомянутых форсунок сведены в таблицу 1.

*Таблица 1* – **Основные сравнительные параметры форсунок песочницы**

| Параметр | Значение параметра | | | |
|---|---|---|---|---|
| | ОН 3-64 | 0106ФПЭ | ФПл1710 | ПЦ25 |
| Тип форсунки | Вихревая | Продувочно-вихревая | | Эжекторная |
| Пределы регулирования подачи песка при давлении сжатого воздуха 0,9 МПа, кг/мин | 0,0–17,0 | 0,0–14,0 | 0,0–12,0 | 0,0–2,0 |
| Система регулирования подачи песка | Бесступенчатая, регулировочным винтом | | | Ступенчатая, позиционер |

Конструктивное исполнение форсунок песочницы ПЦ25 и ФПл1710 позволяет обеспечить устойчивую подачу песка в зоне минимальных расходов до 0,6 кг/мин, что позволяет увеличить время нахождения локомотива в эксплуатации без экипировки.

В условиях реализации в ОАО «РЖД» безотцепочной технологии эксплуатации грузовых локомотивов Восточного полигона вопрос рационального расхода песка без захода на экипировку явля-

ется особенно актуальным [5]. Для определения возможности безотцепочного пробега локомотива в 2024 году в соответствии с телеграфными указаниями Дирекции тяги – филиала ОАО «РЖД» были проведены сравнительные эксплуатационные испытания по согласованной с ОАО «РЖД» программе и методике с контролем ряда параметров в поездке, а именно – масса поезда, расстояние, расход песка по секциям, продолжительность поездки, количество допущенных случаев боксования колесных пар по данным МСУД электровозов, общая продолжительность времени работы форсунок песочницы по данным МСУД локомотивов, техническое состояние форсунок песочницы, состояние песочных труб и наполнение песочных бункеров.

Программа и методика испытаний включала в себя следующие основные этапы.

1 Проведение ревизии форсунок песочницы (проверка их работоспособности и настройка до начала испытаний).

2 Заправка песочных бункеров и их пломбирование с участием специалистов эксплуатационного и сервисного локомотивных депо с оформление соответствующего акта.

3 Проведение контрольной поездки на участке Восточного полигона от станции Мариинск Восточно-Сибирской ж. д. до станции Смолянинoво Дальневосточной ж. д. с контролем работы форсунок песочницы в пути следования.

4 Проведение дозаправки песочных бункеров до полного 100%-го заполнения мерными ёмкостями в СЛД Приморское после завершения контрольной поездки при участии специалистов эксплуатационного и сервисного локомотивных депо с оформлением соответствующего акта.

5 Проверка работоспособности и технического состояния форсунок песочницы, песочных бункеров и песочных труб с участием специалистов эксплуатационного и сервисного локомотивных депо с оформлением соответствующего акта.

Эксплуатационные параметры участков обращения и обобщенные результаты опытных поездок сведены в таблицу 2.

*Таблица 2* – **Результаты опытных поездок электровозов**

| Параметр | Значение параметра | |
|---|---|---|
| | 3ЭС5К № 1212 | 3ЭС5К № 1273 |
| Обозначение форсунки песочницы | ФПл1710 | ПЦ25 |
| Тип форсунки песочницы | Продувочно-вихревая | Эжекторная |
| Вес поезда | 7 038 | 7 032 |
| Протяженность участка, км | 5521 | 5 355 |
| Продолжительность поездки, ч | 212 | 198 |
| Расход песка, кг | 684 | 482 |

Сравнительные эксплуатационные испытания грузовых электровозов 3ЭС5К с форсунками песочницы ФПл1710 и ПЦ25 на участке Мариинск – Смолянинoво, проведенные в 2024 году с участием АО «ВНИИЖТ, подтвердили возможность безотцепочной технологии эксплуатации локомотивов.

Вне зависимости от вариантов комплектации электровозов серии 3ЭС5К форсунками песочницы ФПл1710 и ПЦ25 запас песка на локомотивах достаточен для проследования в летнее время участка от станции Мариинск до станции Смолянинoво протяженностью 5355 км с расчетными весами поездов без промежуточной до экипировки песком.

**Список литературы**

1 Технологическая инструкция «Техническое обслуживание электровозов и тепловозов в эксплуатации» : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 01.04.2014 г. ЦТ/814 от 10.04.2001.

2 Патент на полезную модель № 80810. Форсунка песочницы локомотива : № 2008139790 от 08.10.2008 г. / Г. Г. Антюхин, В. К. Клевакин, О. Н. Назаров, А. С. Соколов, А. М. Ульянов ; патентообладатели ОАО «ВНИИЖТ», ОАО «МРМЗ».

3 Патент на полезную модель № 180931. Форсунка песочницы локомотива : № 2017139778 от 15.11.2017 г. Г. Г. Антюхин, С. В. Аркадсков, В. К. Клевакин, П. В. Чернышев; заявитель АО «ВНИИЖТ».

4 Патент на изобретение RU 2761161 C1. Форсунка песочницы локомотива : № 2021113012 : заявлено 04.05.2021 г. / А. В. Литвиненко, Д. С. Южалин, Г. Г. Антюхин, С. А. Струнгарь, А. Г. Силюта ; заявители АО «ВНИИЖТ», ООО «Профит Центр Плюс».

5 **Власенский, А. А.** Перспективы внедрения полигонных моделей использования локомотивной тяги / А. А. Власенский // Локомотив. – 2015. – № 5. – С. 2–6.

УДК 629.4.027.4

# ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ И УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ЦЕЛЬНОКАТАНЫХ КОЛЕС ЭЛЕКТРОВОЗА БКГ

*П. М. АФАНАСЬКОВ, В. В. БЕЛОГУБ, К. А. ЕМЕЛЬЯНОВА, В. В. КОМИССАРОВ, Е. Н. КОНОВАЛОВ, М. И. ПАСТУХОВ, Л. П. ЦЕЛКОВИКОВА, Р. И. ЧЕРНИН*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

*А. В. ПУТЯТО*
*Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, г. Гомель*

Железнодорожные колеса используются в колесных парах тележек как пассажирских, так и грузовых вагонов, различных типов локомотивов. Также они являются составным элементом моторных и немоторных колесных пар дизель-поездов, электропоездов и специализированного подвижного состава и представляют собой критически важный элемент подвижного состава. Данные изделия изготавливаются из высокопрочной стали методом прокатки и ковки, обеспечивая долговечность и надежность в эксплуатации [1]. Рассматриваемые в работе колеса, предназначенные для электровозов БКГ, должны обеспечивать расчетную скорость – 120 км/ч, статическую нагрузку на рельсы – 245,4 кН. Новые колеса имеют диаметр 1254 мм, предельно изношенные – 1150 мм. Уменьшение диаметра колеса позволяет сократить эксплуатационные расходы и повысить эффективность использования электровозов БКГ без ущерба для безопасности.

Предложена процедура допуска колес с пониженным диаметром, включающая: анализ условий эксплуатации, моделирование нагрузок, расчет статической и усталостной прочности, проведение стендовых и полигонных испытаний. Решение о допуске принимается в результате расчетов и экспериментов.

Испытательным центром железнодорожного транспорта Белорусского государственного университета транспорта выполнена оценка сил, действующих со стороны электровоза БКГ на путь. Испытания позволили определить максимальные значения сил, действующих в области контакта колеса и рельса на прямом участке пути, в кривой и при прохождении стрелочного перевода [2]. Для проведения расчета использована конечно-элементная модель колеса в SolidWorks. Установлено, что при уменьшении диаметра обода до 1135 мм максимальные напряжения в диске колеса достигают значения в 257 МПа, что соответствует коэффициенту запаса статической прочности 1,56 (минимально допустимое значение – 1,0). Следовательно, даже при значительном износе колёса сохраняют статическую прочность.

Коэффициент запаса усталостной прочности определялся расчетным путем с учетом монтажных и эксплуатационных напряжений. На основе определения напряженно-деформированного состояния цельнокатаного колеса установлены наиболее нагруженные зоны, в которых наблюдается максимальный размах напряжений при положениях 0° и 180°. Выполнено определение средних и амплитудных значений напряжений, а также поправочных коэффициентов. На рисунке 1 представлено распределение (по высоте) коэффициента запаса усталостной прочности в наиболее опасной зоне диска цельнокатаных колес при разных их диаметрах. Минимальные значения составили: для диаметра 1146 мм – 1,705; 1142 мм – 1,501; 1135 мм – 1,302 при нормативе от 1,3 до 1,7 в зависимости от стадии и глубины проводимых исследований.

Значение допускаемого коэффициента запаса сопротивления усталости цельнокатаного колеса принимается в соответствии с [3]:

– при наличии результатов предварительных расчетов на прочность – не менее 1,7;

– в случае наличия результатов расчетов на прочность и проведенных стендовых испытаний цельнокатаных колес на усталость – не менее 1,5;

– если дополнительно имеются результаты полигонных испытаний – не менее 1,3.

По результатам исследования сделан вывод о том, что наибольшее нагружение реализуется при прохождении колесом стрелочных переводов.

В результате исследований установлено, что безопасная эксплуатация колес электровоза БКГ возможна до достижения диаметра 1146 мм. При получении положительных результатов стендовых испытаний на усталость – до диаметра 1142 мм, и результатов полигонных испытаний до диаметра 1135 мм.

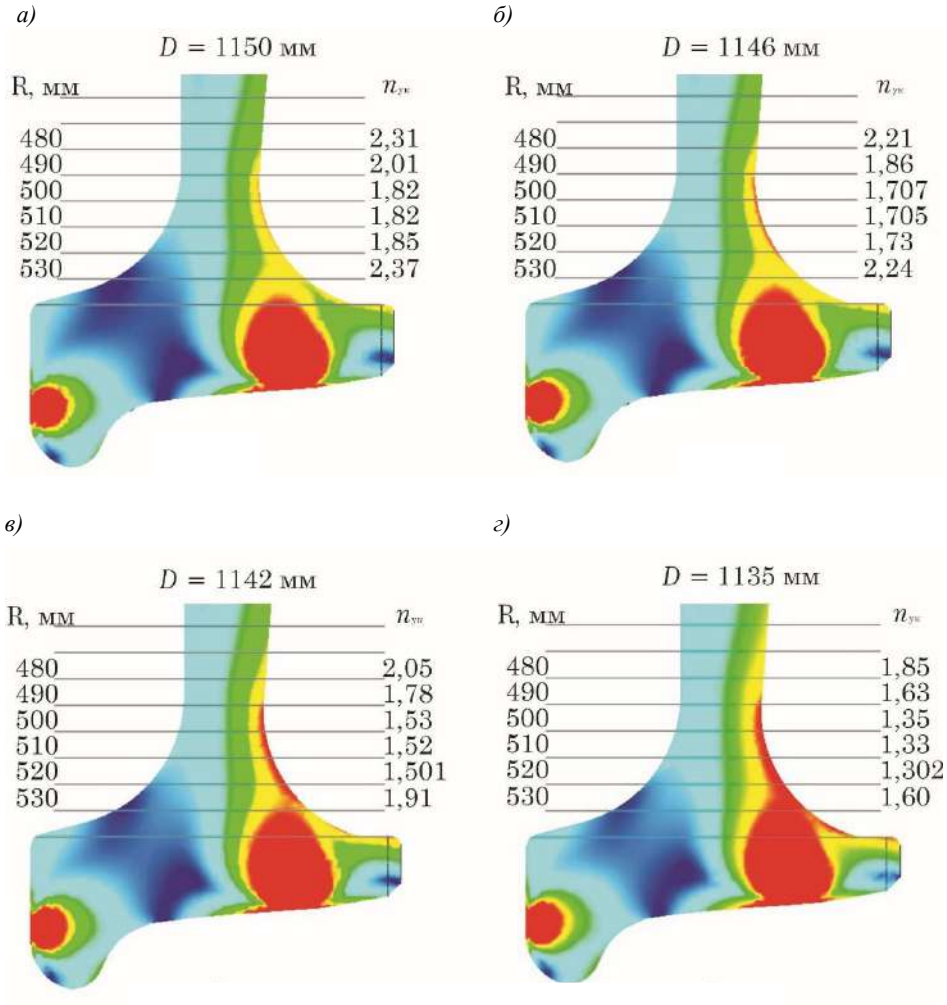



Рисунок 1 – Минимальный коэффициент запаса усталостной прочности диска цельнокатаных колес с диаметром 1150 мм (*а*), 1146 мм (*б*), 1142 мм (*в*), 1135 мм (*г*)

**Список литературы**

1 **Malavasi, G.** Contact Forces and Running Stability of Railway Vehicles / G. Malavasi // The International Journal of Railway Technology. – 2014. – № 3, is. 1. – P. 121–132.

2 Оценка допустимости ввода в эксплуатацию железнодорожных колес с пониженным диаметром / П. М. Афанаськов, В. В. Комиссаров, Н. В. Комаровский [и др.] // Транспортное машиностроение. – 2025. – № 4. – С. 30–38.

3 ГОСТ 33783-2016. Колесные пары железнодорожного подвижного состава. Методы определения показателей прочности. – Минск : Госстандарт, 2017. – 63 с.

УДК 629.4.:62-69

# ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПЕРЕДАЧИ И ИНФОРМАТИВНОСТИ СООБЩЕНИЙ О ТЕХНИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА В ДВИЖЕНИИ

*В. В. БУРЧЕНКОВ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

*А. В. КОЛЕНЧИКОВ, П. А. КРОТ, С. А. СКВОРЦОВ*
*Белорусская железная дорога, г. Минск*

Для безопасной эксплуатации железнодорожного транспорта и повышения его эффективности и качества работы необходимо обеспечивать высокоинформативный и достоверный контроль технического состояния отдельных узлов и агрегатов подвижного состава на ходу поезда.

Непрерывный и периодический контроль технического состояния ходовой части вагонов и локомотивов на Белорусской железной дороге осуществляется микропроцессорными комплексами технического состояния подвижного состава на ходу поезда типа КТСМ-01Д, КТСМ-02 и КТСМ-03. С их помощью в поезде определяются перегретые буксы и другие неисправности. В зависимости от температуры корпуса буксы аппаратура КТСМ выдает сообщения об уровнях дефектов в виде сигналов: «Тревога-0», «Тревога-1», «Тревога-2». Эти сообщения передаются по кабельным линиям в станционные автоматизированные рабочие места АРМ ЛПК. Затем, посредством стационарных станционных и локомотивных радиостанций, соответствующая информация передается машинисту локомотива для принятия мер по предупреждению аварийной ситуации. Формирование речевых распоряжений обеспечивает автоматическая подсистема речевого оповещения ПРОС-1М. В зависимости от уровня нагрева буксовых узлов предусмотрено снижение скорости и остановка поезда на станции (по сигналам «Тревога-0» и «Тревога-1») или остановка поезда на перегоне (по сигналу «Тревога-2»). Это позволяет вовремя предупредить разрушение буксовых узлов вагонов или иной неисправности и снизить риск крупной аварии.

Сбор информации о подвижном составе с централизацией результатов контроля осуществляется в базах данных Автоматизированной системы контроля подвижного состава (АСК ПС). Централизация в масштабах дороги позволяет не только следить за развитием неисправностей ответственных узлов подвижного состава на участках движения поездов, но и своевременно выявлять отказы и сбои в работе самих устройств контроля. В реальном масштабе времени на экраны мониторов автоматизированных рабочих мест линейных пунктов контроля (АРМ ЛПК) выводится перечень пунктов контроля с температурами настройки средств контроля, расширенный режим поиска подвижных единиц по заданному условию (типу и числу подвижных единиц; выборке показаний с тревожной сигнализацией разного уровня; обнаруженным в поезде неисправностям вагонов и локомотивов, в том числе с заторможенными колесами из-за неисправности тормозной системы; дефектами колес по поверхности катания в виде ползунов и наваров; с нарушением геометрических параметров колес; нарушением габаритных размеров вагонов; неисправностями ударно-тяговых механизмов автосцепок и др.).

Передача информации машинисту локомотива осуществляется в автоматическом режиме с применением аналоговых локомотивных радиостанций типа КВ 42 РТМ, 55Р22В-1.1, РВС-1-01. Работа этих радиостанций в условиях атмосферных помех, а также на электрифицированных железнодорожных линиях затрудняет правильное восприятие машинистом локомотива речевого сообщения о сигнале тревоги. На некоторых участках железнодорожных линий выявлен низкий уровень сигналов радиостанций. Основные отказы аналоговых локомотивных радиостанций приходятся на приемопередатчик, усилитель НЧ, микротелефонную трубку и пульт управления. Это связано в первую очередь с тем, что у большей части радиоаппаратуры истек срок эксплуатации. На рисунке 1 приведен внешний вид аналоговой локомотивной радиостанции КВ 42 РТМ. Необходимость внедрения и развития цифровой системы локомотивной и станционной радиосвязи, реализующей комплексное решение задач повышения безопасности движения, актуализирует интенсивность решения данной проблемы.

Рисунок 1 – Радиостанция КВ 42 РТМ

В настоящее время локомотивы Белорусской железной дороги оснащаются комплексами локомотивных устройств безопасности КЛУБ-У. Комплексное локомотивное унифицированное устройство безопасности КЛУБ-У является основным устройством инновационной системы КУРС-Б. В КЛУБ-У предусмотрено взаимодействие по локальной сети с системами САУТ, ТСКБМ, автоведения, а также взаимодействие по радиоканалу с системой интервального регулирования движения поездов и точечным каналом связи.

Для автоматического определения координаты локомотива в КЛУБ-У используется спутниковый навигационный приемник GPS/ГЛОНАСС. Система КЛУБ-У обеспечивает обмен информацией со станционными, переездными и другими устройствами цифровой радиосвязи; отсчет текущего времени с корректировкой по астрономическому времени спутниковой навигационной системы. Основными блоками КЛУБ-У являются локомотивный блок электроники БЭЛ-У, блок ввода и индикации БИЛ-У и блок коммутации и регистрации БКР-У, антенны цифрового радиоканала РК, спутниковой навигационной системы СНС и точечного канала связи ТКС (рисунок 2). Связи между модулями и внешними блоками осуществляются по CAN-интерфейсу.

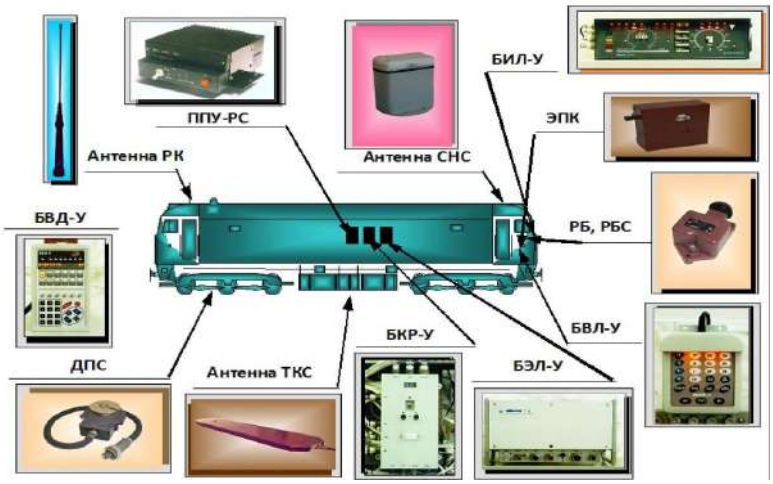



Рисунок 2 – Состав оборудования системы КЛУБ-У

*а)* *б)*

Рисунок 3 – Антенна спутниковой навигации СНС (*а*) и антенна цифрового радиоканала РК (*б*)

В состав комплексов КЛУБ-У входят цифровые радиостанции РЛСМ-30Д для идентификации местоположения поезда на участке железной дороги. В них предусмотрена возможность работать с системой GSM-R. Для приема сигналов спутников систем GPS и ГЛОНАСС, по которым приемник определяет значения географической широты и долготы, текущего времени по Гринвичу и скорость движения поезда, предназначена антенна приемника системы спутниковой навигации СНС. Антенна цифрового радиоканала РК предназначена для приема и передачи радиосигналов для взаимодействия систем КЛУБ-У, МАЛС в диапазоне 450–470 МГц. Внешний вид антенн цифровых радиостанций нового поколения приведен на рисунке 3.

Внешний вид цифровой локомотивной радиостанции приведен на рисунке 4.

Рисунок 4 – Радиостанция КВ/УКВ РВС-1-02

В настоящее время на Белорусской железной дороге внедряется аппаратура нового поколения КТСМ-03, имеющая ряд инновационных технических решений. В состав каналообразующей и приемо-передающей аппаратуры комплексов КТСМ-03 входит процессор ARM Cortex-M4, 32 бит,168 МГц, а также ПЗУ – 2 Мбайт и ОЗУ – 16 Мбайт. Аппаратура функционирует в системе Ethernet RS232 со скоростью передачи до 115200 бит/с.

Технические возможности приемопередающей аппаратуры КТСМ-03 позволяют осуществить прямую передачу информации из комплексов КТСМ-03 на цифровую радиостанцию локомотива с использованием радиомодемов и системы GSM-R комплексов КЛУБ-У. Для этого необходимо опционально дополнить программное обеспечение блока управления БУ-05 комплекса КТСМ-03 программой функционирования автоматической подсистемы речевого оповещения ПРОС-1М. Использование предложенной формы передачи информации позволит исключить аварийные ситуации, связанные с неправильным восприятием локомотивными бригадами указаний, поступающих из станционных радиостанций АРМ ЛПК. В результате такой модернизации существенно повышаются надежность, быстродействие и достоверность передачи ответственной информации. При этом дублирование передачи сигналов тревоги по цифровому каналу позволит существенно повысить надежность восприятия сигналов тревоги и дополнительной информации машинистом локомотива.

**Список литературы**

1 **Бурченков, В. В.** Автоматизация технического контроля и диагностики подвижного состава : монография / В. В. Бурченков ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2020. – 254 с.

2 Исследование уровня радиопомех на участке железной дороги на частоте поездной радиосвязи / В. Г. Шевчук, Р. А. Соловьев, А. А. Фищенко, Г. А. Гуллаков // Проблемы безопасности на транспорте : материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. В 2 ч. Ч. 1 / под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2017. – С. 208–210.

УДК 62-592

## ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ В ОБЛАСТИ ТОРМОЗНОГО ОБОРУДОВАНИЯ КАК КЛЮЧЕВОЙ ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

*Д. С. ВЛАДИМИРОВ, А. В. КИРИЛЛОВ*
*АО «Московский тормозной завод "ТРАНСМАШ" им. А. А. Егоренкова», Российская Федерация*

*Д. В. НАЗАРОВ*
*Передовая инженерная школа «Академия ВСМ»*
*Российского университета транспорта (МИИТ), г. Москва*

Надежная и безопасная эксплуатация поездов − ключевое условие работы железнодорожного комплекса. На железнодорожном транспорте одним из критически важных элементов, непосредственно влияющих на безопасность движения, является тормозное оборудование. От его надежности, точности и быстродействия зависят жизнь и здоровье людей, сохранность грузов и целостность инфраструктуры. Современные тенденции развития железнодорожного комплекса, такие как увеличение веса и длины, рост скоростей движения, усиление требований к экономической эффективности, предъявляют новые повышенные требования и к тормозным системам.

К традиционным проблемам, таким как борьба по снижению продольных динамических усилий в грузовых поездах, приводящих к разрывам автосцепных устройств и сходам подвижного состава с рельсов, добавляются новые:

− необходимость интеграции в общесетевые системы управления;

− обеспечение кибербезопасности;

− предиктивная диагностика, совмещенная с планово-предупредительным обслуживанием, и адаптация к работе в экстремальных климатических условиях.

Таким образом, задачи по разработкам инновационных тормозных систем и устройств являются актуальными.

Эволюция тормозного оборудования движется по пути интеллектуализации, цифровизации, модульности и повышения ремонтопригодности.

**1 Локомотивное направление. От отдельных аппаратов к интегрированным системам**

Для локомотивов современным решением стала разработанная в 2021 году система ТОЛ (Тормозное оборудование локомотивное), включающая в себя три ключевых компонента:

− кран машиниста 140 − обеспечивает все режимы торможения и управления поездом;

− блок тормозного оборудования 011 − центральный узел управления тормозными системами;

− блок стояночного тормоза 018 − обеспечивает надежную фиксацию локомотива во время стоянки поезда.

Система ТОЛ отличается от предыдущего поколения УКТОЛ улучшенными схемными решениями, современной элементной базой, повышенной ремонтопригодностью и сниженной стоимостью жизненного цикла. Важной особенностью является модульная архитектура, позволяющая адаптировать систему под требования различных производителей локомотивов.

Дополняет систему ТОЛ кран вспомогательного тормоза 220, разработанный в 2021 году. Его ключевые преимущества:

− вертикальная ориентация ручки управления;

− полная интеграция в пульт машиниста;

− увеличенная пропускная способность;

− улучшенная эргономика и дизайн.

Система ТОЛ успешно внедрена на различных типах локомотивов: тепловозах ТЭМ23, электровозах 2ЭС8 «Малахит», маневровых локомотивах ЭМКА2, тепловозах 2ТЭ35А, а также на белорусских тепловозах ТМЭ1 в рамках программы импортозамещения.

**2 Модульный подход. Комплексные решения для локомотивостроения**

С 2008 года предприятие развивает концепцию модульного построения тормозного оборудования. Наиболее показателен модуль Е.316 для тепловоза 2ТЭ35А, включающий:

− кабинное оборудование (органы управления);

− кузовной модуль (исполнительные устройства);

− полную электрическую и пневматическую обвязку.

Такая архитектура обеспечивает:

− упрощенную интеграцию в конструкцию локомотива;

− снижение трудоемкости монтажа;

− комплексные гарантийные обязательства;

− унификацию обслуживания и ремонта.

В модуль Е.316.0100 входят исполнительные части системы ТОЛ, дистанционный клапан автостопа 351Д, а также компоненты системы распределенного управления тормозами РУТП.130.

История разработки модулей демонстрирует эволюцию подхода:

− Е.311 для тепловоза 2ТЭ25А (110 модулей);

− Е.300Т для электровоза ЭП20 (80 модулей) − впервые применены дистанционное управление и расширенная диагностика;

− Е.310 для электровоза 2ЭС5 (10 модулей) − внедрены автономное потележечное торможение и бесконтактная система обнаружения обрыва магистрали;

− Е.311КМ для тепловозов 2ТЭ25КМ, 3ТЭ25К2М и 3ТЭ28 (около 2000 модулей) − самый массовый модуль.

**3 Специализированные решения. Блок тормозного оборудования 040**

Уникальной разработкой является грузопассажирский блок тормозного оборудования 040, особенностью которого является концентрация трех типов воздухораспределителей на фронтальной части:

− пассажирский 242;

− грузовой 483А;

− электропневматический.

Такое решение обеспечивает исключительную ремонтопригодность и удобство обслуживания. Блок успешно применяется на узбекских электровозах (52 единицы) и устанавливается на российском тепловозе ТЭ26.

**4 Вагонное направление. Инновации для пассажирского и грузового подвижного состава**

Для двухэтажных пассажирских вагонов модели 2020 разработаны блоки тормозного оборудования 050 и 051, особенностями которых являются:

− новый воздухораспределитель рассредоточенной конструкции с межремонтным интервалом 5 лет;

− функция ограничения максимального давления в тормозном цилиндре (ТЦ);

− режим пониженной тормозной эффективности;

− передача диагностической информации по Ethernet в систему контроля, диагностики и управления (СКДУ);

− защитный кожух со степенью защиты IP54.

Для вагонов габарита «Т» создан комплекс включающий блок тормозного оборудования 050А-1, противоюзную защиту 007 и магистральный фильтр 053 с двухступенчатой системой очистки (6-й класс чистоты по ГОСТ 17433).

**5 Перспективные разработки для грузовых перевозок**

Особого внимания заслуживает направление скоростных контейнерных перевозок. Разработанный блок тормозного оборудования 111 (и его модификация 111Н) для вагонов-платформ с дисковым тормозом включает:

− противоюзную систему;

− усовершенствованную пневматическую схему;

− расширенную диагностику;

− адаптацию для работы на повышенных скоростях.

Для сочлененных и длиннобазных вагонов создан воздухораспределитель 483А-08 с тормозной частью 483А.300, обеспечивающий:

− независимое время наполнения ТЦ от их количества и объема;

− стабильность характеристик независимо от выхода штока ТЦ;

− снижение общей стоимости вагона.

**6 Решения для моторвагонного подвижного состава**

Для скоростного электропоезда ЭС104 «Финист» разработан комплекс тормозного оборудования включающий:

− кран машиниста 345 с дистанционным управлением;

− блок тормозного оборудования 420-1;

− системы пневмоподвешивания и противоюзной защиты;

− расширенную диагностику с регистрацией параметров.

Особенностью данного комплекса является адаптация оригинально разработанного для скоростных электропоездов «Ласточка» оборудования под современные требования.

Проведенный анализ показывает, что современное тормозное оборудование перестало быть набором распределенных аппаратов и перестроилось в сложные модульные системы.

Повышение безопасности движения поездов достигается за счет комплексного подхода, в который входит:

1) модульность и унификация, снижающие риски ошибок при монтаже и обслуживании;

2) внедрение цифровых технологий для расширенной диагностики и мониторинга в реальном времени;

3) разработка новых алгоритмов управления (адаптивное торможение, потележечное управление), минимизирующих влияние человеческого фактора и негативные физические явления (продольная динамика);

4) повышение надежности и устойчивости к внешним воздействиям за счет новых конструктивных решений и материалов.

Продуктовая линейка АО «МТЗ ТРАНСМАШ» имени А. А. Егоренкова, представленная в статье, наглядно демонстрирует, как отечественный производитель активно отвечает на современные требования безопасности движения поездов, предлагая инновационные, технологичные и надежные решения для всего парка подвижного состава. Дальнейшее развитие предусматривает углубленную интеграцию в системы интеллектуального управления поездом и перехода к полноценным системам предиктивного анализа и управления безотказностью.

УДК 656.025.6

## ВНЕДРЕНИЕ ДВУХЭТАЖНЫХ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ В РОССИИ

*Н. В. ВОРОНЦОВ, Л. С. КУЩЕНКОВА*

*Нижегородский институт путей сообщения – филиал Приволжского университета путей сообщения, г. Нижний Новгород, Российская Федерация*

Двухэтажные пассажирские вагоны представляют собой инновационное решение в сфере железнодорожного транспорта, позволяющее увеличить количество перевозимых пассажиров и опти-

мизировать использование инфраструктуры. В России внедрение таких вагонов началось в постсоветский период и продолжается до сих пор.

Первые двухэтажные пассажирские вагоны в России появились в 1905 году на Тверском вагоностроительном заводе, однако их массовое производство и использование началось значительно позже. Особенность этих вагонов состоит в том, что первый этаж предназначался для перевозки рогатого скота, а второй – для пассажиров. Вагоны были вместимостью 152 человека и предназначались для перевозки переселенцев из центральных районов России на Дальний Восток и солдат царской армии.

В СССР эксперименты с двухэтажными вагонами проводились, но широкого распространения не получили. Например, вагон производства завода «Герлитц» имел 136 мест для сидения, из которых 58 мест было на первом этаже и 78 – на втором. Кресла располагались по схеме 2+3. Вагоны были оборудованы двумя туалетными комнатами, техническим купе, купе для проводников; рассчитаны на скорость 120 км/ч и оснащены автоматическими дверьми, управление которыми было возможно как из технического купе, так и из локомотива. Вагон, построенный на Ленинградском вагоностроительном заводе имени Егорова, предназначался для туристических поездок вдоль Черноморского побережья, а также курортов Северного Кавказа. В верхней части имел обзорный стеклянный купол для осмотра окрестностей, а на нижнем этаже – удобный буфет с баром.

Первый из перечисленных вагонов не пошёл в массовое производство. Вагоностроителям не удалось получить необходимые согласования для эксплуатации вагона. В частности, требованиям безопасности не соответствовала ширина прохода между сидениями второго этажа. В случае пожара пассажиры не смогли бы быстро покинуть вагон. Также возникли сложности с остеклением, которое предполагало использование оргстекла.

Кроме того, вагоны, построенные в ГДР на заводе «Аммендорф», не получили широкого распространения из-за отсутствия необходимой инфраструктуры для обслуживания и ремонта этого типа подвижного состава. К концу 1970-х годов все они были выведены из эксплуатации. На разработку таких вагонов повлияло и отсутствие конкуренции: «Алтайвагон» был монополией в СССР по производству крытых вагонов, и за неимением конкурентов у завода не было стимула к прогрессу.

В 1990-е годы, после распада СССР, начался процесс обновления подвижного состава российских железных дорог. Одним из направлений стало внедрение двухэтажных вагонов. Первые такие вагоны были выпущены на российских предприятиях в начале 2000-х годов. На стыке 1970–1980-х годов Министерство путей сообщения заказало на Ленинградском вагонно-строительном заводе разработку двухэтажных вагонов, предназначенных для туристов и имеющих обзорную крышу. И уже к 1983 году был создан двухэтажный туристический вагон, который успел осуществить 24 поездки. Спустя столетие руководство Тверского вагоностроительного завода решило возобновить проект, и уже в декабре 2010 года подписало контракт на поставку 50 двухэтажных вагонов. Конечно же, новые двухэтажные вагоны были современными и комфортными. Таким образом, 1 ноября 2013 года с Казанского вокзала Москвы до Адлера, отправился первый российский двухэтажный поезд.

В ближайшее время будет готов скоростной двухэтажный поезд «Буревестник», запуск которого между Нижним Новгородом и Москвой запланирован на 3 декабря 2025 года. Время в пути между Нижним Новгородом и Москвой составит 4 часа 25 минут.

Двухэтажные вагоны имеют ряд преимуществ перед одноэтажными.

1 Увеличение вместимости. Двухэтажные вагоны позволяют перевозить больше пассажиров при тех же габаритах поезда. Это особенно важно для пиковых периодов, когда спрос на железнодорожные перевозки значительно возрастает.

2 Оптимизация использования инфраструктуры. Увеличение количества перевозимых пассажиров при неизменной инфраструктуре снижает нагрузку на железнодорожные станции, вокзалы и другие объекты инфраструктуры.

3 Снижение затрат. Использование двухэтажных вагонов может снизить общие затраты на перевозку пассажиров за счёт оптимизации расходов на эксплуатацию и обслуживание поездов.

Однако внедрение двухэтажных вагонов также имеет ряд вызовов:

– двухэтажные вагоны должны соответствовать высоким требованиям безопасности, что может привести к дополнительным затратам на разработку и сертификацию;

– эргономика и комфорт – размещение пассажиров на двух этажах требует тщательного планирования внутреннего пространства вагона для обеспечения комфорта и удобства пассажиров;

– изменение маршрутов и расписаний – внедрение двухэтажных вагонов может потребовать корректировки маршрутов и расписаний для обеспечения оптимальной загрузки поездов.

Перечислим отличительные черты двухэтажных пассажирских поездов.

1 Наличие двух этажей влияет на распределение массы поезда. Большая масса может потребовать больше энергии для разгона и преодоления подъёмов, а также влиять на устойчивость и динамику поезда.

2 Из-за расположения пассажиров и грузов на разных уровнях центр масс поезда может смещаться, что требует более точного управления и может влиять на устойчивость поезда на поворотах и при изменении скорости.

3 Форма и конструкция поезда могут влиять на ее аэродинамические характеристики. Двухэтажные поезда могут иметь более сложную форму, что увеличивает сопротивление воздуха и, следовательно, расход энергии на движение. Отличительными параметрами конструкции этих вагонов является то, что кузов обладает большей высотой по сравнению с обычными одноэтажными вагонами, имеет понижение в салонной части и не имеет на ее протяжении хребтовой балки. Основная масса оборудования размещается внутри в концевых частях вагона. Эти факторы приводят к увеличению боковых колебаний и уменьшению устойчивости к опрокидыванию двухэтажных вагонов при движении по неровностям пути. Для уменьшения влияния этих факторов на динамические параметры вагона в конструкцию подвешивания была включена система боковой стабилизации на торсионноупругих элементах.

Для обеспечения безопасности движения поезда на разных скоростях и в различных условиях требуется эффективная система торможения. Особенности распределения массы и нагрузки на вагоны могут влиять на требования к тормозной системе.

Двухэтажные поезда могут иметь другие характеристики устойчивости и колебаний по сравнению с одноэтажными поездами.

Оптимизация расхода энергии является важной задачей для железнодорожного транспорта. Особенности конструкции двухэтажных поездов могут влиять на их энергоэффективность, например, через оптимизацию расположения оборудования и использования материалов.

Подводя итоги, можно сказать, что на железных дорогах России необходимо массовое использование двухэтажных пассажирских вагонов, особенно в городах-миллионниках и регионах с высокой плотностью населения и интенсивным пассажиропотоком. К тому же на железнодорожный транспорт приходится около 28 % пассажирооборота в России. Однако тормозить этот процесс может и тот фактор, что большинство пассажирских вагонов остаются в удовлетворительном состоянии, а производство двухэтажных пассажирских вагонов требует высокой точности и качества изготовления. Вагоны должны соответствовать всем требованиям безопасности и комфорта.

УДК 621.31

## МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ ВИТКОВ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ РАБОТЕ ПОД НАГРУЗКОЙ НА ОСНОВЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

*В. Н. ГАЛУШКО*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Основная задача обнаружения короткозамкнутых витков (МКЗ) в обмотках трансформаторов и трехфазных асинхронных двигателей (АД) при работе под нагрузкой обнаружения состоит в извлечении информативных признаков из данных, которые будут захвачены и переданы датчиком для обработки в сверточную нейронную сеть (СНС), и затем выполнении классификации типа дефекта.

Экономическая ситуация, сложившаяся в последние годы в промышленности, заставляет принимать меры, направленные на увеличение сроков эксплуатации различного электротехнического оборудования. Решение задачи по оценке технического состояния широко распространенных однофазных и трехфазных трансформаторов, применяемых в электроснабжении железнодорожных потребителей, в значительной мере связано с внедрением эффективных методов инструментального контроля и технической диагностики.

Следует отметить, что за прошедшие годы была проделана большая работа по созданию методов диагностики трансформаторного оборудования, позволяющих при комплексном их применении адекватно оценить состояние обследуемого объекта с высокой надежностью. Однако при этом количество трансформаторов, «доживающих» до отказов по причине термохимического старения твердой изоляции, составляет по разным источникам не более 20 %. Причиной отказа большинства трансформаторов являются различные своевременно не выявленные дефекты. Сложившаяся ситуация во многом обусловлена низкой эффективностью традиционной схемы диагностики.

Несмотря на все безусловные достоинства применяемых в нашей стране диагностических систем, они имеют ряд существенных недостатков: не являются универсальными (применяются под конкретные схемы, оборудование и т. д.); используется разнородная и разноточная информация; не учитывается динамика изменения критериев диагностирования оборудования, другими словами, системы не обучаемы. Поэтому применение самообучаемых систем на основе искусственных нейронных сетей позволит устранить перечисленные недостатки.

**1 Трансформатор.** Для сбора и передачи данных на компьютер был разработан программно-аппаратный комплекс, под названием «детектор неисправностей», описание которого представлено в статье [1]. В основе данного устройства лежат два энергометра, которые измеряют ток, напряжение, активную мощность и коэффициент мощности на первичной и вторичной обмотках трансформатора. Алгоритм распознавания МКЗ предусматривает контроль нескольких отношений напряжений, токов, мощностей и коэффициентов мощностей первичной и вторичной обмоток, что снижает вероятность ошибки.

На основании данных исследований был разработан алгоритм, суть которого заключается в детектировании межвиткового короткого замыкания с помощью СНС. Для каждого из отношений формируются изображения, которые затем подаются на входы СНС. Алгоритм состоит из нескольких частей: формирование массива данных; создание изображений; классификация и окончательный анализ.

Для проверки работоспособности предложенного метода было разработано программное обеспечение и проведена серия экспериментов трансформаторах отделений Белорусской железной дороги [1].

Научная и практическая значимость результатов и основных положений исследования состоит в том, что:

– разработанный и апробированный диагностический комплекс обнаружения межвитковых замыканий и дефектов сердечника трансформаторов на основе сверточных нейронных сетей с использованием в качестве исходных данных изображений: графиков отношений напряжений, токов и активных мощностей первичной и вторичной обмоток при работе под нагрузкой; вольт-амперных кривых активной составляющей тока холостого хода; изменений форм фазовых характеристик, числа резонансов и смещения резонансных частот;

– представлена схемотехническая реализация системы диагностирования, реализующая метод обнаружения короткозамкнутых витков в обмотках трансформаторов при работе под нагрузкой и по частотным характеристикам с помощью искусственных нейронных сетей. Средняя точность реализованных архитектур сверточных нейронных сетей на разных наборах данных превысила 0,991.

**2 Асинхронный двигатель.** Для получения входных параметров для нейронной сети для метода обнаружения короткозамкнутых витков при работе под нагрузкой использовались энергометры, а на основе частотных характеристик при МКЗ, МФЗ, дефектах сердечника и обмотки короткозамкнутого ротора, а также повреждениях подшипников использовались метод трех вольтметров или частотомер.

Определение неисправностей подшипников основано на использовании вибродиаграмм при контроле вибрации колесно-моторных блоков локомотивов с помощью виброанализатора СД-21.

Метод обнаружения МКЗ основан на контроле отношений токов и напряжений АД с КЗР, как в режиме холостого хода, так и под нагрузкой. В основе разработанного устройства лежат три энергометра (например, AC communication modules PZEM-004T-100A, которые измеряют ток, напряжение, активную мощность и коэффициент мощности в каждой из фаз АД или мультиметр *Uni-t UT61E+*. Далее полученная информация отправляется через интерфейсы USB-UART на компьютер, где происходит ее обработка.

Искусственно были созданы повреждения изоляции для различного числа витков. Выполнялось контролируемое управление режимами МКЗ (включение, отключение, переключение на различное число витков) с помощью реле, закрепленного на подшипниковой крышке. Основным преимуществом такого подхода является использование сравнительно недорогого оборудования, позволяющего с большой точностью определить один из самых распространенных дефектов электродвигателей. К тому же отслеживание неисправности позволяет постепенно отходить от системы планово-

предупредительных ремонтов, широко распространенных в локомотивных депо, к системе оценки оборудования по фактическому техническому состоянию.

Для установления изменений, происходящих в фазах АЭД при МКЗ, был поставлен рад экспериментов. В качестве испытуемого образца были использованы АД серий 4А и АИР мощностью 0,12; 0,18; 1,5; 1,7 кВт. Проведение эксперимента позволило осуществить следующее:

– понять процедуру действий по предотвращению опасного отказа при возникновении МКЗ;

– определить минимум необходимого оборудования для обнаружения данной неисправности;

– унифицировать проведение диагностики для машин малой, средней и большой мощности.

Повреждение изоляции статорных обмоток контролировалось с помощью измерения сопротивления и составления пропорции для оценки процента короткозамкнутых витков.

Таким образом, при разработке метода обнаружения МКЗ в обмотках трансформаторов и АД при работе под нагрузкой на основе СНС решены следующие задачи [1, 2].

1 Реализованы архитектуры сверточных нейронных сетей с использованием изображений, полученных при работе трехфазного АД под нагрузкой, средняя точность которых на разных наборах данных превысила 0,98.

2 Разработан метод обнаружения межвитковых замыканий в обмотках трансформаторов и АД с помощью искусственных нейронных сетей при работе под нагрузкой и в режиме холостого хода по частотным характеристикам с помощью сверточных нейронных сетей.

3 Представлена схемотехническая реализация системы диагностирования, реализующая метод обнаружения короткозамкнутых витков в обмотках статора асинхронных двигателей.

**Список литературы**

1 **Галушко, В. Н.** Система диагностирования неисправностей трансформаторов на основе сверточных нейронных сетей / В. Н. Галушко, А. В. Дробов, И. Л. Громыко // Энергетическая стратегия. – 2023. – № 4 (94). – С. 46–51.

2 **Галушко, В. Н.** Диагностика асинхронного двигателя с применением виброанализатора и сверточной нейронной сети / В. Н. Галушко, А. В. Дробов, Д. В. Мирош // Энергетическая стратегия. – 2024. – № 1 (97). – С. 38–42.

УДК 533.6.011:004.94

## ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ СЦЕПА ПЛАТФОРМ С ГРУЗАМИ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

*М. Г. ГЕГЕДЕШ*
*Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Республика Беларусь*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

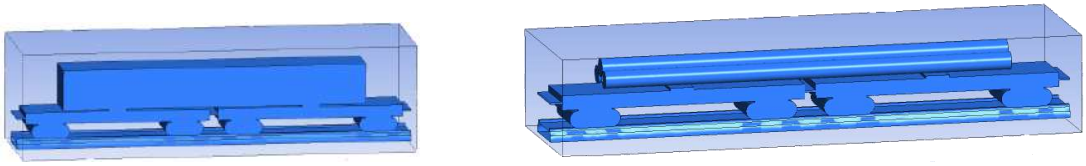
*А. В. ВОРОЖУН*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Аэродинамические характеристики железнодорожных составов являются ключевыми факторами, влияющими на оптимизацию конструкции транспортных средств и обеспечение их безопасной эксплуатации, особенно при движении на высоких скоростях. Обтекающие вокруг вагонов и грузов воздушные потоки могут вызывать дополнительные аэродинамические нагрузки, которые воздействуют на устойчивость состава, параметры сопротивления движению и взаимодействия элементов сцепа вагонов, что необходимо оценивать при анализе динамики подвижного состава.

Целью представленной работы является анализ распределения воздушных потоков вокруг сцепа вагонов с размещенным грузом различной высоты с применением программного комплекса для инженерных расчетов ANSYS.

Разработаны модели сцепа железнодорожных платформ базой 9720 мм без вагонов прикрытия. При этом рассматривались грузы различной конфигурации (рисунок 1, *а*). Произведены расчеты для случаев изменений направлении ветра на угол 30, 45, 60 и 90° по отношению к продольной оси сцепа (рисунок 1, *б*), что позволяет изучить влияние различных атмосферных условий на аэродинамические параметры сцепа.

*а)*



*б)*

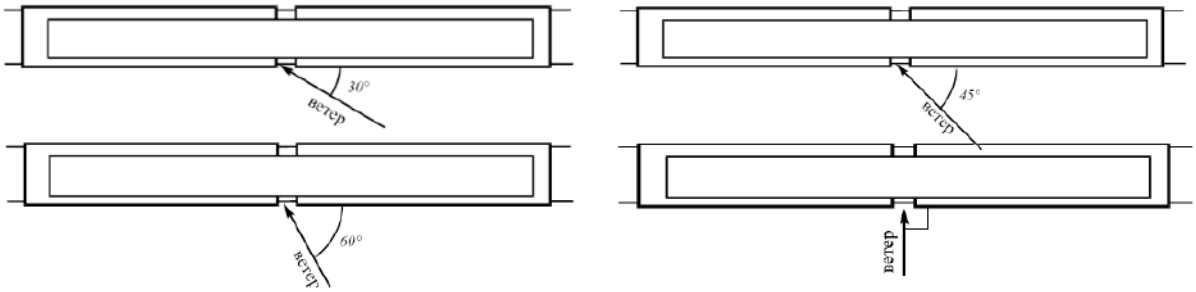
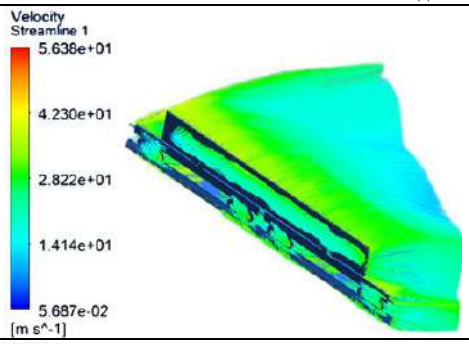
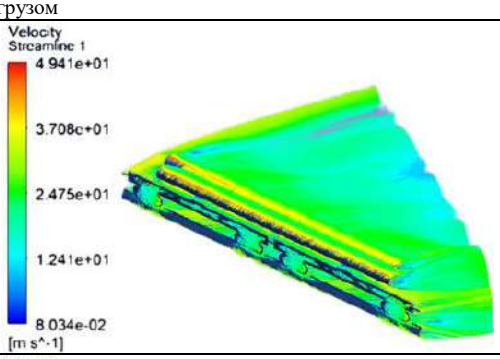
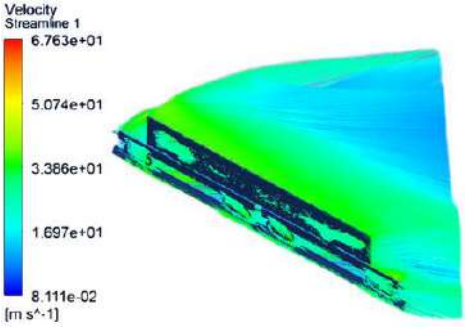
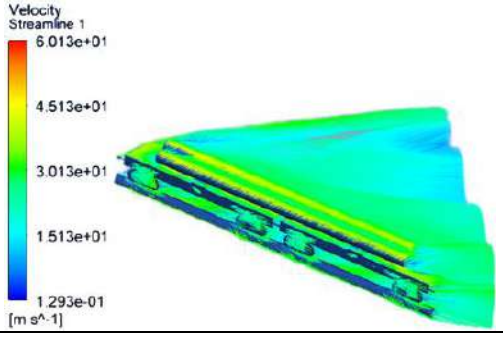



Рисунок 1 – Рассмотренные виды перевозимых грузов (*а*)
и расчетные случаи обтекания сцепа вагонов с грузом воздушными массами (*б*)

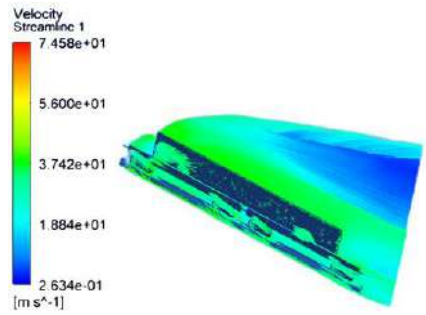
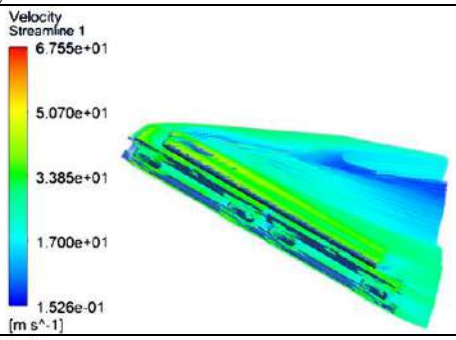
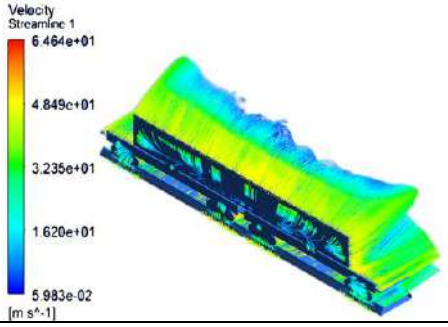
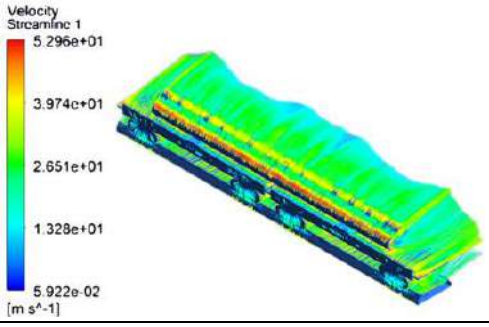
Моделирование выполнено в условиях, приближенных к реальным, с учетом максимальной скорости ветра в регионе (36 м/с). Для боковых и верхней поверхностей расчетной области задано условие открытой границы, значение давления на этой границе принято равным нулю. На поверхности расчетной области (поверхности вагона) использовано условие жесткой стенки, связанное с наличием непроницаемых границ для потока, для которых дополнительно задано условие прилипания, что соответствует равенству нулю скорости потока на границе. Интенсивность турбулентности обратного потока установлена равной 1 %. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Максимальные скорости завихрения достигают при угле атаки 60° и составляют 7,458 м/с для груза с прямоугольной наветренной поверхностью и 6,755 м/с – для цилиндрических грузов; минимальные скорости – при угле атаки 30°: 5,638 м/с – для груза с прямоугольной наветренной поверхностью и 4,941 м/с – для цилиндрических грузов.

*Таблица 1* – **Результаты расчетов скоростей воздушных потоков, огибающих сцеп с грузом**

| Угол атаки | Распределение воздушных масс вокруг сцепа вагонов с длинномерным грузом | |
|---|---|---|
| 30 |  |  |
| 45 |  |  |

*Окончание таблицы 1*

| Угол атаки | Распределение воздушных масс вокруг сцепа вагонов с длинномерным грузом | |
|---|---|---|
| 60 |  |  |
| 90 |  |  |

Таким образом, при изменении угла атаки воздушных потоков по отношению к подвижному составу наблюдаются завихрения, которые приводят к неравномерности нагрузок, действующих на его конструкцию, что может привести к возникновению вибраций и колебаний, а также оказывают влияние на устойчивость поезда, особенно при высоких скоростях движения поезда и перевозке несимметричных, негабаритных и имеющих сложную геометрию грузов. Нестабильные потоки воздуха могут вызывать отклонения от курса, что увеличивает риск аварийных ситуаций.

УДК 629.4.027:004.94

## АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БОКОВОЙ РАМЫ ТЕЛЕЖКИ ВАГОНА

*М. Г. ГЕГЕДЕШ*
*Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Республика Беларусь*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

*Н. В. КОМАРОВСКИЙ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

*Р. В. РАХИМОВ*
*Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан*

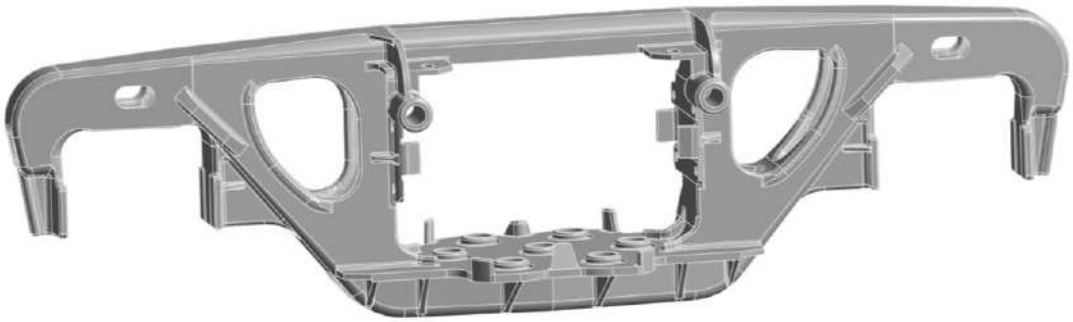
Прочность и надёжность несущих элементов железнодорожного подвижного состава напрямую влияет на безопасность перевозок и долговечность эксплуатации вагонов. Одним из основных конструктивных элементов тележки является боковая рама, воспринимающая нагрузки от кузова вагона и передающая их на буксовые узлы и рельсовый путь. В процессе эксплуатации боковая рама подвергается значительным статическим и динамическим воздействиям, что может приводить к возникновению усталостных повреждений. Для повышения надёжности и сокращения объёмов натурных испытаний на этапе проектирования и прогнозирования остаточной долговечности широко применяется численное моделирование с использованием, например, метода конечных элементов.

Целью представленной работы является сравнение результатов натурных испытаний и конечноэлементных расчетов, полученных с помощью специализированных программных инженерных пакетов.

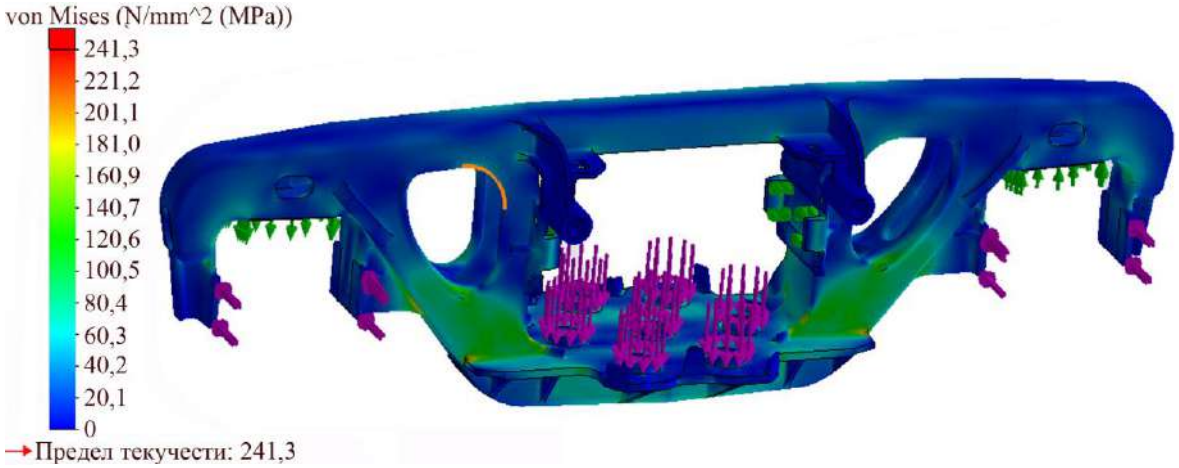
Результаты проведенных испытаний [1] показали, что основные разрушения боковой рамы тележки происходили в области сливного отверстия. Зарождение усталостной трещины наблюдалось в месте перехода закругления рамы к площадке под пружины. В некоторых случаях в изломе также фиксировалось небольшое количество флокенов, а аналогичные повреждения были замечены и на наклонном поясе.

Для отработки методики проведения усталостных испытаний на основе компьютерного моделирования проведено сравнение результатов испытаний, приведенных в [1], с результатами расчетов параметров напряженно-деформированного состояния рассматриваемого конструктивного элемента, полученных посредством компьютерного моделирования в средах SolidWorks и ANSYS Workbench (модуль Static Structural). Конечно-элементные модели боковой рамы тележки в двух указанных программных комплексах были построены на основе предварительно разработанной твердотельной трехмерной модели, включающей основные геометрические элементы реального объекта (рисунок 1, *а*). При разбиении геометрической модели на конечные элементы использованы объёмные тетраэдральные конечные элементы.

*а)*



*б)*




*в)*

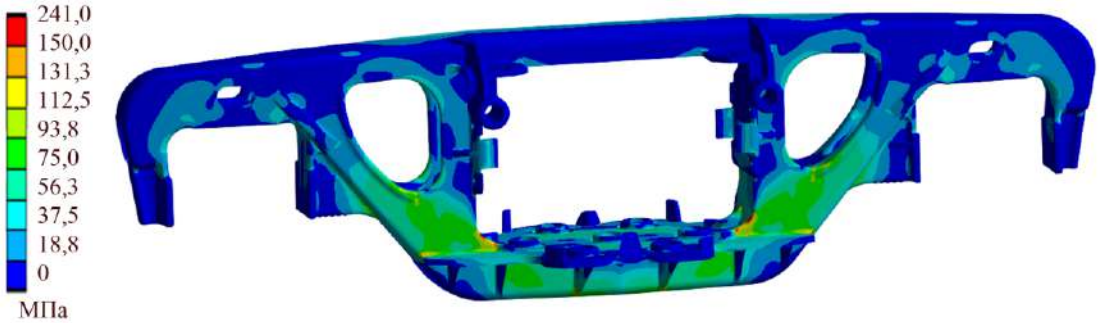



Рисунок 1 – Геометрическая модель (*а*) и результаты расчета эквивалентных (по Мизесу) напряжений в конструкции боковой рамы тележки, полученные в SolidWorks Simulation (*б*) и ANSYS (*в*)

В качестве материала принята конструкционная сталь со следующими характеристиками: модуль упругости $2 \cdot 10^{11}$ Па; коэффициент Пуассона 0,3; предел текучести 241 МПа. Граничные усло-

вия включали закрепления в зонах сопряжения с надрессорной балкой и буксовыми узлами. Нагрузки имитировали действие веса кузова (вертикальная нагрузка, равная 230 кН в зоне установки пружин) и сил взаимодействия с рельсовым путём (боковая нагрузка, приложенная в зонах буксовых узлов и имитирующая воздействие горизонтальных сил от колёсной пары, равная 80 кН) в соответствии с [2].

В результате численного анализа получено распределение эквивалентных напряжений по Мизесу (см. рисунок 1, *б, в*). При этом расхождение в результатах компьютерных расчетов составило менее 0,1 %. А разница с результатами натурных испытаний составляет не более 3 %. Это свидетельствует о том, что применённые подходы компьютерного моделирования могут быть с достаточной точностью и достоверностью использованы при разработке методик усталостных испытаний конструктивных элементов железнодорожного подвижного состава.

**Список литературы**

1 **Комаровский, Н. В.** Усталостные испытания боковых рам и надрессорных балок тележек грузовых вагонов / Н. В. Комаровский, А. Г. Отока, М. Г. Гегедеш // Транспортное машиностроение, 2018. – № 8. – С. 55–65.

2 ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. – Введ. 01.07.2017. – М. : Стандартинформ, 2016. – 58 с.

УДК 539.43:629.423

## ЕДИНЫЙ ПОДХОД К РАСЧЕТУ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ЭКИПАЖНОЙ ЧАСТИ

*Р. В. ГУЧИНСКИЙ*

*ООО «Троицкий крановый завод», Институт Проблем Машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация*

При динамико-прочностных испытаниях в числе прочих показателей оцениваются коэффициенты запаса сопротивления усталости для металлоконструкций вагонов [1]. В нормах для несамоходных вагонов приведены формулы эквивалентного напряжения, позволяющие оценить усталость металлоконструкций в рамках вероятностного подхода. Для локомотивов и моторвагонного подвижного состава данный коэффициент обычно оценивается по более консервативному детерминистическому подходу. В таком подходе наличие напряжений выше предела усталости не предполагается [2]. В вероятностном подходе учитывается история нагружения в виде парциальных долей амплитуд напряжений разного уровня, что делает его более точным в сравнении с детерминистическим подходом. Тем не менее неопределенность в показателе степени кривой усталости и возможность принятия коэффициента запаса в широком диапазоне приводит к менее точным оценкам долговечности конструкций [3]. В соответствии с вероятностным подходом в расчетной оценке решается задача о вынужденных колебаниях металлоконструкций экипажной части, затем амплитуды напряжений группируются по степени частоты их возникновения и строится гистограмма значений напряжений. Для более удобного интегрирования иногда гистограмма описывается функцией распределения случайной величины [4].

В ГОСТ 34939–2023 и ГОСТ 33796–2016 приведена формула для расчета усталости по вероятностному подходу, основанная на принципе линейного суммирования повреждений. Она позволяет рассчитывать вероятность разрушения, ресурс для заданной вероятности или коэффициент запаса:

$$\frac{N_{\text{сумм}}}{N_G} = \frac{a_p}{n_p^{m_1} \cdot \sum_{\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{a\max}} \geq \frac{1}{n_p}} t_i \sum \left( \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{a\max}} \right)^{m_1} + n_p^{m_2} \cdot \sum_{\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{a\max}} < \frac{1}{n_p}} t_i \cdot \left( \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{a\max}} \right)^{m_2}},$$

где $N_{\text{сумм}}$ – общее число циклов; $t_i$ – доля числа циклов, соответствующая $i$-му уровню в блоке нагружения; $N_G$ – число циклов при значении напряжений, равном пределу выносливости детали, соответствующее точке перелома кривой усталости; $a_p$ – критическое значение повреждения; $m_1$ и $m_2$ – степенные показатели для двух участков кривой усталости; $\sigma_{ai}$ и $\sigma_{a\max}$ – амплитуда напряжений

для $i$-го уровня и наибольшая амплитуда в блоке нагружения, соответственно; $n_р$ – предельный коэффициент нагруженности, $n_р = \sigma_{a\max}^{пред} / \sigma_{-1д}$; $\sigma_{a\max}^{пред}$ – наибольшая амплитуда напряжений для предельного блока нагружения.

Гистограмма действующих напряжений в ряде стандартов (ГОСТ 34939–2023, ГОСТ 34093–2017, Нормы для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) от 1983 и 1996 г. (далее – Нормы)) применяется для расчета значения эквивалентного напряжения в блоке $\sigma_{aэ}$. Отношение эквивалентного напряжения к пределу выносливости детали позволяет вычислить коэффициент запаса сопротивления усталости:

$$\tilde{n} = \frac{\sigma_{-1д}}{\sqrt[m]{\frac{N_{сумм}}{N_G}\sum_{\sigma_{ai} \geq \frac{\sigma_{-1д}}{\tilde{n}}} t_i \sigma_{ai}^m}} = \frac{\sigma_{-1д}}{\sigma_{aэ}}. \quad (2)$$

В формуле (2) используется единственное значение показателя степени $m$, соответствующее аппроксимации кривой усталости с одним участком наклона. Величина $\sigma_{aэ}$ может рассматриваться в качестве амплитуды постоянно действующего напряжения, действие которого в пределах числа циклов $N_G$ приводит к такому же повреждению, как и весь блок напряжения длительностью $N_{сумм}$. Также $\sigma_{aэ}$ является величиной напряжения, при достижении которой значения предела усталости общее повреждение, накопленное за $N_{сумм}$. циклов нагружения, равно единице.

В стандартах по оценке динамико-прочностных показателей вероятностный подход для расчета усталости несамоходных вагонов, локомотивов и моторвагонного подвижного состава описан неодинаково. Однако процесс накопления повреждений для разных типов подвижного состава в целом происходит похожим образом, т. к. прежде всего является следствием примерно идентичного спектра нагрузок от пути. Цель данного исследования заключается в разработке единого подхода расчета усталости металлоконструкций всех видов подвижного состава.

По аналогии с уравнением (1) в целях унификации подхода также возможно использование следующей зависимости [5]:

$$\frac{N_{сумм}}{N_G} = \frac{a_p}{\tilde{n}^{m_1} \cdot \sum_{\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{-1д}} \geq \frac{1}{\tilde{n}}} t_i \cdot \left(\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{-1д}}\right)^{m_1} + \tilde{n}^{m_2} \cdot \sum_{\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{-1д}} < \frac{1}{\tilde{n}}} t_i \left(\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{-1д}}\right)^{m_2}}. \quad (3)$$

Зависимость (3) является общей для оценки усталости в рамках вероятностного подхода. Повреждения от различных значений амплитуд напряжений могут суммироваться при имеющемся общем блоке нагружения или отдельно для каждого режима движения, например движения в прямых, кривых участках пути и стрелочных переводах.

В Нормах эквивалентное напряжение и затем коэффициент запаса определяются для кривой усталости с одним наклоном, что соответствует вычислению относительного коэффициента запаса $\tilde{n}$ по уравнению (3). Однако уравнение (3) является более общим, т. к. позволяет оценивать усталость и для билинейной кривой усталости. Также по уравнению (3) можно определить вероятность разрушения для заданного ресурса, или ресурс, соответствующий заданной вероятности разрушения, что отражено в ГОСТ 31846–2012, ГОСТ 33796–2016 и ГОСТ 34939–2023. Расчет ресурса при этом упрощается, т. к. в рамках данного подхода не определяются коэффициент $n_р$ действительный коэффициент нагруженности $n = \sigma_{a\ \max} / \sigma_{-1д}$. Из-за того, что исключается необходимость определения величины $\sigma_{a\ \max}$ и не требуется анализ всех данных динамико-прочностных испытаний для его нахождения, расчет становится более удобным.

Критерий вида (3) исключает необходимость расчета эквивалентного напряжения, позволяет выполнять расчеты для билинейной аппроксимации кривой усталости, а также использовать произвольное значение критического повреждения $a_p$ для вагонов локомотивной тяги, а не только равное единице, как в случае расчета эквивалентного напряжения.

Существующие методики расчета усталости по вероятностному подходу с учетом нерегулярности нагружения в стандартах для разных типов подвижного состава изложены неодинаково. Между тем методика предельного блока и подход эквивалентного напряжения используют одно и то же правило линейного суммирования повреждений.

В работе предложена версия единого критерия, который может быть использован при расчетах усталости по вероятностному подходу для всех типов подвижного состава при расчете срока службы, вероятности разрушения или коэффициента запаса сопротивления усталости. Представлен упрощенный вид критерия, полученный с помощью нормирования действующих амплитуд не по максимальному значению напряжений из блока нерегулярного нагружения, а по значению предела выносливости.

**Список литературы**


1 Пути повышения прочности несущих конструкций экипажей несамоходных пассажирских вагонов / В. В. Кочергин, А. А. Буханцев, О. А. Русанов, К. В. Колесников // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2020. – № 1 (49). – С. 44–49. – EDN: https://www.elibrary.ru/cvbyzi.

2 **Гучинский, Р. В.** Сопоставление детерминистических подходов к оценке усталости сварных соединений экипажной части / Р. В. Гучинский // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2022. – № 3 (59). – С. 50–57. – EDN: https://www.elibrary.ru/awnniv.

3 **Guchinsky, R. V.** Uncertainties in fatigue assessment of structures in design and in service / R. V Guchinsky, S. V. Petinov // Herald of the Ural State University of Railway Transport. – 2021. – Vol. 4. – P. 35–44. – EDN: https://doi.org/10.20291/2079-0392-2021-4-35-44.

4 **Гучинский, Р. В.** Разработка узла конструкции судна по условию усталостной долговечности / Р. В. Гучинский, С. В. Петинов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. –2012. – № 4 (159). – С. 177–186. – EDN: https://www.elibrary.ru/plukcv.

5 **Когаев, В. П.** Прочность и износостойкость деталей машин : учеб. пособие для машиностр. спец. вузов / В. П. Когаев, Ю. Н. Дроздов. – М. : Высш. шк., 1991. – 319 с.


УДК 533.6.011:004.94

## ОБТЕКАНИЕ ПОТОКОМ ВОЗДУХА ВАГОНА-ПЛАТФОРМЫ


*О. В. ДЕМЬЯНЧУК*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*


Аэродинамическое сопротивление составляет значительную долю в общем сопротивлении движению железнодорожного подвижного состава. Развитие цифровизации процессов при эксплуатации транспортных средств требует наличия уточненной информации об аэродинамических силах, действующих на железнодорожный подвижной состав.

В настоящее время неоспоримые преимущества контейнерных перевозок (универсальность использования контейнеров, высокая степень сохранности груза, отсутствие необходимости перегрузки груза) способствовали росту рынка таких перевозок. Для Республике Беларусь также характерна тенденция роста контейнерных перевозок [1].

Увеличение объемов железнодорожных контейнерных перевозок, а также наличие различных вариантов размещения контейнеров на вагонах-платформах вызывают необходимость исследования аэродинамики вагонов-платформ, загруженных контейнерами. Авторами [2] приводится случай, при котором на мосту в результате действия сильного бокового ветра произошло опрокидывание вагонов, загруженных контейнерами, поэтому существует необходимость проведения исследований подобных случаев для предотвращения их возникновения. Оценка по результатам натурных испытаний аэродинамических характеристик погруженных на платформы контейнеров, приведенная в работе [3], позволила установить, что распределение давления на переднюю и заднюю поверхности контейнеров хорошо согласуется с результатами выполненного компьютерного моделирования, которое позволяет выполнять исследования аэродинамики транспортных средств с достаточной точностью при сравнительно невысокой стоимости.

Моделирование обтекания воздушным потоком порожней платформы и платформы, загруженной 40-футовым контейнером, выполнено с использованием программного комплекса ANSYS Fluent при параметрах, установленных в работе [4].

Численное моделирование выполнялось на основе решения уравнения неразрывности и осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса, для замыкания которых была использована модель турбулентности $k$–ε.

Одним из параметров качества конечно-элементной сетки является безразмерное расстояние от стенки $y^+$. Параметр $y^+$ отвечает за использование пристеночных функций в моделях турбулентности и рассчитывается по формуле

$$y^+ = \frac{\Delta y \cdot u_\tau}{\nu},$$

где $\Delta y$ – высота (толщина) элемента, расположенного на стенке; $u_\tau$ – скорость трения (равна корню из отношения напряжения трения на стенке к плотности среды: $u_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho}$); $\nu$ – кинематическая вязкость.

Для модели турбулентности $k$–$\varepsilon$ рекомендуется выдерживать значение параметра $y^+$ в диапазоне 30–300 [5]. На рисунке 1 представлено распределение параметра $y^+$ на поверхности вагона-платформы, из которого видно, что значение данного параметра не превышает 183. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о достаточном уровне точности, который обеспечивается при используемой модели турбулентности.

На основании полученных по результатам моделирования значений аэродинамических сил определены значения коэффициента аэродинамического сопротивления $C_x$, который вычисляется по формуле [6]

$$C_x = \frac{2F}{\rho v^2 A},$$

где $F$ – значение силы, действующей на тело при обтекании его воздухом, Н; $\rho$ – плотность воздуха, кг/м$^3$; $v$ – скорость потока воздуха, м/с; $A$ – площадь поперечного сечения обтекаемого тела, м$^2$.

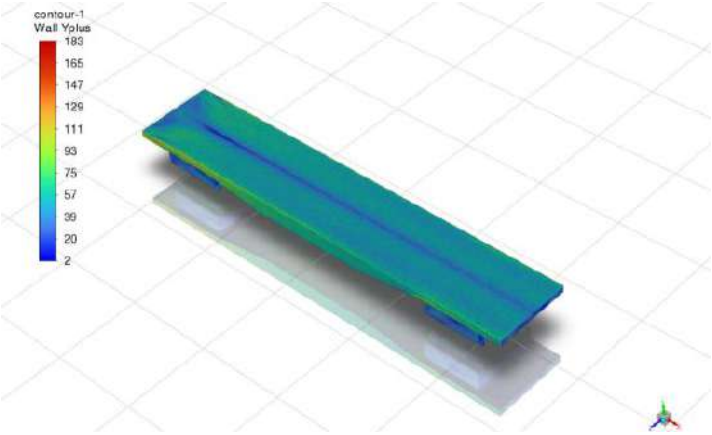



Рисунок 1 – Распределение параметра $y^+$ на поверхности вагона-платформы

Значения коэффициентов аэродинамического сопротивления составили 1,110 и 0,962 для порожней и груженой платформы соответственно. Отметим, что значение силы аэродинамического сопротивления для порожней платформы в 3,5 раза меньше по сравнению с груженой, однако вследствие меньшей площади поперечного сечения коэффициент аэродинамического сопротивления принимает более высокое значение.

Анализ картин линий тока вблизи вагона-платформы показал наличие вихревых потоков за тележками вагона, а для случая платформы, загруженной 40-футовым контейнером, также и в хвостовой части контейнера (рисунок 2).

*а)* *б)*

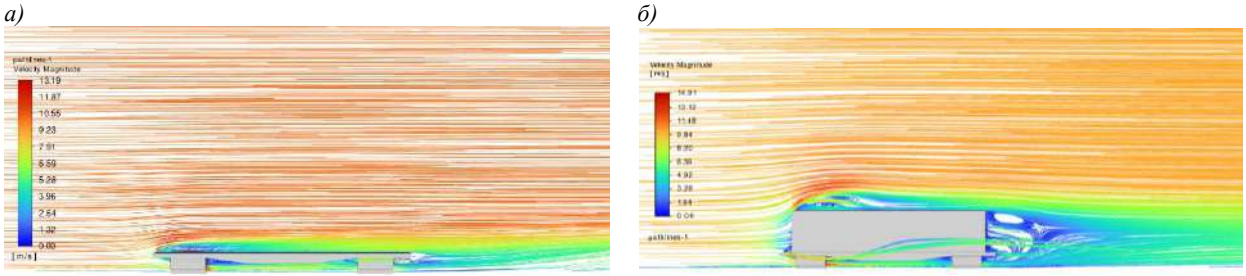


Рисунок 2 – Линии тока вблизи вагона-платформы:
*а* – порожней; *б* – загруженной контейнером

Полученные результаты могут быть использованы при анализе энергоэффективности грузовых перевозок, а также для оценки сил, действующих на контейнеры, с целью подбора рациональных средств крепления.

**Список литературы**


1 **Еловой, И. А.** Развитие железнодорожных контейнерных перевозок в Республике Беларусь / И. А. Еловой, Е. В. Малиновский, С. А. Петрачков // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2018. – № 1 (36). – С. 58–60.

2 **Paul, J. C.** Application of CFD to Rail Car and Locomotive Aerodynamics / J. C. Paul, R. W. Johnson, R. G. Yates // The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Buses, and Trains. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics. – Berlin : Springer, 2009. – Vol. 41. – Pp. 259–297. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-85070-0_25.

3 A field study on the aerodynamics of freight trains / A. Quazi, T. Crouch, J. Bell [et al.] // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2021. – Vol. 209. – Article 104463.

4 **Шимановский, А. О.** Влияние направления воздушного потока на аэродинамические силы, действующие на транспортное средство / А. О. Шимановский, О. В. Демьянчук // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2025. – Т. 84, № 2. – С. 81–91.

5 **Kedare, S. B.** Computational fluid dynamics analysis of empty railway freight wagons / S. B. Kedare, S. C. Sharma, S. P. Harsha // International Journal of Vehicle Structures and Systems. – 2015. – Vol. 7, is. 1 – P. 25–30. – DOI: https://doi.org/10.4273/ijvss.7.1.05.

6 Effects of different aerodynamic configurations on crosswind stability of a conventional train / C. E. A. Reyes, D. Rocchi, G. Tomasini [et al.] // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2023. – Vol. 242. – Article 105588.


УДК 621.3.014.3

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПУСКОВОГО ТОКА СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТИЛЬНИКОВ ПРИ НЕПОЛНОТЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ


*И. С. ЕВДАСЕВ*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*


Пусковой ток (inrush current в терминах IEC 60050-448) – ток переходного процесса, связанный с подачей напряжения питания на электрическое оборудование (в российской версии этого документа используется термин «бросок тока» [1]). В задачах проектирования и эксплуатации электросетей и энергетических систем под пусковыми токами понимают только их часть, которая относится к сверхтокам, т. е. превышают номинальные токи оборудования. Оценка этих токов необходима для обеспечения надежности электроснабжения потребителей и недопущения неплановых отключений электросетей по причине ложных срабатываний аппаратов защиты.

Применительно к осветительным приборам характеристики пускового тока обусловлены несколькими различными физическими процессами и зависят от довольно большого числа факторов, включающих:

а) вид источника света и пускорегулирующего аппарата;

б) наличие емкостных элементов компенсации реактивной мощности, сдвига фаз или снижения пульсаций выпрямленного напряжения;

в) сопротивления цепи питания;

г) времени задержки включения от момента прохождения синусоиды переменного напряжения через нуль;

д) другие факторы.

Все перечисленные факторы в практических задачах учесть крайне трудоемко, поэтому большей частью из них пренебрегают, а пусковой ток моделируют одиночными импульсами:

1) большой амплитуды от 10 до 250 кратности номинального тока, но короткими по продолжительности – меньше 0,01 с (рядом производителей автоматических выключателей принимается меньше 0,005 с по причине максимальной амплитуды импульса тока при включении осветительного прибора в момент максимума синусоиды напряжения);

2) относительно небольшой амплитуды от 1,1 до 1,6 (для светодиодных осветительных приборов до 2) кратности номинального тока с продолжительностью от сотых секунд до десятков минут, который представляет замену фактического периодического тока 50 Гц апериодическим с равной работой за целое число периодов напряжения.

Первый тип импульсов характерен для изменения сопротивлений вольфрамовой нити накаливания, индуктивности пускорегулирующих аппаратов или заряда конденсаторов и моделируется с

учетом принципов работы электромагнитных расцепителей аппаратов защиты. Второй тип импульсов обусловлен нелинейным сопротивлением газового разряда или процессами при запуске преобразователя в электронном пускорегулирующем аппарате (обычно происходит с паузой после первого пускового импульса) [2], как правило, следует учитывать по тепловому воздействию на элементы электросети и аппараты защиты.

В практических задачах необходимо обратить внимание на объем информации по пусковому току, который может быть представлен производителем осветительных приборов на основе измерений. Согласно методике измерений ПНСТ 639-2022/МЭК 63129:2020 [3] пусковой ток осветительного прибора нормируется двумя величинами: пиковым значением импульса и длительностью по уровню 50 % от пикового значения.

Для импульсов второго типа, которые по длительности больше одного полупериода напряжения в электросети, значение пускового тока принимается равным пиковому значению импульса.

Как следствие отсутствия нормативных методик по определению пускового тока для коротких импульсов первого типа, в практических задачах приходится иметь дело с неполнотой исходной информации. В зависимости от объема принимаемых допущений ранжируем методики по степени снижения достоверности результата:

1) на основе зависимости ABB Group при известных значениях пикового тока и длительности импульса по уровню 50 %;

2) по статистической зависимости времени импульса от мощности осветительного прибора при известном значении пикового тока;

3) по статистической зависимости коэффициента пускового тока от мощности светодиодного осветительного прибора.

Методика на основе зависимости ABB Group (характеристике срабатывания модульных автоматических выключателей серии S200 от импульсных токов) довольно широко известна [2], поэтому на ней подробно останавливаться не будем.

В неблагоприятных вариантах при частичном или полном отсутствии информации о характеристиках импульса пускового тока от производителя осветительного прибора можно рекомендовать статистические зависимости, которые получены на основе выборки 250 серий электронных пускорегулирующих аппаратов (отдельные серии включают несколько моделей с идентичными характеристиками пускового и номинального токов) производства Mean Well, Tridonic, Inventronics, Sosen, Philips, Helvar, Moons'. Пример такой зависимости для случая  полном отсутствии информации о характеристиках импульса пускового тока приведен на рисунке 1.

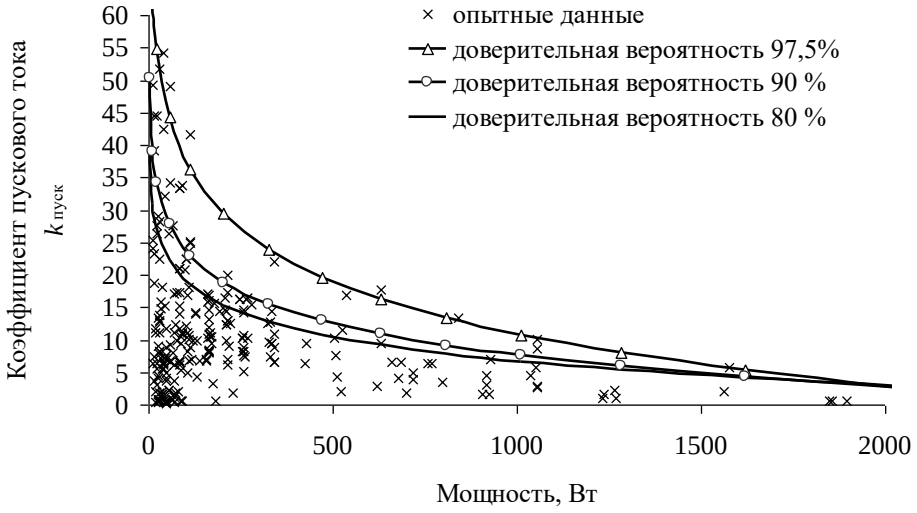



Рисунок 1 – Зависимость коэффициента пускового тока (отношения пускового тока к номинальному) от мощности светодиодного осветительного прибора

Выбор уровня доверительной вероятности зависит от потенциального риска при ложном срабатывании автоматического выключателя и отсутствии света на объекте в течение времени, которое необходимо для включения выключателя персоналом вручную. Для рабочего освещения целесообразно принимать уровень доверительной вероятности 70 или 80 %, а для аварийного освещения – 95 %.

Уровни доверительной вероятности могут быть повышены исходя из фактической оценки рисков на объекте. Необходимо помнить, что необоснованное завышение уровней доверительной вероятности приводит к перерасходу материальных и финансовых средств в целом на осветительную электросеть, так как жесткие ограничения количества защищаемых осветительных приборов одним автоматическим выключателем может привести к необходимости увеличения как самих аппаратов защиты, так и линий электропередачи.

**Список литературы**

1 ГОСТ IEC 60050-441-2015. Международный электротехнический словарь. Часть 441. Аппаратура коммутационная, аппаратура управления и плавкие предохранители (IEC 60060-441:1984, Amd 1:2000, IDT) – Введ. 01.05.2017. – URL: https://meganorm.ru/Data2/1/4293758/4293758679.pdf (дата обращения: 07.06.2025).

2 **Пономарев, Д. В.** Пусковые токи led-драйверов, их значение и измерение / Д. В. Пономарев / ООО «ПТК ''АРГОС-ЭЛЕКТРОН''».– URL: https://argos-electron.ru/news/puskovye_ toki_led_ drayverov_ikh_znachenie_i_izmerenie/ (дата обращения: 07.06.2025).

3 ПНСТ 639-2022/МЭК 63129:2020. Светотехнические изделия. Методы измерения пусковых токов. – Введ. 28.02.2022. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200183404 (дата обращения: 07.06.2025).

УДК 621.3

# МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ ВИТКОВ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА

*Д. В. ЕРМОЛЕНКО, В. Н. ГАЛУШКО*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В настоящее время большáя часть трансформаторов системы электроснабжения Республики Беларусь и асинхронных двигателей (АД) отработали установленный срок службы. Многие из таких трансформаторов и АД могли бы эксплуатироваться еще длительное время, однако в этом случае должны предъявляться повышенные требования к методам диагностики их технического состояния.

В настоящее время перспективным методом диагностики состояния трансформатора является метод частотных характеристик (FRA). Использование частотной характеристики для диагностики трансформатора было описано в статье [2]. Данный метод заключается в сравнении «фазовых портретов» трансформатора при различных технических состояниях. Однако данный метод не позволяет определить ни протяженность повреждения, ни его тип, поэтому нуждается в дальнейшей доработке.

Используя различные измерители иммитанса (например, Е7-30 или HM8118), можно непосредственно получить амплитудно-частотные (импедансные) $Z(\omega)$ и фазочастотные $\varphi(\omega)$ характеристики трансформаторов. При отсутствии таких приборов на практике можно использовать различные косвенные методы определения комплексных сопротивлений (или проводимостей) для каждой частотной составляющей сигнала с учетом их результирующей погрешности измерений.

Для проведения частотного анализа, был использован метод трех вольтметров, подробно описанный в статье [1].

Для построения частотных характеристик используются четыре мультиметра В7-68 (один используется как частотомер, а другие – как вольтметры), задающий генератор сигналов Г3-112 и резитор *r* на 4,5 Ом.

С помощью магазина измерительных сопротивлений выполнялось изменение сопротивления в широких пределах: от 0,1 Ом до 100 кОм для имитации различного состояния обмоток (МКЗ, межфазном КЗ) и сердечника. Эксперименты с трансформаторами проводились в лаборатории кафедры электротехники Белорусского государственного университета транспорта.

При разработке универсальной диагностической системы необходимо учитывать не только данный фактор, но и разброс в значениях по каждой из фаз. Поэтому если исходное измерение частотных характеристик отдельных фаз исследуемого трансформатора отсутствует, то можно

выполнить сравнение с частотной характеристикой, полученной на другом трансформаторе той же серии (изготовленном по тем же чертежам и тем же заводом-изготовителем). Следует отметить, из-за возможных отличий в конструкции обмоток даже в случае одного завода-изготовителя (например, модернизации серии), в том числе для однотипных трансформаторов, результаты экспериментов частотных характеристик могут отличаться.

1 **Трансформатор.** Полученные изображения могут использоваться после нормировки в качестве исходных данных для искусственных нейронных сетей. Особое внимание требуется уделить таким факторам в порядке их значимости, как форма фазовых характеристик, амплитуды резонансов, смещения резонансных частот и число резонансов, связав их с требуемой детализацией при классификации неисправностей.

На основании экспериментов можно сделать следующие выводы:

– наиболее значимые изменения присущи первому «резонансу» до достижения частоты 50 кГц;

– апмлитуда первого «резонанса» импедансных характеристик снижается по мере уменьшения сопротивления между фазами до наступления полного межфазного КЗ;

– фазочасточные характеристики отличаются значимым изменением формы кривой и сдвигом частоты в большую сторону для первого «резонанса»;

– характер изменения фазочасточных характеристик отличается снижением фазы первого «резонанса» до 5 кОм, а затем увеличением емкостной составляющей до нескольких Ом при межфазном КЗ.

Сравнительный частотный анализ межфазного КЗ и межвиткового КЗ трансформатора указывает на следующие отличия:

– для межвиткового КЗ наблюдается значительный сдвиг первой резонансной частоты импедансной характеристики;

– форма фазочасточных характеристик значительно отличается;

– для фазочасточной характеристики регистрируется классификационный диапазон на частотах 75–90 кГц.

2 **Асинхронный двигатель.** Для получения входных параметров для нейронной сети для метода обнаружения короткозамкнутых витков при работе под нагрузкой использовались энергометры, а на основе частотных характеристик при МКЗ, МФЗ, дефектах сердечника и обмотки короткозамкнутого ротора, а также повреждениях подшипников использовались метод трех вольтметров или частотомер.

Определение неисправностей подшипников основано на использовании вибродиаграмм при контроле вибрации колесно-моторных блоков локомотивов с помощью виброанализатора СД-21.

На основании импедансных характеристик (рисунок 1) при МКЗ для АД с КЗР можно сформулировать следующие выводы:

– для неповрежденных фаз (в наших экспериментах для удобства представления А и С) происходит уменьшение частоты первого «резонанса»;

– для поврежденной фазы (В) происходит снижение амплитуды первого «резонанса».

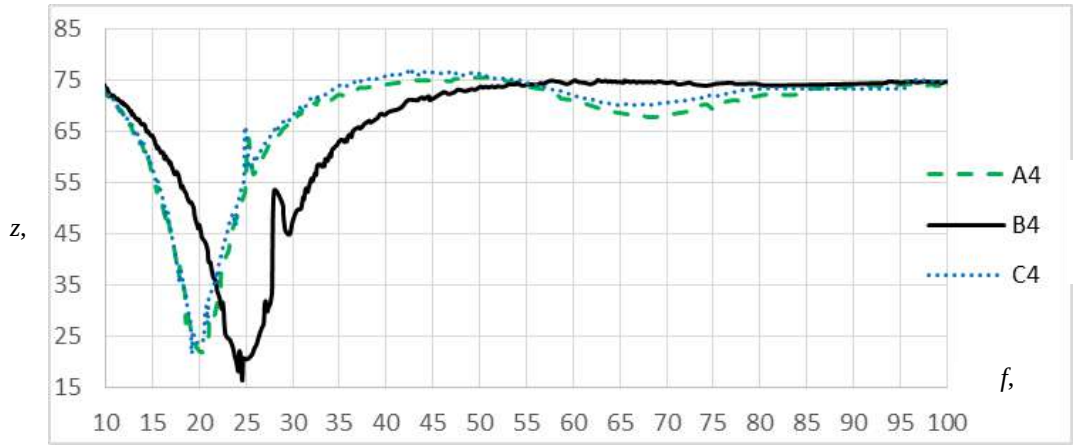



Рисунок 1 – Фазочастотные характеристики при МКЗ фазы В АД

Алгоритм обнаружения поврежденной обмотки и оценки степени повреждения с помощью импедансных и фазочастотных характеристик АД с КЗР – снижение амплитуды импедансной и увеличение частоты первого «резонанса» фазочастотной характеристик.

На основании приведенных результатов измерений наиболее распространенных повреждений или направленности развития неисправностей изоляции обмоток и состояния сердечника наибольшие изменения в импедансных и фазочастотных характеристиках связаны со следующими параметрами: апмлитудой первого «резонанса» импедансных характеристик и сдвигом его частоты; формой фазочасточных характеристик.

Сравнительный анализ частотных характеристик однофазных и трехфазных трансформаторов, а также для АД при диагностировании предотказных состояний и отказов авторы используют в качестве основы при создании универсальной диагностической системы определения и классификации неисправностей на основе сверточных нейронных сетей. В результатах работы могут быть заинтересованы энергетические предприятия Республики Беларусь.

**Список литературы**

1 **И. Л. Громыко.** Метод неразрушающего контроля состояния однофазных и трёхфазных трансформаторов на основе частотных характеристик / И. Л. Громыко, В. Н. Галушко // Приборы и методы измерений. – 2025. – Т. 16, № 2. – С. 158–167. – DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-158-167.

УДК 621.332:625.42

# ВЫПОЛНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ТОКОПРИЕМНИКЕ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА МЕТРОПОЛИТЕНА

*В. А. ЗАГОРЦЕВ, О. С. АНАНЬЕВА*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

С развитием железнодорожного транспорта и, в частности, в связи с электрификацией участков железных дорог возникла потребность в определении весовых норм грузовых поездов, формировании графиков движения, выполнении требований безопасности движения, а также другие значимые вопросы. В процессе поиска ответов возникла дисциплина «Теория локомотивной тяги», результатом деятельности которой стали «Правила тяговых расчетов».

При электрификации железных дорог, а также городского транспорта необходимо выполнение электрических расчетов, целью которых является выбор основных элементов системы тягового электроснабжения (СТЭ). Для определения нагрузки этих элементов необходимы тяговые расчеты для планируемых к эксплуатации типов электроподвижного состава как грузового, так и пассажирского, особенно в случае высокоскоростного пассажирского движения. Итоговый результат тяговых расчетов, необходимый для выполнения электрических – это зависимость тока поезда от его относительной координаты. На основании этих данных для заданных типов поездов, формируется необходимый график их движения по электрифицируемому участку и определяются нагрузки элементов СТЭ.

При выполнении тяговых расчетов ток поезда в общем случае определяется его скоростной характеристикой (зависимостью тока поезда, от скорости его движения), которая приводится для некоторого «номинального значения напряжения» на токоприемнике электрического локомотива, например, 25000 В (50 Гц) переменного или 3000 В постоянного тока для электрифицированных железных дорог, или 750 В постоянного тока – для моторвагонного подвижного состава метрополитена. При этом на практике уровень напряжения на токоприемнике изменяется в широких пределах, в зависимости от величины нагрузки СТЭ и режимов работы электроподвижного состава.

Поезд, двигаясь по перегону, преодолевает силы сопротивления движению, то есть расходует определенную электрическую мощность, которая на постоянном токе будет определяться текущим режимом движения (величиной потребления тока) и уровнем напряжения на токоприемнике. В зависимости от типа привода (коллекторный постоянного тока или асинхронный) влияние изменения напряжения на токоприемнике локомотива на его параметры будут отличаться: для коллекторного привода уменьшение уровня напряжения приводит к снижению скорости движения на текущей позиции контроллера машиниста, тогда как для асинхронного тягового привода, в котором используются

преобразователи с плавным регулированием амплитуды и частоты напряжения, подаваемого на двигатели, изменение напряжения приведет к изменению потребляемого тока пропорционально текущей электрической мощности, потребляемой при движении на выбранной позиции контроллера. То есть выходит, что в случае отличия напряжения на токоприемнике от номинального значения ток, потребляемый поездом, также необходимо корректировать.

Для некоторой оценки величины отличия нагрузки элементов СТЭ при использовании «номинальных» характеристик потребляемого тока, а также для варианта «корректировки» тока с учетом изменения напряжения на токоприемнике (пропорционально потребляемой электрической мощности) были выполнены тяговые и электрические расчеты на примере участка Минского метрополитена. В рамках разработки программного обеспечения по расчету режимов совместной работы электрического подвижного состава и систем тягового электроснабжения [1] была реализована возможность учета изменения напряжения на токоприемнике электроподвижного состава с дальнейшим определением параметров работы СТЭ.

В разработанной модели был реализован следующий алгоритм учета изменения напряжения на токоприемнике:

– тяговые расчеты выполняются предварительно, и для каждого типа поезда определяется зависимость потребляемого тока от его относительной координаты при номинальном напряжении на токоприемнике 750 В;

– далее формируется мгновенная схема замещения участка электроснабжения, и для каждой итерации расчета (например, с шагом 0,25 с) определяются координаты положения поездов и потребляемые токи согласно графику движения;

– для варианта *без корректировки тока* поезда расчеты выполняются, пока не завершится установленное время моделирования (например, 2 часа), а для варианта *с корректировкой тока* поезда на первой итерации расчета токи поездов не корректируются и принимаются по результатам тяговых расчетов (при номинальном напряжении на токоприемнике).

После расчета мгновенной схемы замещения определяются токи и напряжения в ее элементах, а также на электрических нагрузках – токоприемниках поездов. Полученные значения напряжения на токоприемниках сохраняются для каждого поезда, и уже на следующей итерации расчета значения тока, потребляемого поездом по результатам тягового расчета, корректируются пропорционально отличию напряжения на токоприемнике относительного номинального значения в 750 В. В таблице 1 приведены результаты электрических расчетов для четырех совмещенных тяговых подстанций (СТП) и параллельного графика движения поездов с интервалом 82 с (44 пары поездов в час) за время моделирования, равное двум часам.

*Таблица 1* – **Результаты электрических расчетов**

| Параметр | Без корректировки тока | | | С корректировкой тока | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Изменение напряжения на шинах 10 кВ всех СТП, % (от номинального) | –5 | 0 | 5 | –5 | 0 | 5 |
| Расход электрической энергии по результатам тяговых расчетов (при номинальном напряжении на токоприемнике 750 В), кВт·ч | 13574 | 13574 | 13574 | 13574 | 13574 | 13574 |
| Расход электрической энергии по результатам электрических расчетов (с учетом реального напряжения на токоприемнике), кВт·ч | 13510 | 14260 | 15009 | 13557 | 13564 | 13571 |
| Суммарный расход электрической энергии на шинах 825 В всех СТП, кВт·ч | 14438 | 15196 | 15807 | 14389 | 14302 | 14230 |
| Минимальное напряжение на токоприемнике, В | 665 | 706 | 747 | 644 | 698 | 749 |
| Отличие расхода электроэнергии потребленной на тягу по результатам тяговых и электрических расчетов, % | –0,48 | 4,81 | 9,56 | –0,13 | –0,08 | –0,02 |
| Потери в тяговой сети, % | 6,43 | 6,16 | 5,05 | 5,78 | 5,16 | 4,63 |

Изменение уровня напряжения на шинах 10 кВ (см. таблицу 1) влияет на уровень напряжения в тяговой сети для электроподвижного состава, поэтому, изменяя этот параметр, можно выполнить сравнение двух режимов электрических расчетов («без корректировки тока» и «с корректировкой тока»). Как видно из таблицы 1, уменьшение напряжения на шинах 10 кВ СТП приводит к уменьшению среднего напряжения на токоприемниках (возникают максимальные его просадки), из-за чего отличие в расходах электрической энергии на тягу по результатам тяговых и электрических расчетов минимально. Это позволяет сделать вывод, что уровень реально-

го напряжения на токоприемниках близок к номинальному. В свою очередь установка напряжения +5 % на шинах СТП приводит к достаточно большому отличию в потреблении электроэнергии, и оно оказывается завышенным почти на 10 %. То есть нагрузка элементов СТЭ также оказывается завышенной, что может сказаться на итоговом выборе ее основных элементов.

Выполнение электрических расчетов «с корректировкой тока поезда» позволяет исключить завышение нагрузки элементов СТЭ при изменении уровня напряжения в тяговой сети как в случае его корректировки регулированием на стороне 10 кВ СТП, так и в случае отличия параметров смежных тяговых подстанций (например, мощности коротких замыканий).

**Список литературы**

1 **Загорцев, В. А.** Разработка имитационной модели системы тягового электроснабжения / В. А. Загорцев, О. С. Ананьева, В. Н. Подольская // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. (Гомель, 24–25 ноября 2022 г.) : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2022. – С. 119–121.

УДК 621.311:625.42

## ПРИМЕНЕНИЕ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ МЕТРОПОЛИТЕНА

*В. А. ЗАГОРЦЕВ, В. Н. ПОДОЛЬСКАЯ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Исследование эффективности применения накопителей электрической энергии (НЭЭ), как в системах тягового электроснабжения (СТЭ), так и на электрическом подвижном составе (ЭПС) является актуальной тематикой многих научно-исследовательских работ, выполняемых в настоящее время. Не стала исключением и данная работа, в рамках которой исследовалась эффективность применения накопителей на ЭПС постоянного тока метрополитена.

Как известно, при рекуперативном торможении электрическая энергия, вырабатываемая тяговыми электродвигателями, возвращается с токоприемника электрического локомотива в контактную сеть. При этом ее потребителями могут выступать другие локомотивы, работающие в режиме тяги в зоне питания тяговой подстанции и нетяговые потребители, получающие питание от тяговой сети. В случае избытка рекуперируемой электроэнергии или при отсутствии потребителей происходит ее поступление в систему внешнего электроснабжения из тяговой сети [1]. На Минском метрополитене, на примере которого выполнялись тяговые и электрические расчеты, возврат энергии рекуперации в систему внешнего электроснабжения невозможен, так как на тяговых подстанциях установлены выпрямительные агрегаты, без возможности инвертирования мощности от тяговой сети. Поэтому для данного типа систем тягового электроснабжения (СТЭ) наиболее актуальными могут быть следующие способы сохранения и использования энергии рекуперации: установка накопителей на электрическом подвижном составе, на совмещенных тяговых подстанциях (СТП) или на межподстанционной зоне. В рамках разработки программного обеспечения по расчету режимов совместной работы ЭПС и систем тягового электроснабжения [2] была реализована возможность моделирования НЭЭ на электроподвижном составе, с дальнейшим определением параметров работы СТЭ.

В разработанной модели был реализован следующий алгоритм применения НЭЭ:

– за основу был принят НЭЭ с параметрами, схожими с реальным прототипом, использовавшимся в работе [3];

– заряд и разряд НЭЭ происходил с некоторыми потерями (принято 15 % [3]), а также было установлено ограничение по максимальному разрядному току (4000 А), т. е. в случае если ток поезда превышал данное ограничение, недостающее количество потреблялось из тяговой сети;

– процесс заряда НЭЭ происходил в режиме рекуперативного торможения и показан на рисунке 1, *а*, где отрицательное значение тока $I_{НЭЭ}$ соответствует заряду НЭЭ, при этом напряжение $U_{НЭЭ}$ увеличивается;

– разряд НЭЭ происходил при движении поезда в режиме тяги (при разгоне поезда со станции после остановки), при этом положительное значение тока $I_{НЭЭ}$ (см. рисунок 1, *а*) и уменьшение напряжения $U_{НЭЭ}$ свидетельствуют о разряде накопителя;

– при выполнении моделирования, батареи НЭЭ приняты незаряженными и энергия, запасаемая в них, поступала только при рекуперативном торможении при остановках. Энергия, запасенная в НЭЭ, использовалась при разгоне поезда в случае, если накопитель был до этого заряжен, а по окончании заряда поезд разгонялся потребляя энергию из контактной сети. На рисунке 1, *б* показан такой случай: можно увидеть что при использовании НЭЭ на электроподвижном составе ток тяговой подстанции начинает потребляться только после того, как батарея НЭЭ будет разряжена, тогда как без НЭЭ загрузка подстанции начинается с момента трогания поезда со станции.

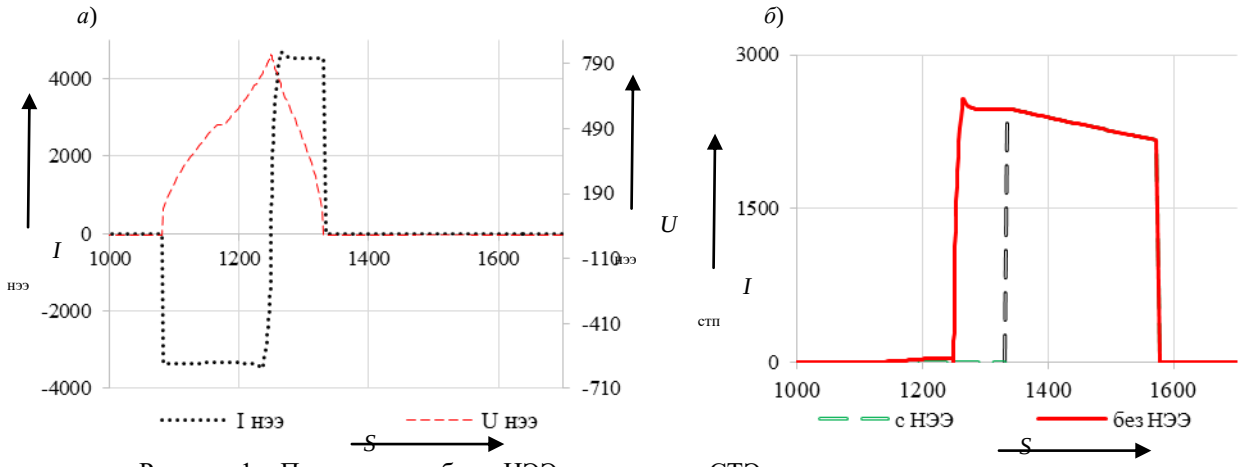



Рисунок 1 – Параметры работы НЭЭ и элементов СТЭ при движении поезда по участку:
*а* – параметры работы НЭЭ; *б* – ток 311 СТП

Для оценки эффективности применения НЭЭ были выполнены тяговые и электрические расчеты для участка Минского метрополитена: количество СТП – 4; 14 питающих и 8 отсасывающих фидеров; марка питающих кабелей – ВБВнг (А)-LS-3, кабелей сети отсоса – ВБВнг(А)-LS-1 (с допустимыми длительными токами для сечений: 760 А / 300 мм$^2$; 894 А / 400 мм$^2$; 1054 А / 500 мм$^2$); тип выпрямительных агрегатов – В-ТПЕД 1,6к-825В М2; тип тяговых трансформаторов – ТСПЗГЛ-1600/10; погонное сопротивление контактного и ходовых рельсов при температуре рельсов 40 ºС – 0,021 Ом/км. В качестве электрического подвижного состава был принят 5-вагонный состав массой 225 т, состоящий из моторных вагонов серии М110/111 Швейцарской компании *Stadler*, следующий с интервалом 82 с (44 пары поездов в час), время стоянки на конечных и промежуточных станциях – 30 с. График движения поездов принят детерминированным, чтобы получить более корректное сравнение результатов с использованием НЭЭ на ЭПС и без НЭЭ.

В качестве исследуемых параметров элементов СТЭ определялись: эффективные токи СТП (токи тяговых трансформаторов за интервалы усреднения (2 ч, 75 с, 10 с, 5 с) и эффективные токи преобразовательных агрегатов за интервалы усреднения (2 ч, 75 с, 40 с, 10 с), эффективные токи питающих и отсасывающих фидеров (нагрузки кабелей) на интервале усреднения 2 ч.

В качестве расчетных режимов рассматривались [4]: *нормальный режим работы* участка метрополитена (напряжение холостого хода подстанции соответствует: для рассчитываемой подстанции 105 % номинального напряжения на шинах 10 кВ, для остальных подстанций – 100 % номинального); *аварийный режим работы* СТП с отключением одного преобразовательного агрегата на расчетной СТП; *проверка уровня напряжения на токоприемниках ЭПС*.

По итогам моделирования для *нормального режима работы* были получены следующие результаты: при использовании НЭЭ на электрическом подвижном составе уменьшаются эффективные токи преобразовательных агрегатов СТП и, как следствие, преобразовательных (тяговых) трансформаторов. Для трансформатора уменьшение нагрузки составило порядка 21,8 %, для преобразовательного агрегата – 26,3 %, для питающих фидеров (кабельных присоединений) максимальное уменьшение составило 41,3 %, а для отсасывающих – 37,2 %.

Следует отметить, что потенциальный эффект от применения НЭЭ на ЭПС может быть весьма весомым в плане требований к параметрам СТЭ, но при этом усложняется конструкция ЭПС и, как следствие, снижается надежность его работы.

**Список литературы**

1 **Загорцев, В. А.** Оценка эффективности применения рекуперативного торможения на железнодорожном транспорте / В. А. Загорцев, Н. С. Чуешков // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию БелИИЖТа – БелГУТа (Гомель, 16–17 ноября, 2023 г.) : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2023. – С. 35–36.

2 **Загорцев, В. А.** Разработка имитационной модели системы тягового электроснабжения / В. А. Загорцев, О. С. Ананьева, В. Н. Подольская // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. (Гомель, 24–25 ноября, 2022 г.) : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2022. – С. 119–121.

3 **Плетнев, Д. С.** Бортовой накопитель энергии на электроподвижном составе метрополитена: дис. ... канд. техн. наук : 2.4.2 / Д. С. Плетнев ; РУТ(МИИТ). – М., 2024. – 176 л.

4 СН 3.03.05-2020. Строительные нормы Республики Беларусь. Метрополитены. – Введ. 28.12.2023. – Минск : Минстройархитектуры, 2024. – 99 с.

УДК 006.015.8:625.1

# АКТУАЛИЗАЦИЯ ТРЕБОВАНИЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ СЕРТИФИКАЦИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ПРОДУКЦИИ

*В. С. ЗАЙЧИК, А. А. КЕБИКОВ, М. А. РОГОВЕНКО*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В настоящее время на всей территории Евразийского экономического союза (далее – ЕАЭС) оценка соответствия железнодорожной продукции требованиям безопасности осуществляется в соответствии с техническими регламентами ТР ТС 001/2011 «О безопасности железнодорожного подвижного состава» и ТР ТС 003/2011 «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта» [1, 2]. Указанные технические регламенты содержат исчерпывающие требования безопасности, соблюдение которых является обязательным на всех стадиях жизненного цикла подвижного состава и его составных частей, а также элементов составных частей подсистем инфраструктуры железнодорожного транспорта.

ТР ТС 002/2011 «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта» [3] устанавливает отдельные требования к подвижному составу и элементам инфраструктуры высокоскоростного железнодорожного транспорта, что особенно актуально при проектировании и перспективном строительстве высокоскоростных магистралей на территории ЕАЭС.

Вместе с тем идеология построения технических регламентов предусматривает установление базовых требований безопасности, которые не всегда установлены в тексте самого нормативного документа. Таким образом, требования безопасности [1–3] могут быть классифицированы на три группы:

1) применяемые напрямую из [1–3];

2) применяемые частично вместе с требованиями безопасности поддерживающих [1–3] технических нормативных правовых актов (далее – ТНПА);

3) применяемые через требования безопасности, установленные в поддерживающих ТНПА.

Примером требования безопасности первой группы является п. 73 [1], в котором установлено прямое требование взрывобезопасности аккумуляторного бокса.

Ко второй группе относится, например, требование маркировки составных частей железнодорожного подвижного состава (п. 101 [1]), которое требует обязательного наличия:

– единого знака обращения на рынке ЕАЭС;
– наименования изготовителя;
– наименования продукции;
– обозначения продукции в соответствии с конструкторской документацией;
– даты изготовления.

Однако требования п. 101 [1] могут быть недостаточны для некоторых видов продукции, и дополнительные требования к маркировке могут быть описаны в поддерживающих ТНПА. Так, поддерживающий по отношению к [2] ГОСТ 33184-2014 [4], в п. 5.2.1 и 5.2.3 устанавливает следующие дополнительные требования по маркировке:

– сорт накладок;
– масса партии в тоннах;

– номер партии;

– клеймо службы технического контроля и представителя владельца инфраструктуры.

И наконец, самой распространенной и тяжелой для применения является третья группа, в которой, собраны требования от самых простых по трактовке (например, п. 13а [1] «соблюдение габарита железнодорожного подвижного состава») до сложнейших и многогранных (например, п. 13н [1] «электромагнитная совместимость электрооборудования в части обеспечения безопасности работы приборов и оборудования»).

Для гармонизации подходов при оценке соответствия совместно с техническими регламентами разработаны перечни стандартов [5–7], в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований технических регламентов. Структура [5–7] предполагает сопоставление в необходимых случаях структурных объектов технического регламента и ТНПА, в которых существенно раскрывается требование безопасности и устанавливаются конкретные показатели безопасности для контроля в численном либо ином виде. Так, для гидравлических демпферов для выполнения требования п. 13б [1] необходимо выполнить требования пунктов 5.1.4–5.1.6 и 5.5 ГОСТ 33749-2016 [8].

При неприменении или частичном применении стандартов, включенных в перечни [5–7], заявитель на сертификацию железнодорожной продукции может использовать обоснование безопасности, разработанное в соответствии с ГОСТ 34008-2016 [9]. В таком случае обоснование безопасности определяет показатели безопасности, обеспечивающие соблюдение требований безопасности, установленные в техническом регламенте.

Выстроенная система применения гармонизированных перечней поддерживающих стандартов [5–7] при оценке соответствия подвижного состава и элементов инфраструктуры железнодорожного транспорта во всех странах ЕАЭС позволила внедрить единый подход к оценке соответствия железнодорожной продукции и выполнить условие Договора о Евразийском экономическом союзе [10] об отсутствии дискриминации заявителей вне зависимости от органа по оценке соответствия, в который он обращается.

Представленные решения по актуализации требований безопасности, установленных в [1–3], были внесены сотрудниками Органа по сертификации учреждения образования «Белорусский государственный университет транспорта» в рабочую группу по разработке и актуализации перечней стандартов к техническим регламентам в области железнодорожного транспорта. В настоящее время проходит стадия их обсуждения с перспективой введения данных изменений до конца 2025 года, что позволит сделать процедуру оценки соответствия железнодорожной продукции еще более прозрачной для всех участников процесса.

**Список литературы**

1 ТР ТС 001/2011. О безопасности железнодорожного подвижного состава / Евразийская экономическая комиссия. – Минск : Госстандарт : БелГИСС, 2022. – 49 с.

2 ТР ТС 003/2011. О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта / Евразийская экономическая комиссия. – Минск : Госстандарт : БелГИСС, 2022. – 37 с.

3 ТР ТС 002/2011. О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта / Евразийская экономическая комиссия. – Минск : Госстандарт : БелГИСС, 2022. – 55 с.

4 ГОСТ 33184-2014. Накладки рельсовые двухголовые для железных дорог широкой колеи. Технические условия. – Минск : Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2014. – 15 с.

5 Перечень Международных и региональных (межгосударственных) стандартов, а в случае их отсутствия – национальных (государственных) стандартов, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований Технического регламента таможенного союза ТР ТС 001/2011 «О безопасности железнодорожного подвижного состава» – Минск: Госстандарт : БелГИСС, 2024. – 203 с.

6 Перечень Международных и региональных (межгосударственных) стандартов, а в случае их отсутствия – национальных (государственных) стандартов, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований Технического регламента таможенного союза ТР ТС 002/2011 «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта» – Минск : Госстандарт : БелГИСС, 2024. – 75 с.

7 Перечень Международных и региональных (межгосударственных) стандартов, а в случае их отсутствия – национальных (государственных) стандартов, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований Технического регламента таможенного союза ТР ТС 003/2011 «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта» – Минск : Госстандарт : БелГИСС, 2024. – 23 с.

8 ГОСТ 33749-2016. Демпферы гидравлические железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия. – Минск : Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2016. – 10 с.

9 ГОСТ 34008-2016. Железнодорожная техника. Правила подготовки обоснования безопасности. – Минск : Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2016. – 15 с.

10 Договор о Евразийском экономическом союзе от 29 мая 2014 г. : офиц. сайт Евразийского экономического союза. – URL: http://www.eaeunion.org/ (дата обращения: 11.09.2025).

УДК 001.2

# НАУКА, ОБРАЗОВАНИЕ, ПРОИЗВОДСТВО: ИННОВАЦИОННАЯ ТРИАДА ПОД РУКОВОДСТВОМ Л. А. СОСНОВСКОГО

*В. В. КОМИССАРОВ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Современные научные исследования успешно стирают границы между отдельными сферами: они активно ведутся как в академических институтах, так и в университетах, на промышленных предприятиях и в частных компаниях. Наибольшего эффекта, как правило, удается достичь благодаря междисциплинарному подходу, когда ресурсы и интеллектуальный потенциал концентрируются на ключевых направлениях, независимо от ведомственной принадлежности ученых и организаций.

Ярким примером такого подхода может служить возникновение и развитие трибофатики – нового раздела механики. Впервые этот термин был предложен в 1986 году, а уже спустя семь лет, в 1993-м, в Гомеле прошел первый международный симпозиум, посвященный этой дисциплине. Крупные научные деятели, включая вице-президента РАН К. В. Фролова и министра образования Беларуси В. И. Стражева, высоко оценили это достижение, признав Беларусь родиной новой перспективной науки.

Среди ключевых достижений, заложивших основу для интеграции науки, образования и производства, можно выделить следующие (рисунок 1).

1 **Трибофатика** – новое направление в механике.

2 **Механотермодинамика** – новый раздел физики.

3 **Трансдисциплинарная методология** подготовки специалистов в вузах Беларуси и Китая.

4 **Оригинальное периферийное устройство РТС** для персональных компьютеров.

5 **Новый конструкционный материал «МОНИКА»**, обладающий особыми механическими свойствами и высокой усталостной прочностью.

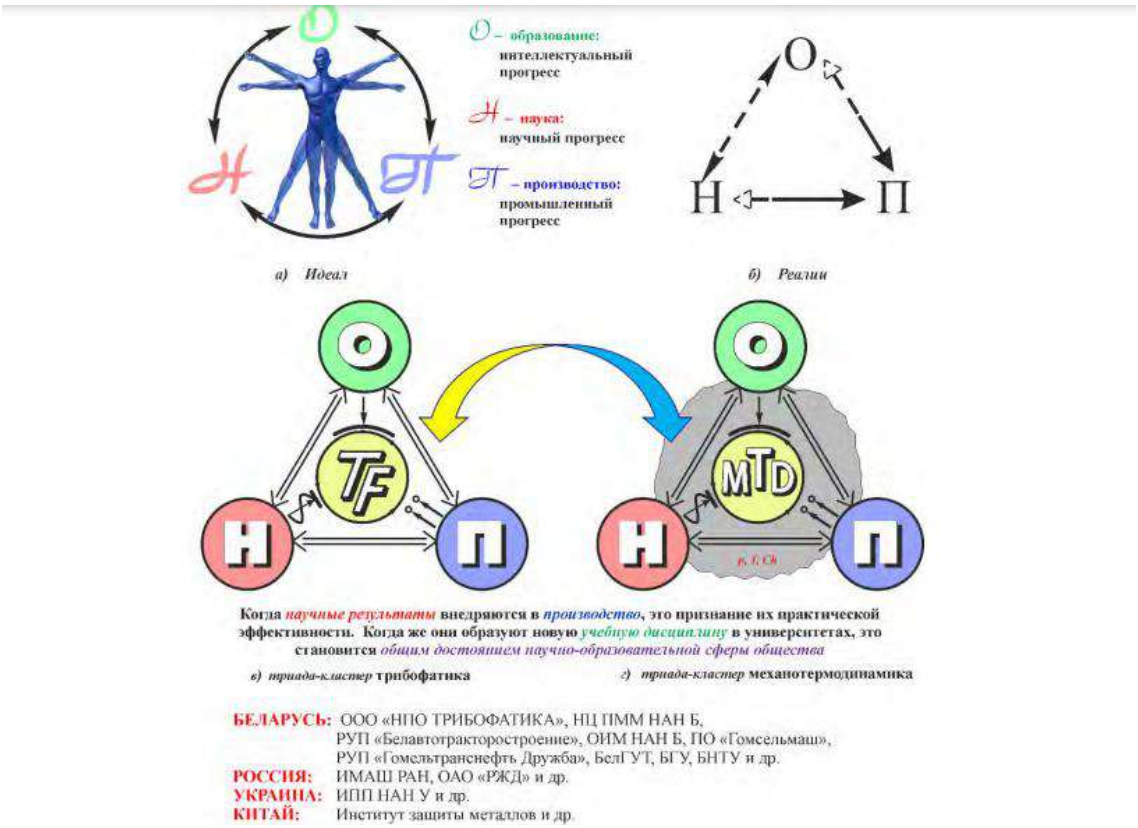



Рисунок 1 – К анализу фундаментальной триады «наука – образование – производство» и ее реализации

Реализованная под началом Л. А. Сосновского триада «наука – образование – производство» демонстрирует эффективную модель национальной инновационной системы. Данный замкнутый цикл, обеспечивающий переход от фундаментального знания к образовательной практике и выпуску конкурентоспособной продукции, создает прочный фундамент для обеспечения технологической независимости и укрепления международных позиций страны [1–5].

Вклад руководства и сотрудников «НПО ТРИБОФАТИКА» был отмечен многочисленными государственными наградами и почетными званиями, что служит подтверждением их значимой роли в развитии науки и техники. Результаты их деятельности положили начало новым научным дисциплинам, оказали влияние на образовательные стандарты в Беларуси и Китае и способствовали созданию уникальной конкурентоспособной продукции.

**Список литературы**

1 **Сосновский, Л. А.** Культура и золотая триада «наука–образование–производство» / Л. А. Сосновский, С. С. Щербаков, А. А. Лазаревич // Интеллектуальная культура Беларуси: духовно-нравственные традиции и тенденции инновационного развития : материалы Пятой Междунар. науч. конф., Минск, 19–20 нояб. 2020 г. / Институт философии НАНБ. – Минск : Четыре четверти, 2020. – Т. 1. – С. 227–238.

2 **Сосновский, Л. А.** Современная наука и мультидисциплинарная система образование – наука – производство: некоторые достижения / Л. А. Сосновский, С. С. Щербаков, А. В. Богданович // Теоретическая и прикладная механика : межвед. сб. науч.-метод. статей.– Минск : БНТУ, 2018. – Вып. 33. – С. 3–11.

3 Двадцатилетний опыт преподавания курса «Основы трибофатики» / В. И. Сенько, Л. А. Сосновский, А. В. Путято [и др.] // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2016. –№ 1 (32). – С. 11–31.

4 Трансдисциплинарное проектирование объектов и силовых систем – качественно новый уровень подготовки инженеров / В. И. Сенько, Л. А. Сосновский, Н. А. Махутов [и др.] // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2016. – № 1 (32). – С. 32–38.

5 **Сосновский, Л. А.** Механотермодинамика (об объединении великих конкурентов: 1850–2015) / Л. А. Сосновский // Механика машин, механизмов и материалов. – 2016. – № 4 (37). – С. 19–41.

УДК 531:536+539.538

## ПРОРЫВНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ Л. А. СОСНОВСКОГО

*В. В. КОМИССАРОВ*
*Белорусский государственный университет транспорта*

Научная школа Республики Беларусь под руководством Л. А. Сосновского в области трибофатики, а затем механотермодинамики демонстрирует достижения высокого уровня, основанные на принципиально новых подходах к оценке и прогнозированию состояния критически важных технических систем, таких как «колесо – рельс», режущий аппарат сельскохозяйственного комбайна, «шина – дорожное покрытие» и «поток жидкости – трубопровод» [1]. К наиболее значимым результатам можно отнести следующие разработки.

1 ***Универсальный испытательный центр SZ-01***. Создан комплекс, позволяющий проводить на одной установке весь спектр износоусталостных испытаний материалов, включая исследования на механическую, контактную, фрикционную усталость и фреттинг, с возможностью моделирования коррозионно-механических и эрозионно-механических воздействий. Ключевым преимуществом является использование единого образца, что обеспечивает сопоставимость результатов различных видов испытаний без необходимости применения сложных поправочных коэффициентов для учета масштабного эффекта.

2 ***Экспериментальное обоснование взаимовлияния процессов***. Методы, реализованные в центре SZ-01, позволили впервые установить количественные закономерности прямого и обратного эффектов в трибофатике: влияние трения на усталостную прочность, и наоборот, влияние усталостного наклепа на процессы трения. Это дало возможность исследовать развитие неоднородной локальной поврежденности в материале в условиях многомиллионных циклов нагружения.

3 ***Разработка механотермодинамической модели***. Предложена модель критических состояний, интегрирующая силовые, температурные и фрикционные нагрузки. Модель позволяет описывать отказы элементов, как по критерию объемного разрушения, так и по критерию предельного поверхностного износа. В частном случае термосилового нагружения модель показала высокую сходимость с экспериментальными данными (коэффициент корреляции превышает 0,722).

4 ***Модель объемной повреждаемости***. Введено обобщенное представление о вероятностной мере повреждаемости – «опасном объеме». Данный подход обеспечил интегральную оценку состояния ме-

ханической системы и доказал свою эффективность для задач оптимизации по критерию повреждаемости, значительно сократив вычислительные затраты по сравнению с традиционным анализом локальных напряженно-деформированных состояний.

5 ***Новая постановка контактной задачи для системы «колесо – рельс»***. Разработана трибофатическая модель, впервые учитывающая как контактное взаимодействие с трением, так и неконтактное деформирование рельса на упругом основании под нагрузкой от подвижного состава. Такой подход позволяет учесть полную объемную повреждаемость системы, величина которой примерно на 40 % превышает оценки, полученные в рамках классической трибологии. Это открывает новые возможности для решения проблемы аномально высокого износа («колесно-рельсовый вирус») в условиях тяжеловесного движения.

6 ***Инновационный материал***. Разработан принципиально новый конструкционный материал МОНИКА, сочетающий уникальные свойства: прочность высоколегированных сталей (до 1500 МПа); технологичность и литейные качества чугуна; повышенную пластичность (относительное удлинение до 4 %); высокую контактную выносливость и самосмазываемость. Особенностью материала является аномальная зависимость механических характеристик – рост прочности при увеличении пластичности. Материал успешно применяется для замены сталей в ответственных узлах: зубчатых передач, режущих органов сельхозтехники, железнодорожных рельсов.

7 ***Передовые методы моделирования***. Создана и реализована модель взаимодействия множества деформируемых тел, основанная на системе граничных интегральных уравнений. Метод позволяет моделировать сложные контактные взаимодействия, определять неизвестные поверхности контакта, учитывать зоны проскальзывания и сцепления.

8 ***Высокопроизводительные вычисления***. Внедрены квантоподобные вычисления, использующие концепцию суперпозиции полей состояний. Применение графических ускорителей позволило достичь ускорения расчетов в 600 раз.

9 ***Медицинские приложения.*** Разработана методика моделирования зубочелюстной системы человека, обеспечивающая анализ контактных взаимодействий элементов; определение напряженно-деформированного состояния; оптимизацию биомеханической системы; персонализированный подход на основе томографических данных.

10 ***Нанотехнологии***. Создан метод электромагнитно-силового управления нанообъектами, позволяющий осуществлять макроперемещения на расстояния до нескольких метров; использовать токопроводящий посредник и силы Ван-дер-Ваальса; учитывать магнитное сопротивление и диэлектрическую проницаемость среды.

В перспективе дальнейшее развитие трибофатики и механотермодинамики может осуществляться по следующим направлениям: совершенствование методологии решения контактных задач множественных тел; развитие теории определения объемной повреждаемости; создание методов анализа многокритериальных предельных состояний; учет сложного комбинированного нагружения.

Разработанная обобщенная теория эволюции систем по повреждаемости создает основу для прогнозирования долговечности и надежности сложных технических систем в условиях экстремальных эксплуатационных нагрузок.

**Список литературы**

1 **Щербаков, С. С.** Механотермодинамика и трибофатика: достижения и перспективы / С. С. Щербаков // Актуальные вопросы машиноведения : сб. науч. тр. – Минск : ОИМ НАНБ, 2018. – Вып. 7. – С. 18–26.

УДК 625.143

## ПРЯМОЙ И ОБРАТНЫЙ ЭФФЕКТЫ В СИСТЕМЕ «КОЛЕСО – РЕЛЬС»: КАК УПРАВЛЯТЬ НАДЕЖНОСТЬЮ ЧЕРЕЗ ТРИБОФАТИКУ

*В. В. КОМИССАРОВ, Е. С. ТАРАНОВА*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Со второй половины XX века ключевым вектором технического прогресса является повышение производительности машин и оборудования, что выражается в росте нагрузок, скоростей и температур в различных элементах, узлах и системах. Для решения вопросов обеспечения надежности и

безопасности, возникающих в связи с этим, требуется реализация дополнительных мероприятий, что вступает в противоречие с жесткими требованиями рыночной экономики по минимизации издержек. Это противоречие делает задачу оптимизации ключевым приоритетом, что особенно актуально для системы «колесо – рельс» в эпоху развития тяжеловесных железнодорожных перевозок.

В рамках работ научной школы «Трибофатика» отмечается, что, несмотря на фундаментальную важность системы «колесо – рельс» для железнодорожного транспорта и активное обсуждение проблемы как на региональном, так и на международном уровне, на практике всё равно имеют место масштабные убытки от контактно-усталостных повреждений, а задача ее оптимизации до сих пор не только не решена, но и не получила четкой формулировки. В работах ученых данного направления предлагается концепция восполнения наблюдаемого пробела, путем постановки данной задачи с позиции трибофатики, т. е. с позиции многокритериальной оптимизации системы «колесо – рельс» для существующих условий движения [1].

Это стало возможным в связи с тем, что со второй половины XX века сформировалось понимание о силовых системах (в частности, «колесо – рельс»), процессы трения в которых протекают на фоне циклического объемного деформирования, по крайней мере, одного из взаимодействующих элементов (например, рельса). Проведенные всесторонние исследования и работы других авторов показали, что неконтактные циклические нагрузки (растяжение, сжатие, изгиб, кручение) в зависимости от условий эксплуатации могут существенно влиять на силу и коэффициент трения в силовой системе. В частности, установлено, что износ в силовых системах способен как значительно снижать (до двух раз), так и повышать (примерно на 10–20 %) усталостную прочность ее элементов. Это явление, известное как **прямой эффект в трибофатике**, показало, что традиционно считавшийся вредным износ может служить инструментом для управления надежностью силовых систем. С другой стороны, было показано, что усталостные повреждения также оказывают двунаправленное влияние: они могут, как снижать (в 1,5 раза и более), так и повышать (на 10–30 %) износостойкость системы, формируя другой – **обратный эффект**.

Ключевым выводом проведенных исследований явилось то, что трение/износ и усталость являются не просто взаимовлияющими факторами, но и тесно взаимодействующими явлениями. На этой основе была предложена новая методология расчета и проектирования, ориентированная не на отдельные элементы, а на механические системы в целом. Такая методология построена на теории диалектических Λ-взаимодействий повреждений, вызванных нагрузками различной природы.

На сегодняшний день методология расчета силовых систем, изготовленных из соответствующих материалов, несмотря на наличие научных публикаций, не получила должного нормативного оформления, и как следствие, конструкторские бюро не имеют официально утвержденных методик расчета конкретных силовых систем. Поэтому необходимо ставить и решать задачи по формированию соответствующего банка данных для реальных силовых систем машин и оборудования, и их последующему должному нормативному обеспечению. Внедрение данного подхода позволит перейти от реагирования на повреждения к активному управлению ресурсом наиболее нагруженных узлов и систем.

**Список литературы**

1 Трибофатическая система колесо / рельс для тяжеловесного движения: повышение нагрузок и… снижение затрат? / Л. А. Сосновский, В. А. Гапанович, В. И. Сенько [и др.] // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2016. –№ 1 (32). – С. 219–226.

УДК 678

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ ДЕТАЛИ НА ПРОЦЕСС ОТВЕРЖДЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*У. Д. КОСИМОВ, Н. К. ТУРСУНОВ*
*Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан*

При изготовлении изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) большое внимание уделяется процессу укладки тканей и дальнейшей термической обработке на пути к получению высокотехнологичных узлов с достаточно высокими физическими и механическими свойствами.

Известно, что основной технологией, используемой для полимеризации связующего, является отверждение под ИК-лампой, в печи и под прессом [1]. Существенные отличия в различных свойствах матрицы и армирующего наполнителя, усадка полимерной матрицы, которая происходит в процессе отверждения связующего и термические напряжения могут послужить причиной возникновения остаточных напряжений [2]. Все эти факторы приводят к возникновению в ПКМ необратимых деформаций, которые вызывают появление дополнительных остаточных напряжений.

Соответственно кинетика процесса существенно зависит от разнотолщинности конструкции или детали из композиционного материала, времени, скорости и способа подвода тепла, используемого материала оснастки и др. [3].

Низкая теплопроводность большинства полимерных КМ решает достаточно сложную задачу обеспечения равномерности температурного поля по толщине изделия при отверждении и приводит к появлению неоднородных напряжений [4].

Цель исследования – изучить влияние толщины детали на кинетику процесса отверждения деталей из полимерных композиционных материалов на основе эпоксидного связующего для оптимизации технологических режимов полимеризации.

Для получения значений тепловыделения и рассмотрения процесса отверждения детали был произведен эксперимент, заключающийся в разогреве связующего в стаканах, с различной высотой столба жидкости (10, 20, 40 мм). Весь процесс был зафиксирован на тепловизор, и были получены значения разницы температур при отверждении образцов.

В испытании было использовано связующее Т20 – 60 с прилагаемым к нему отвердителем. Соотношение связующего к отвердителю по паспорту было заложено 100:31,6.

На образце с высотой жидкости 20 мм произошел перегрев и связующее вскипело, что наглядно показывают появившиеся в объеме пузыри. В процессе отверждения было замечено, что полимеризация не происходит во всём объеме одновременно. Было видно, как тепло передается сверху вниз по объему жидкости и на верхних слоях, которые более прогреты, процесс полимеризации начинался быстрее, в отличие от остальных лежащих вглубь слоев. Для изучения этого явления был проведен еще один эксперимент в такой же форме, но с высотой столба связующего в 20 и 40 мм.

В ходе исследования было выявлено, что подобный процесс может протекать и без внешней подачи тепла – в процессе замешивания смолы с отвердителем при пропитке изделия получившимся связующим.

Исходя из вышеизложенного рекомендуется распределять связующее в большом объеме при минимальной высоте столба жидкости, чтобы избежать вскипания.

**Список литературы**

1 **Панов, Ю. Т.** Современные методы переработки полимерных материалов. Переработка реактопластов : учеб. пособие / Ю. Т. Панов, Л. А. Чижова, Е. В. Ермолаева. – Владимир : ВлГУ, 2014. – 144 с.

2 Современные технологии получения и переработки полимерных и композиционных материалов : учеб. пособие / В. Е. Галыгин, Г. С. Баронин, В. П. Таров, Д. О. Завражин. – Тамбов : ТГТУ, 2012. – 180 с.

3 **Чукин, А. В.** Проверка законов теплового излучения / А. В. Чукин. – URL: http://www.urfu.ru (дата обращения: 25.07.2025).

4 **Кулик, В. И.** Связующие для полимерных композиционных материалов : учеб. пособие / В. И. Кулик, А. С. Нилов. – СПб. : Изд-во БГТУ, 2019. – 52 с.

УДК 004.94:656.073

## ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕВОЗИМЫХ ВО ФЛЕКСИТАНКАХ ЖИДКИХ ГРУЗОВ НА ДИНАМИКУ ИХ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

*А. А. МАРКАВЦОВ*
*Конструкторско-технический центр Белорусской железной дороги, г. Минск*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В настоящее время увеличиваются объемы мультимодальных перевозок жидких грузов с использованием стандартных контейнеров, оснащенных эластичными вкладышами (флекситанками), что объясняется более простой организацией их доставки на длительные расстояния с использованием нескольких видов транспорта по сравнению с традиционными дорогостоящими танк-контейнерами и вагонами-цистернами. Безопасность таких перевозок напрямую зависит от динамических нагрузок от

жидкости на стенки контейнера в процессе транспортировки. Это обусловлено возможностью относительного смещения жидкого груза внутри резервуара, которое может вызывать множественные гидроудары, влияющие на устойчивость и управляемость транспортного средства [1–3].

Анализ исследований различных авторов показал, что динамика жидкостей во флекситанках представляет собой сложную научную проблему, которая до сих пор остается малоизученной, поскольку, в отличие от традиционных цистерн, где процессы относительных колебаний жидких грузов исследованы достаточно подробно, эластичная оболочка флекситанка вносит в систему дополнительные степени свободы, включая возможность смещения стенок гибкой емкости. Чем меньше степень заполнения флекситанка и вязкость жидкости, тем меньшие внешние усилия необходимо приложить для начала относительного движения транспортируемой жидкости.

Таким образом, целью представленной работы является исследование влияния плотности и вязкости жидкого груза на динамику его относительного движения внутри флекситанка с использованием программного комплекса ANSYS CFX.

Для проведения численного моделирования создана трехмерная геометрическая модель гибкого вкладыша типа «лайнер-бэг», которая в наполненном состоянии полностью повторяет внутреннюю форму стандартного 20-футового контейнера. Уровень заполнения флекситанка принимался равным 90 %.

В качестве допущений принято, что стенки флекситанка достаточно жесткие и не деформируются. Принятая высота гибкого резервуара составляет 75,2 % от высоты контейнера, что соответствует реальным условиям загрузки. Физические свойства колеблющейся внутри резервуара жидкости соответствуют параметрам плотности и вязкости глицерина, поскольку для этого груза характерно значительное (до 97 %) изменение вязкости при изменении температуры окружающей среды (таблица 1) [4].

*Таблица 1* – **Значения плотности и вязкости глицерина в зависимости от температуры окружающей среды при транспортировке**

| Температура, °С | Плотность, кг/м$^3$ | Вязкость, Па·с | Температура, °С | Плотность, кг/м$^3$ | Вязкость, Па·с |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1272 | 12,1 | 20 | 1260 | 1,49 |
| 5 | 1269 | 6,22 | 30 | 1254 | 0,62 |
| 10 | 1266 | 3,81 | 40 | 1248 | 0,30 |

Расчеты производились в модуле CFX программного комплекса ANSYS Workbench. Рассматривалась модель экстренного торможения контейнера с замедлением, равным 4*g*, которая двигалась с на-чальной скоростью 15 м/с. Проведена серия расчетов для температуры перевозки глицерина от 0 до 40 °С.

Относительное движение жидкого груза характеризуется, в первую очередь, скоростью частиц, поэтому в качестве исследуемой характеристики выбрана кинетическая энергия глицерина. На рисунке 1, *а* продемонстрировано положение свободной поверхности жидкого груза в момент времени $t$ = 0,02 с после начала торможения транспортного средства. Рисунок 1, *б* представляет графические зависимости кинетической энергии глицерина от времени, отсчитываемого от начала торможения, для различной температуры его перевозки. Во всех случаях наблюдается первоначальный резкий и значительный всплеск кинетической энергии, вызванный инерцией жидкости в самом начале процесса торможения (до 0,1 с после начала торможения). Наибольшее значение кинетической энергии, составляющее 2,66 МДж, наблюдается при температуре 20 °С в момент времени 0,02 с.

*а)* *б)*

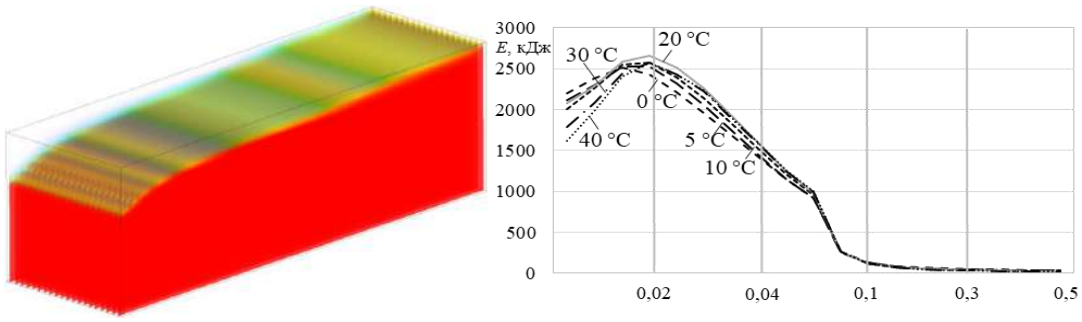



Рисунок 1 – Расчетная модель для CFD-анализа динамики глицерина:
*а* – положение свободной поверхности глицерина при температуре 20 °С в момент времени 0,02 с;
*б* – зависимость кинетической энергии от времени при различной температуре глицерина

По результатам выполненного численного моделирования сформулированы следующие выводы:

1) установлена обратная зависимость между температурой глицерина и интенсивностью затухания его динамических колебаний: снижение вязкости жидкости при нагреве с 0 до 40 °С приводит к увеличению продолжительности динамических нагрузок;

2) выявлена нелинейная зависимость максимальной кинетической энергии от температуры, с максимальным значением 2,66 МДж при 20 °С, что доказывает невозможность линейного прогнозирования максимальных нагрузок и подтверждает необходимость CFD-моделирования;

3) для повышения безопасности транспортировки вязких наливных грузов предпочтительна их перевозка в охлажденном состоянии, так как повышенная вязкость выступает естественным демпфером, поглощающим динамику жидкости.

Таким образом, результаты исследования показывают, что температурный режим перевозки вязких жидких грузов оказывает решающее влияние на их динамическое поведение. Оптимальным условием транспортировки вязких жидкостей, таких как глицерин, является поддержание их в охлажденном состоянии, при котором повышенная вязкость эффективно демпфирует колебания и снижает риск возникновения гидроударов, обеспечивая тем самым устойчивость флекситанка при транспортировке.

**Список литературы**

1 **Gradinscak**, M. Liquid Sloshing in Containers with Flexibility : A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy / M. Gradinscak // School of Engineering and Science, Victoria University. – Melbourne, Australia, 2009. – 192 p.

2 **Wang, Z.** Study on Impact Process of a Large LNG Tank Container for Trains / Z. Wang, C. Qian, W. Li // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, № 1351. – P. 1–19.

3 **Konar,** T. A review of numerical modelling of liquid sloshing in partially filled containers / T. Konar, A. Das // Ships and Offshore Structures, – 2024. – P. 1–26.

4 **Lide**, **D. R.** CRC handbook of chemistry and physics / D. R. Lide // Boca Raton: CRC press, 2004. – 2656 p.

УДК 548.24

# РОЛЬ ЗЕРНА ПОЛИКРИСТАЛЛА У УСТЬЯ ОСТАТОЧНОГО КЛИНОВИДНОГО МИКРОДВОЙНИКА В ФОРМИРОВАНИИ ПОЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В КРУПНОМ СДВОЙНИКОВАННОМ ЗЕРНЕ

*О. М. ОСТРИКОВ*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В транспортных технических системах металлы используются преимущественно в поликристаллическом состоянии. Поэтому надежность и безопасность транспорта, устойчивость его к разрушению зависит от процессов, протекающих в зернах поликристаллов под действием механических нагрузок.

Одним из основных каналов пластической деформации твердых тел выступает деформационное двойникование, которое при определенных условиях способствует зарождению разрушения, причем при механических нагрузках, значительно более низких по величине, чем величина нагрузок, соответствующих пределу прочности материала.

В широко используемых на практике поликристаллических конструкционных материалах двойникование проявляется в зернах. Поэтому важной научно-практической проблемой является разработка методов расчета напряженно-деформированного состояния, формируемого в зернах поликристаллов под влиянием механического двойникования.

Целью данной статьи стала разработка методики расчета полей напряжений в крупном зерне поликристалла с остаточным клиновидным микродвойником и учет роли в формировании напряженного состояния соседнего зерна, находящегося у устья двойника.

На рисунке 1 представлены результаты расчетов, которые основаны на положениях теории дислокаций и принципа суперпозиции, правомерного в рамках теории упругости. Согласно рисунку 1 максимальные нормальные напряжения $\sigma_{xx}$, $\sigma_{yy}$, $\sigma_{zz}$ наблюдаются на границе зерна, к которой приле-

гают устье двойника и граница соседнего зерна, а также на границах двойника. При этом данные напряжения сконцентрированы в зоне расположения двойника, а при удалении от него снижаются и концентрация, и численные значения напряжений $\sigma_{xx}$, $\sigma_{yy}$, $\sigma_{zz}$ (см. рисунок 1, *а–в*).

Сдвиговые напряжения $\sigma_{xy}$ локализованы в узловых точках зерен и на границах двойника (см. рисунок 1, *г*). При этом концентрация напряжений увеличивается по мере приближения к двойнику. Численные значения сдвиговых напряжений $\sigma_{xy}$ на всём анализируемом участке имеют один порядок – точек явно выраженных экстремумов не наблюдается. При этом концентрация напряжений $\sigma_{xy}$, аналогично концентрации нормальных напряжений, снижается по мере удаления от двойника и границы зерна, к которой он примыкает (см. рисунок 1, *г*).

Скалывающие напряжения $\sigma_{yz}$ локализованы на зеренных границах (см. рисунок 1, *д*), а напряжения $\sigma_{yz}$ локализованы на границах зерна (кроме вертикальных границ) и на двойниковых границах (см. рисунок 1, *е*). Максимальные значения скалывающие напряжения $\sigma_{xz}$ и $\sigma_{yz}$ имеют место в узловых точках зерен (см. рисунок 1, *д* и *е*).

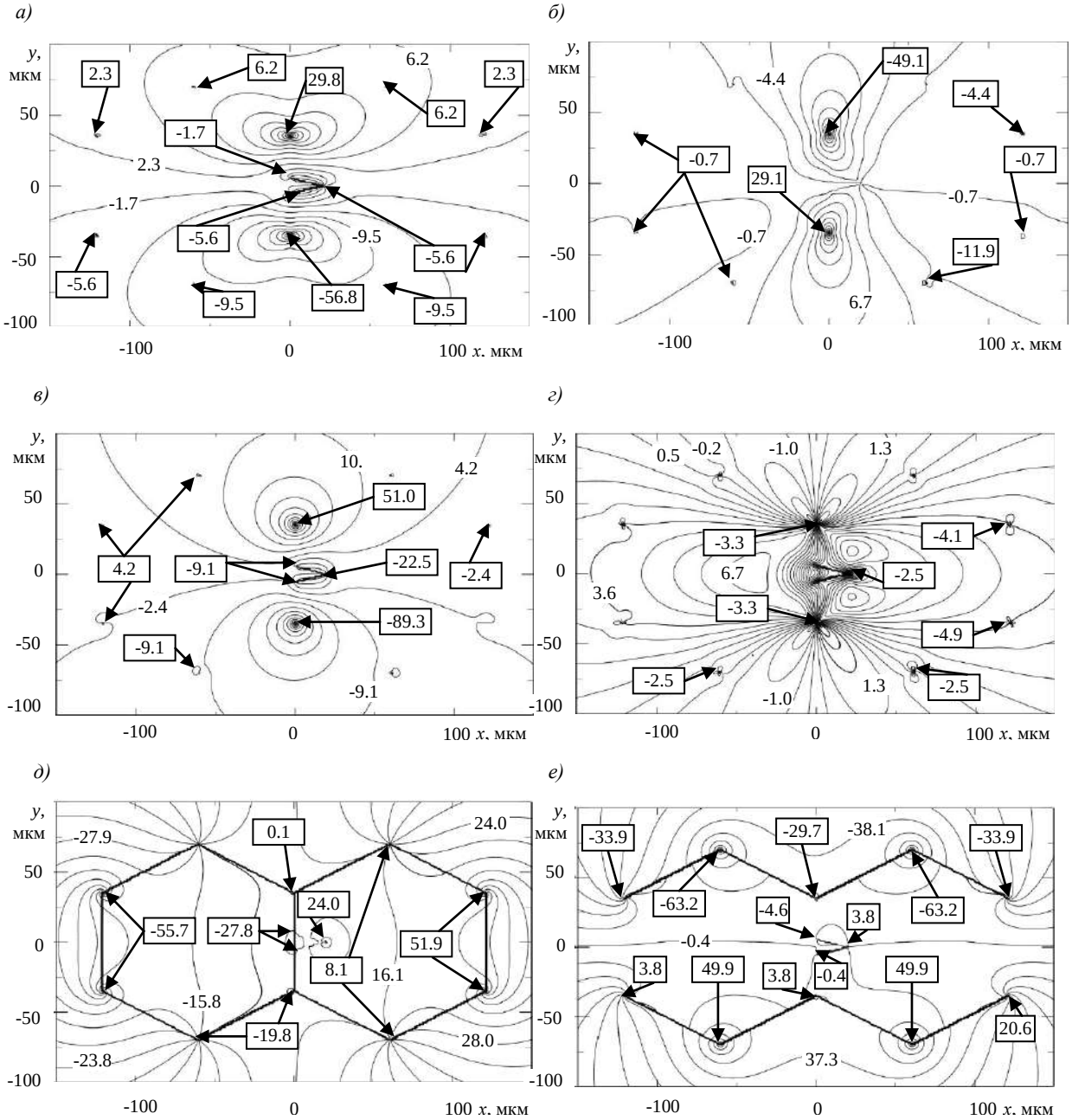



Рисунок 1 – Распределение напряжений в группе из двух зерен при наличии в одном из них единичного остаточного клиновидного двойника, МПа:
*а* – $\sigma_{xx}(x, y)$; *б* – $\sigma_{yy}(x, y)$; *в* – $\sigma_{zz}(x, y)$; *г* – $\sigma_{xy}(x, y)$; *д* – $\sigma_{yz}(x, y)$; *е* – $\sigma_{xz}(x, y)$

Таким образом, рассчитаны поля напряжений в крупном зерне поликристалла с остаточным клиновидным двойником. Расчет выполнен с учетом роли в формировании напряженного состояния соседнего зерна, находящегося у устья двойника. Показано, что в зависимости от компоненты тензора напряжений напряжения имеют разные области локализации и различные численные значения. Результаты имеют важное значение в транспортной отрасли в обеспечении безопасности технических систем, использующих двойникующиеся материалы.

*Автор благодарит Дробышевскую Т. В. за помощь в проведении расчетов.*

УДК 620.179.141:62-592.59

## МАГНИТОПОРОШКОВЫЙ КОНТРОЛЬ НАКОНЕЧНИКОВ ТОРМОЗНЫХ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ РУКАВОВ ВАГОНОВ

*А. Г. ОТОКА*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

*П. А. УСТИЛОВСКИЙ*
*Белорусская железная дорога, г. Гомель*

*О. В. ХОЛОДИЛОВ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

На железной дороге имеются проблемы, связанные с отказами технических средств и событиями, из-за которых происходят задержки грузовых и пассажирских поездов. По итогам работы за 2024 г. на Белорусской железной дороге (БЖД) в вагонном хозяйстве допущено 13 событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта. В 2023 г. было допущено 21 событие. Несмотря на общее снижение числа нарушений безопасности движения поездов в 2024 г., по сравнению с 2023 г., количество событий, допущенных по вине предприятий вагонного хозяйства БЖД, увеличилось и составило 4 случая против 2 [1].

Одной из причин задержки поездов является утечка сжатого воздуха из тормозной системы. Например, таких задержек на Белорусской железной дороге за 2024 г. было 8, а за 2023 г. – 9. Причем особое внимание следует уделять тормозным соединительным рукавам. Тормозные рукава применяются на подвижном составе железных дорог для гибкого соединения воздушных магистралей вагонов между собой, с локомотивом с целью подачи сжатого воздуха под давлением до 1 МПа, а также для разъемного соединения электрических цепей электропневматического тормоза [2].

Всё снятое с вагона тормозное оборудование должно быть направлено для осмотра, ремонта и испытания в соответствующие ремонтные подразделения.

Соединительный тормозной рукав состоит из резинотекстильной трубки, в которую с обеих сторон запрессовываются соединительная головка и наконечник. После запрессовки соединительный рукав обжимается хомутиками. В канавки соединительных головок устанавливают уплотнительные кольца.

Для проверки на прочность соединительные рукава подвергают гидравлическому испытанию под давлением воды в них (1,20±0,02) МПа и с выдержкой под этим давлением в течение 1,5–2,0 мин.

Соединительный рукав считается выдержавшим испытание, если не было обнаружено:

− срыва деталей;

− просачивания воды;

− надрывов резинотекстильной трубки;

− остаточного сдвига резинотекстильной трубки с наконечников (для соединительных рукавов Р36, Р36-01, Р32Б-01);

− остаточного сдвига резинотекстильной трубки с соединительной головки и/или наконечника более чем на 2,5 мм (для соединительных рукавов Р17Б, Р17Б-01).

Для проверки на герметичность соединительные рукава подлежат пневматическому испытанию с выдержкой под давлением воздуха в них (0,60±0,05) МПа при полном их погружении в ванну с водой.

Соединительный рукав считается выдержавшим испытание, если в течение 1 мин не было обнаружено выделение пузырьков воздуха в любой части соединительного рукава. При обнаружении пузырьков воздуха на поверхности резинотекстильной трубки соединительный рукав

должен быть выдержан под давлением в ванне с водой до 10 мин и, если выделение пузырьков на поверхности резинотекстильной трубки прекратится, считать его выдержавшим испытание, в противном случае соединительный рукав бракуется [3].

Практика показывает, что основные утечки сжатого воздуха тормозных рукавов обнаруживают по уплотнительным кольцам в месте соединения головок. Как правило, замена этих колец приводит к устранению утечки. Однако имеются случаи (рисунок 1), связанные с утечкой через резинотекстильную трубку, через резьбу наконечника и др.

Поэтому применение методов неразрушающего контроля (НК) в совокупности с существующими методами испытаний тормозных рукавов позволит повысить достоверность обнаружения скрытых дефектов в тормозных рукавах при исследовании основных причин, повлекших их неисправность в эксплуатации по причине утечки сжатого воздуха.

*а)* *б)* *в)*

Рисунок 1 – Типичные места утечки сжатого воздуха в тормозных соединительных рукавах:
*а* – сквозная слабозаметная трещина длиной 6 мм на резинотекстильной трубке; *б* – трещина в резьбовой части наконечника, выходящая на наружную поверхность; *в* – износ кольца уплотнительного соединительной головки

В связи с этим разработка технологии НК составных частей тормозных рукавов в вагонном хозяйстве Белорусской железной дороги, которая может использоваться дополнительно при регламентированных испытаниях или в качестве подтверждающего контроля на наличие скрытых дефектов, является актуальной.

В качестве дефектного рукава был взят тормозной рукав Р369А, снятый с пассажирского вагона по незначительным утечкам, которые обнаружил осмотрщик-ремонтник вагонов. Утечка была обнаружена на слух в районе хомута со стороны наконечника. До разборки тормозного рукава было определено, что рукав проходил испытание в декабре 2024 г. (два месяца в эксплуатации после испытаний). При разукомплектовании рукава на резинотекстильной трубке в зоне крепления хомутом при визуальном осмотре ничего обнаружено не было. Однако при осмотре наконечника была обнаружена малозаметная трещина на внутренней резьбе, переходящая на наружную грань.

Наконечники изготавливают из ковкого или высокопрочного чугуна, а также из стали марок 10, 20, 30, 45 по ГОСТ 1050 (в нашем случае сталь 45), поэтому для уточнения длины трещины был применен магнитопорошковый контроль (МПК). Известно, что намагничивание деталей проводят либо способом остаточной намагниченности (СОН), либо способом приложенного поля (СПП).

Магнитный контроль чугунных отливок основан на различии магнитных свойств структурных составляющих чугуна. Причем отсутствует закономерность между содержанием углерода и магнитными свойствами чугуна, т. к. определяющее влияние оказывает структурное состояние, а не содержание углерода в чугуне. Наибольшую коэрцитивную силу $H_c$ будет иметь белый чугун. Увеличение степени графитизации приводит к снижению $H_c$, особенно при распаде остатков цементита. Это объясняется увеличением в структуре чугуна мягкой магнитной компоненты – феррита и снижением внутренних напряжений (графит создает меньшие структурные микронапряжения, чем цементит) [4].

Так как значение коэрцитивной силы $H_c$ для стали 45 превышает 10 А/см (таблица 1) намагничивание наконечника следует проводить СОН.

*Таблица 1* – **Магнитные характеристики стали 45**

| Термическая обработка, °С | Коэрцитивная сила $H_c$, А/см | Остаточная индукция $B_r$, Т | Напряженность, необходимая для получения $B_r$, $H_{max}$, А/см |
|---|---|---|---|
| Закалка при температуре от 860<br>отпуск при температуре от 380 до 420 | 22,2 | 0,79 | 160 |

При контроле СОН намагничивание проводят короткими импульсами. Измеряют амплитудное значение тока, т. е. остаточная намагниченность определяется амплитудой намагничивающего тока. В нашем случае для магнитного насыщения наконечника тормозного рукава потребуется напряженность магнитного поля ≥160 А/см [5]. В качестве магнитной установки (рисунок 2) использовалась магнитная установка УМДП-01, обеспечивающая напряженность магнитного поля на поверхности наконечника ≈200 А/см, которое было экспериментально измерено измерителем магнитного поля ИМАГ-400Ц.

Рисунок 2 – Намагничивание наконечника тормозного рукава вагона с помощью магнитной установки УМДП-01

Пропускание импульсного тока происходило при неподвижном контактном стержне и соленоиде. Наконечник рукава намагничивался за счет продольного магнитного поля соленоида и циркулярного поля, возникающего при прохождении импульса тока через контактный стержень. Подвод соленоида и контактного стержня, закрепленных на поворотном кронштейне, осуществлялся к контролируемому наконечнику до срабатывания фиксатора (пока контактный стержень не обеспечит надежный контакт с контактной головкой, расположенной на стойке опорных роликов).

При этом контактный стержень должен был проходить по центру внутри наконечника.

Рисунок 3 – Трещины, выявленные с помощью магнитной установки УМДП-01:
*а* – трещина $L_1$ длиной 22 мм на внутренней стороне наконечника, противоположной гайке (выходит на торец);
*б* – трещина $L_2$ длиной 19 мм на внутренней стороне наконечника (располагается со стороны, противоположной $L_1$); *в* – трещина $L_3$ длиной 56 мм (переходит с наружной с тороны гайки на внутреннюю резьбу до бурта);
*г* – трещина $L_4$ длиной 5 мм (в зоне технологической канавки после резьбовой части)

Такой способ намагничивания является комбинированным, что позволяет выявлять трещины практически любой ориентации.

После намагничивания и нанесения магнитной суспензии «Диагма-1200» (рисунок 3) были обнаружены одновременно четыре трещины, переходящие с внутренней поверхности на наружную.

При этом ширина валика, образованного скоплением магнитных частиц над трещинами, показывает их раскрытие по ширине. Всё это говорит о том, что утечка сжатого воздуха была именно по старым трещинам. Наиболее опасной оказалась сквозная трещина $L_3$ длиной 56 мм, через которую сжатый воздух и выходил наружу.

В заключение можно отметить, что с помощью МПК в наконечнике тормозного рукава были идентифицированы трещины с внутренней и наружной сторон наконечника, которые при визуальном осмотре замечены не были.

Ввиду того, что срок эксплуатации наконечников тормозных рукавов не регламентирован НТД, подтверждение на практике наличия скрытых трещин магнитопорошковым методом на БЖД в качестве дополнительного метода является целесообразным. Это позволяет повысить достоверность обнаружения скрытых дефектов в наконечниках при исследовании основных причин, повлекших неисправность тормозных рукавов в эксплуатации по утечке сжатого воздуха. При этом метод может применяться для уточнения длины дефектов уже раскрывшихся трещин, которые обнаруживаются при визуальном осмотре.

**Список литературы**

1 Анализ о состоянии безопасности движения поездов в вагонном хозяйстве Белорусской железной дороги за 2024 г. от 20.01.2025 №18-02-03/2309. – Минск, 2024. – 23 с.

2 **ГОСТ 2593-2014.** Рукава соединительные железнодорожного подвижного состава. Технические условия (разработаны ОАО «НИИ вагоностроения»). – 2014. – 28 с.

3 **732-ЦВ-ЦЛ** Общее руководство по ремонту тормозного оборудования: утв. Советом по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества, протокол от 18–19 мая 2011 г. № 54. – 2011. – 329 с.

4 **Сандомирский, С. Г**. Особенности связей магнитных свойств чугунов с их структурой и магнитные методы контроля структуры чугунных отливок (обзор) / С. Г. Сандомирский // Литье и металлургия. – 2016. – № 4 (85).– С. 96–107.

5 Значения коэрцитивной силы, остаточной индукции и поля насыщения для основных марок сталей. Данные ПНАЭ Г-7-015-89. – 2022. – URL: https://e-ecolog-ru.turbopages.org (дата обращения: 13.07.2025).

УДК 629.463.32

## АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАГРУЖЕННОСТИ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ МАССЫ ТАРЫ РАМЫ

*А. В. ПИГУНОВ, В. В. ПИГУНОВ, М. А. КАЛАШНИКОВ, А. А. ГОГОНОВ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Снижение массы тары вагона и повышение его грузоподъемности в рамках допустимой осевой нагрузки – одна из основных задач, стоящих перед конструкторами. Решение данной задачи позволяет получить конкурентные преимущества над другими производителями вагонов. Достичь данной цели возможно несколькими путями. Первый путь заключается в применении в несущей конструкции вагона высокопрочных сталей. Однако здесь возникают проблемы в обеспечении усталостной долговечности за нормативный срок службы вагона. Второй путь заключается в поиске конструктивных решений, основанных на анализе величин и сочетания эксплуатационных нагрузок и расчетных напряжений.

Существующие конструкции универсальных платформ можно разделить на две основные группы в зависимости от конструктивного исполнения рамы. К первой группе можно отнести конструкции платформ с продольными балками рамы, имеющими переменное по длине сечение. Максимальная высота сечения – в середине вагона, уменьшается к консольным частям. Ко второй группе можно отнести конструкции с боковыми продольными балками постоянного сечения, а с хребтовой – переменного, как и у конструкций первой группы. При этом хребтовая балка, как правило, изготавливается из двух двутавров № 60 или № 70. А для изготовления боковых балок применяются двутавры или швеллеры.

Современными требованиями, приведенными в ГОСТ 33211–2014 [1], для универсальных платформ дополнительно акцентируется внимание на необходимости обеспечения прочности рамы при действии вертикальной нагрузки: 45 тон, – распределенной на длине 3 м и 60 т – распределенной на длине 4,3 м. Эти нагрузки должны быть приложены к боковым продольным балкам рамы.

Принимая во внимание приведенные выше схемы нагружения для оценки прочности универсальных платформ, можно говорить о том, что боковые продольные балки рамы должны иметь в

зоне приложение вертикальных сил усиленное поперечное сечение. В нашем случае возможно применение двутавра № 60 переменной высоты по длине. Хребтовая балка у подавляющего большинства конструкций грузовых вагонов выполнена их двух Z-образных профилей № 31, что делает их предпочтительными для применения в нашей конструкции. Для поддержания настила пола необходим набор продольных и поперечных балок. Его оставляем, как у платформы модели 13-401.

Для оценки прочности предлагаемой конструкции была разработана конечно-элементная модель рамы, позволяющая проводить расчеты для любого вида и сочетания эксплуатационных нагрузок. Предварительные расчеты проводились для продольной сжимающей нагрузки (Т = 2,5 МН), которая прикладывалась к задним упорам автосцепного устройства, и для продольной растягивающей (Т = 2,0 МН), приложенной к передним упорам. Одновременно учитывались сила тяжести кузова и груза, а также вертикальные нагрузки, распределенные по боковым балкам (приведены выше). Допускаемые напряжения устанавливались исходя из предела текучести стали 345 МПа.

Выполненные расчеты позволили определить напряжения для конечных элементов конструкции рамы, а также максимальные для каждой конструктивной группы. При всех сочетаниях нагрузок наибольший уровень напряжений наблюдается в элементах хребтовой балки и составляет 89 % от допускаемых. По остальным конструктивным группам расчетные напряжения изменяются в диапазоне от 120 до 223 МПа, что значительно меньше допускаемых напряжений.

По результатам предварительных расчетов предлагаемой конструкции рамы платформы можно констатировать, что конструкция рамы соответствует современным требованиям прочности [1]. При этом масса рамы снижена на 170 кг. Анализируя распределение и уровень напряжений по конструктивным группам рамы, можно осуществлять дальнейшие шаги по снижению массы за счет снижения металлоемкости боковых продольных и основных поперечных балок рамы.

**Список литературы**

1 ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. – Введ. 01.07.2016. – М. : Стандартинформ, 2016. – 54 с.

УДК 629.463.32

## ОБЗОР КОНСТРУКЦИЙ СКОРОСТНЫХ ПЛАТФОРМ

*А. В. ПИГУНОВ, В. В. ПИГУНОВ, М. А. КАЛАШНИКОВ, А. М. МАКСИМЕНКО*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Увеличение скорости движения железнодорожного подвижного состава – одна из приоритетных задач, стоящих перед железнодорожным транспортом. Решение данной проблемы позволит повысить конкурентоспособность перевозок по железным дорогам в сравнении с другими видами транспорта. Первостепенной задачей является обеспечение скоростной перевозки контейнеров, в том числе рефрижераторных. Однако серийные модели специализированных платформ для перевозки контейнеров рассчитаны на максимальную скорость 120 км/ч, что не позволяет сократить время перевозки грузов. В настоящее время разработаны опытные образцы платформ для скоростей движения 140 км/ч и более (таблица 1).

*Таблица 1* – **Основные технические характеристики платформ**

| Технический параметр, размерность | Модель платформы | | |
|---|---|---|---|
| | 13-6704 | 13-6954 | – |
| Число осей, шт. | 6 | 4 | 6 |
| Конструкционная скорость, км/ч | 140 | 160 | 140 |
| Максимальная расчетная статическая нагрузка от колесной пары на рельсы, кН (тс) | 196,2 (20,0) | 147 (15) | 196,2 (20,0) |
| Масса тары платформы, т | 45,0 | 24 | 30 |
| Грузоподъемность, т | 75,0 | 36 | 90 |
| Длина рамы, мм | 25140 | 14050 | 26800 |
| База вагона, мм | 19200 | 8920 | 22550 |
| Тип устройства сочленения | – | – | SAC-1 |

Специалистами АО «ВНИКТИ» разработана шестиосная платформа для перевозки крупнотоннажных контейнеров модели 13-6704 [1], основные технические параметры которой приведены в

таблице 1. Отличительной особенностью является применение новых сварных трехосных тележек модели 18-6731. Хребтовая балка сварная замкнутого коробчатого сечения переменной высоты и ширины по длине. Максимальная высота и ширина сечения – в средней части конструкции, далее с обеих сторон имеются зоны перехода, на длине которых сечение балки уменьшается как по высоте, так и по ширине. В концевых частях она постоянного минимального сечения. В нижнем горизонтальном листе в средней части предусмотрены два прямоугольных выреза со скругленными углами. В местах опирания на тележку предусмотрена установка пятников, которые крепятся к нижнему горизонтальному листу при помощи восьми болтов М24. В концевых частях устанавливаются передние и задние упоры автосцепки. Для усиления балки предусмотрена установка поперечных ребер с вырезами. Боковые продольные балки – постоянного на всей длине поперечного сечения в виде сварного двутавра. В местах установки фитинговых упоров устанавливаются усиления, представляющие собой вертикально расположенные швеллеры, ограниченные верхним и нижним горизонтальными листами. В местах опирания на тележку установлены четыре вкладыша для установки боковых опор. На боковых балках платформы установлены цапфы для подъема рамы платформы кранами. Под цапфами расположены планки с поверхностью, препятствующей скольжению головок домкратов. Между собой продольные боковые балки и хребтовая соединяются в единую несущую конструкцию при помощи двух концевых балок и набора сварных поперечных. Сверху конструкция рамы усилена стальным листом с вырезами, расположенными между балками со скругленными углами. Для закрепления контейнеров на раме предусмотрена установка 20 откидных и 4 стационарных опор под фитинги, препятствующих продольному и поперечному перемещению контейнеров максимальной массы до 42 тонн, а для исключения вертикальных перемещений напротив каждого упора размещено устройство фиксации контейнера (24 шт.).

Также специалистами АО «ВНИКТИ» и ООО «КТС» разработана конструкция четырехосной платформы для перевозки контейнеров модели 13-6954 со скоростью до 160 км/ч в составе скоростного контейнерного поезда из 24–30 платформ постоянного формирования [2]. В качестве ходовых частей применяются тележки модели 18-6960 с двухступенчатым рессорным подвешиванием. Это модернизированная тележка для прицепных вагонов электропоездов ЭД4 и ЭД9.

Рама платформы является сварной несущей конструкцией с размерами позволяющим размещать контейнеры длиной 40 или 45 футов. Она включает в себя хребтовую балку, выполненную из двух Z-образных профилей, усиленных верхним горизонтальным листом и двумя вертикальными соединяющими нижние горизонтальные полки зета с верхним листом. Каждую из концевых частей рамы образуют концевая, промежуточная и шкворневая балки, объединенные в единую несущую систему отрезками боковых продольных балок, переходящих в раскосы. Раскосы и боковые балки выполнены из трубы квадратного сечения. Напротив упоров фитингов располагаются поворотные фиксаторы для дополнительного закрепления контейнера от перемещений в вертикальном направлении.

Сотрудниками кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ПГУПСа выполнен комплекс проектно-конструкторских работ в направлении разработки конструкции сочлененной шестиосной платформы для перевозки контейнеров для скорости движения 140 км/ч [3]. Конструкция платформы включает в себя две рамы с фитинговыми упорами, соединенными между собой узлом сочленения SAC-1. В качестве ходовых частей предусматривается установка специально разработанной скоростной трехэлементной тележки модели 18-9890 [4].

Каждая рама состоит из двух боковых, хребтовой, концевой, шкворневой и набора промежуточных поперечных балок. К концевым частям рам привариваются полурамы. Полурамы состоят из отрезка хребтовой балки и поперечных балок. В хребтовую балку полурамы одной секции кузова установлена пятниковая часть устройства сочленения, а в хребтовую балку полурамы другой секции установлена поводковая часть устройства сочленения.

Из описанных выше конструкций скоростных платформ наиболее предпочтительной по своим технико-экономическим параметрам является конструкция шестиосной платформы сочлененного типа. Она имеет наибольшую грузоподъемность и наименьшую массу тары и устанавливается на трехэлементные тележки. Для эксплуатации со скоростью свыше 140 км/ч существует одна модель платформы на тележках с двухступенчатым рессорным подвешиванием.

**Список литературы**

1 Вагон-платформа, модель 13-6704. Руководство по эксплуатации 6704.00.00.000 РЭ. – ВНИКТИ, 2022. – 105 с.

2 Скоростная платформа для перевозки контейнеров / В. А. Никонов, Ю. В. Мещерин, М. А. Кимасов [и др.] // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2017. –№ 2 (50). – С. 25–27.

3 **Кожокарь, К. В.** Особенности разработки скоростного сочлененного вагона-платформы для перевозки контейнеров / К. В. Кожокарь // Транспорт Российской Федерации. – 2013. – № 3 (46). – С. 21–24.

4 **Турутин, И. В.** Конструкция тележек моделей 18-9889 и 18-9890 для инновационных четырех- и шестиосных грузовых вагонов / И. В. Турутин, Е. А. Рудакова // Транспорт Российской Федерации. – 2013. – № 3 (46). – С. 10–12.

УДК 629.4.027.2:629.46

# ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТРЕХЭЛЕМЕНТНЫХ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

*В. В. ПИГУНОВ, А. В. ПИГУНОВ, О. В. КАЛЮКО*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Тележки являются наиболее важными составными частями вагонов с точки зрения безопасности, комфорта скорости и во многом определяют их технический уровень и надежность. Конструкция тележек и определяет, в первую очередь, надежность вагонов, поэтому конструкторы и вагоностроители работают над созданием конструкций тележек для вагонов нового поколения, отвечающих новым и перспективным требованиям эксплуатации.

Разработка тележек грузовых вагонов нового поколения ведется с учетом основных тенденций мирового вагоностроения – увеличение осевых нагрузок, повышение надежности и межремонтных пробегов вагонов. Конструкции перспективных тележек должны обеспечивать межремонтный пробег не менее 1 млн км или безремонтный срок службы 8 лет.

Тележки грузовых вагонов нового поколения подразделяют на пять типов в зависимости от значения осевой нагрузки и конструкционной скорости (таблица 1) [1].

*Таблица 1* – **Классификация тележек грузовых вагонов**

| Тип тележки | Максимальная расчетная статическая осевая нагрузка, кН (тс) | Конструкционная скорость, км/ч | Диаметр подпятника, мм |
|---|---|---|---|
| 1 | 196 (20) | 140 | 280 |
| 2 | 230,5 (23,5) | 120 | 300 |
| 3 | 245 (25) | 120 | 350 |
| 4 | 265 (27) | 100 | 380 |
| 5 | 294 (30) | 90 | 400 |

*Тележки типа 1* предусмотрены для перспективных вагонов с осевой нагрузкой 20 тс, обеспечивающих ускоренную перевозку грузов; *типа 2* – для вагонов эксплуатационного парка с осевой нагрузкой 23,5 тс; *типов 3–5* – для перспективных вагонов с повышенными осевыми нагрузками 25, 27 и 30 тс.

Как следует из таблицы 1, для каждого типа тележки (каждой осевой нагрузки) используется свое значение диаметра подпятника. Это позволяет исключить возможность подкатки тележек с меньшей осевой нагрузкой под кузова вагонов с большей осевой нагрузкой, а следовательно, не допустить нарушения прочности тележки [2].

Наибоее распространенными тележками в вагонном грузовом парке являются двухосные тележки, которые конструктивно представляют собой трехэлементные тележки [1], несущая конструкция которых состоит из трех элементов: надрессорной балки и двух боковых рам, опирающихся на колесные пары.

**Новые и перспективные тележки грузовых вагонов с осевой нагрузкой 23,5 тс.**

*Основными конструктивными особенностями новых и перспективных тележек с осевой нагрузкой 23,5 тс являются*:

– новая схема опирания кузова на тележку – через пятник-подпятник и упругие боковые скользуны постоянного контакта;

– защита пар трения от износа с помощью съемных износостойких элементов;

– увеличенная гибкость рессорного подвешивания для груженого режима;

– использование колесных пар с колесами повышенного качества и твердости.

*Это обязательные требования ко всем тележкам грузовых вагонов нового поколения.*

*Боковые скользуны постоянного контакта,* в отличие от скользунов зазорного типа (бесконтактных), обеспечивают гашение колебаний боковой качки и виляния тележки относительно кузова.

Снижение работоспособности тележек эксплуатационного парка обусловлено во многом интенсивным износом трущихся рабочих поверхностей узлов трения тележки. *Введение в узлы съемных износостойких элементов* позволяет увеличить работоспособность и повысить межремонтный пробег тележек в эксплуатации до 500 тыс. км и более. *Увеличение гибкости пружин рессорного подвешивания* повышает его статический прогиб и улучшает ходовые качества вагона.

К новым тележкам с осевой нагрузки 23,5 тс относятся:

– *модель 18-578* – производства АО «НПК «''Уралвагонзавод''»;

– *модель 18-9771* – производства ЗАО «Промтрактор-Вагон» (аналог тележки модели 18-578);

– *модель 18-7020* – производства ОАО «Крюковский вагоностроительный завод» (аналог тележки модели 18-578);

– *модель 18-9810 (Barber S-2-R)* – производства ЗАО «Тихвинский вагоностроительный завод»;

– *модель 18-555* – производства АО «НПК ''Уралвагонзавод''»

Все эти тележки относятся ко 2-му типу по ГОСТ 9246-2013.

Новые тележки грузовых вагонов для осевой нагрузки 23,5 тс во многом повторяют конструкцию тележки модели 18-100, например тележка модели 18-578, или являются принципиально новыми – тележка модели 18-9810, которая спроектирована компанией «Standard Car Truck Co» (США) и представляет собой тележку *Barber S-2-R* (США), адаптированную к российским условиям эксплуатации [3].

Все тележки, спроектированные в США, имеют также *визуальные индикаторы предельного состояния в конструкции изнашиваемых деталей и узлов* (контрольные точки на деталях с изнашиваемой поверхностью в виде канавок и выемок), что упрощает их осмотр в эксплуатации. К таким деталям относятся, например, колпак скользуна, фрикционный клин и адаптер.

**Новые и перспективные тележки грузовых вагонов с осевой нагрузкой 25 тс.**

В настоящее время парк грузовых вагонов пополняется вагонами с повышенной нагрузкой на ось 25 тс и более. Увеличение нагрузки на ось потребовало разработки новых конструкций ходовых частей, обеспечивающих безаварийную работу под такой нагрузкой и увеличенный межремонтный пробег.

Одним из главных требований при создании тележек с повышенной осевой нагрузкой является обеспечение хороших динамических качеств вагонов при повышенных до 25 тс нагрузках от оси на рельсы. Воздействие на путь таких вагонов не должно превышать воздействий вагонов эксплуатационного парка на тележках модели 18-100. Показатели ходовых качеств таких вагонов при движении со скоростью 120 км/ч должны быть не хуже вагонов, оснащенных типовыми тележками модели 18-100.

При этом уровень воздействия на рельсовый путь является комплексным показателем и определяется не только величиной осевой нагрузки, но и жесткостью рессорного подвешивания тележки.

Для осевой нагрузки 25 тс разработан целый ряд перспективных тележек, основными из которых являются тележки моделей 18-194-1, 18-9855, 18-9836, 18-9800 производства российских вагоностроительных заводов, тележки моделей 18-4129 и 18-7033, созданные в Украине. При этом тележка модели 18-4129 допущена для эксплуатации только по железным дорогам Украины.

Тележки моделей 18-9836 и 18-9855 – это тележки, разработанные в США, конструкция которых адаптирована к условиям эксплуатации в России.

Все тележки с осевой нагрузкой 25 тс относятся к 3-му типу по ГОСТ 9246–2013.

*Обязательным требованием к конструкциям тележек с повышенной осевой нагрузкой* является использование:

– колесных пар типа РВ2Ш-957-Г по ГОСТ 4835 с бескорпусными коническими подшипниковыми узлами и адаптерами, что позволяет снизить динамическое воздействие на путь за счет уменьшения неподрессоренной массы тележки;

– блокираторов вертикальных перемещений колесных пар для исключения возможности выхода бескорпусных буксовых узлов колесной пары и адаптера из буксовых проемов боковых рам при эксплуатации вагонов;

– рессорного подвешивания увеличенной гибкости для груженого и порожнего режимов с нелинейной силовой характеристикой (билинейной или кусочно-линейной), отличной от линейной.

В тележках с повышенной осевой нагрузкой, как правило, применяется упругая связь колесных пар с бескорпусными буксами – опирание боковых рам на бескорпусные буксы и адаптеры через упругие прокладки, которые обеспечивают первичное подвешивание тетележки.

**Новые и перспективные тележки грузовых вагонов с осевой нагрузкой 27 тс и более.**

Создание грузовых вагонов с увеличенной осевой нагрузкой до 27 тс и более соответствует мировой тенденции развития железнодорожного транспорта. Это позволит увеличить весовые нормы

грузовых поездов и повысить пропускную способность железных дорог при существующей длине станционных путей.

Основное требование к тележкам, подкатываемым под такие вагоны, – увеличение межремонтного пробега с обеспечением стабильных ходовых качеств тележки на протяжении жизненного цикла при обеспечении нормативного воздействия на путевую структуру и сохранения существующих технологий содержания и ремонта тележки.

Для грузовых вагонов с осевой нагрузкой 27 тс разработаны тележки моделей *18-6863* и *18-9829* (Россия) с осевой нагрузкой 30 тс – модели *18-9817* и *18-9844* (Украина). Тележки с осевой нагрузкой 27 тс относятся к 4-му типу по ГОСТ 9246-2013, 30 тс – к 5-му типу.

Дополнительной особенностью всех этих тележек является *увеличенная база*, обеспечивающая уменьшение погонной нагрузки [4].

**Список литературы**


1 ГОСТ 9246–2013. Тележки двухосные трехэлементные грузовых вагонов железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия. – Введ. 2013–09–27. – М. : Стандартинформ, 2014. – 23 с.

2 **Орлова, А. М.** Унификация тележек грузовых вагонов: проблемы и перспективы / А. М. Орлова // Вагоны и вагоннное хозяйство. – 2010. – № 3. – С. 40–41.

3 **Бороненко, Ю. П.** Инновации в тележках грузовых вагонов: реальность и перспективы / Ю. П. Бороненко, Е. А. Рудакова, А. М. Орлова // Наука и транспорт. – 2009. – С. 14–17.

4 **Бороненко, Ю. П.** Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты / Ю. П. Бороненко, Т. С. Титова, В. А. Варенов // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2016. – № 3. – С. 16–19.



УДК 629.4.015


## УПРАВЛЕНИЕ ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЕМ В КОЛЕСНО-РЕЛЬСОВОЙ СИСТЕМЕ


*А. П. ПРИХОДЬКО*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*


В системе «колесо – рельс» проскальзывание традиционно рассматривается как негативное явление, приводящее к ускоренному износу, потере управления и снижению эффективности. Однако полное его устранение невозможно, поскольку именно проскальзывание позволяет создавать силы тяги и торможения. Практическая задача заключается не в борьбе с проскальзыванием, а в его оптимизации.

**Физическая природа проскальзывания.** Идеальное качение является теоретической моделью. В реальности зона контакта колеса и рельса деформируется, образуя площадку, где возникают упругие микропроскальзывания. Различают два основных типа: **пробуксовка** ($\omega R > v$) – при ускорении и **тормозное проскальзывание** ($\omega R < v$) – при замедлении.

Степень проскальзывания описывается параметром *s:*

$$s = \frac{\omega R - v}{v} \cdot 100\ \%. \qquad (1)$$

Критически важной является нелинейная зависимость силы сцепления от *s*: максимальное сцепление достигается при 10–25 % проскальзывания, после чего происходит его резкое снижение. Чтобы изучить эту зависимость в полном диапазоне – от чистого качения (0 %) до практически полного скольжения (80 %) – были выполнены эксперименты с парами трения из разных материалов [1–3]. Влияние проскальзывания оценивали как для условий без смазки, так и при наличии смазочного материала (рисунок 1).

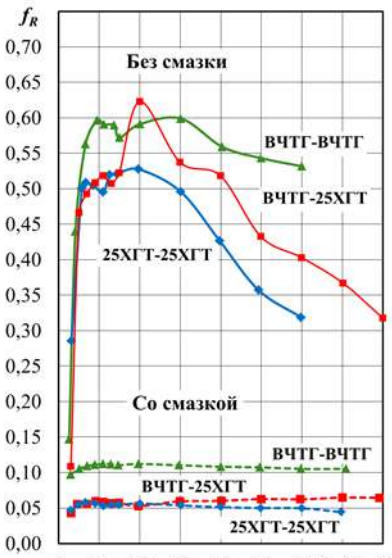



Рисунок 1 – Влияние степени проскальзывания на коэффициент сопротивления качению при испытаниях пар трения из различных материалов

Согласно данным экспериментов, в условиях сухого трения коэффициент сопротивления качению $f_r$ демонстрирует нелинейную зависимость от степени проскальзывания *s*. Его значение первоначально возрастает, достигая максимума при $s \approx 20$ % (на восьмой ступени испытаний для всех исследуемых пар материалов), а затем снижается. В отличие от этого при наличии смазки величина $f_r$ остается практически стабильной и не зависит от изменения проскальзывания.

**Негативные последствия неконтролируемого проскальзывания:**
– ускоренный износ контактных поверхностей;
– увеличение тормозного пути до 30 %;
– потеря управляемости транспортным средством;
– снижение энергоэффективности системы.

**Современные решения.** Развитие систем автоматического управления позволило преобразовать проскальзывание из проблемы в инструмент оптимизации. Современные системы:
– активно поддерживают проскальзывание в оптимальном диапазоне (10–25 %);
– максимизируют силу тяги при разгоне;
– сокращают тормозной путь при сохранении управляемости;
– снижают износ элементов контактной пары.

**Заключение.** Проскальзывание в системе «колесо – рельс» представляет собой фундаментальное физическое явление, требующее не подавления, а точного управления. Современные технологии контроля проскальзывания позволяют одновременно решить три ключевые задачи: повысить безопасность, снизить эксплуатационные расходы и увеличить ресурс элементов колесно-рельсовой системы.

**Список литературы**

1 **Комиссаров, В. В.** Проскальзывание в паре трения: некоторые экспериментальные исследования / В. В. Комиссаров, Е. С. Головина // Тр. VI Междунар. симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), 25 окт. – 1 нояб. 2010 г., Минск / редкол. : М. А. Журавков (пред.) [и др]. – Минск : БГУ, 2010. – Т. 2. – С. 117–121.

2 **Комиссаров, В. В.** Проскальзывание в паре трения: некоторые экспериментальные исследования / В. В. Комиссаров, Е. С. Головина // Тр. VI Междунар. симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), 25 окт. – 1 нояб. 2010 г., Минск / редкол. : М. А. Журавков (пред.) [и др]. – Минск : БГУ, 2010. – Т. 2. – С. 117–121.

3 **Сосновский, Л. А.** Экспериментальное исследование влияния проскальзывания на изменение характеристик трения при качении / Л. А. Сосновский, В. В. Комиссаров, С. А. Тюрин // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2016. – № 1 (32). – С. 116–125.

УДК 629.46.014.7.004.67

## ПОТРЕБНОСТЬ В РЕМОНТНОЙ БАЗЕ ДЛЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ РЕМОНТОВ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

*В. Ф. РАЗОН*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

На Белорусской железной дороге Приказом № 15Н от 16.01.2017 г. утверждены Правила технической эксплуатации дороги, устанавливающие планово-предупредительную дифференцированную систему ремонта вагонов, в которой, в том числе, предусмотрены следующие интервалы времени проведения периодического ремонта вагонов (таблица 1).

*Таблица 1* – **Нормативный срок службы и периодичность плановых видов ремонта вагонов**

| Род грузового вагона | Нормативный срок службы, лет | Деповской ремонт, лет | | | Капитальный ремонт, лет | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Первый после постройки | После деповского ремонта | После капитального ремонта | После постройки | После капитального ремонта |
| **Крытые**<br>Универсальные, включая оборудованные теплоизоляцией | 32 | 3 | 3 | 3 | 13 | 12 |
| Для перевозки зерна | 30 | 3 | 3 | 3 | 15 | – |
| Для перевозки автомобилей | 30 | 3 | 3 | 3 | 8 | 8 |
| Для перевозки скота | 30 | 3 | 2 | 2 | 15 | – |
| **Платформы**<br>Универсальные | 32 | 3 | 3 | 3 | 15 | 12 |
| Для перевозок большегрузных контейнеров, крупнотоннажных контейнеров и колесной техники | 32 | 3 | 3 | 3 | 17 | – |
| Для перевозки рулонной стали, листовой стали, заготовок, колес, колесных пар | 32 | 3 | 3 | 3 | 17 | – |
| Для перевозки лесоматериалов | 32 | 3 | 3 | 3 | 17 | – |

*Окончание таблицы 1*

| Род грузового вагона | Нормативный срок службы, лет | Деповской ремонт, лет | | | Капитальный ремонт, лет | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Первый после постройки | После деповского ремонта | После капитального ремонта | После постройки | После капитального ремонта |
| **Полувагоны**<br>Универсальные модели 12-132-03 на тележках 18-578 | 22 | 4 | 2 | 2 | – | 8 |
| Универсальные, глуходонные, с глухим кузовом | 22 | 3 | 2 | 2 | 11 | – |
| Думпкары | 22 | 3 | 2 | 2 | 10 | 7 |
| Хоппер-дозаторы | 25 | 3 | 3 | 3 | 10 | 8 |
| **Цистерны**<br>4-осные нефтебензиновые | 32 | 3 | 3 | 3 | 13 | 12 |
| 8-осные нефтебензиновые | 32 | 3 | 2 | 2 | 11 | 11 |
| Для перевозки кислоты 4- и 8-осные | 18 | 2 | 2 | 2 | 5 | 5 |
| Для перевозки цемента и других порошкообразных грузов | 28 | 3 | 2 | 2 | 10 | 10 |
| Для перевозки пропана, аммиака, углеводородных газов | 40 | 2 | 2 | 2 | 10 | 10 |

Исходя из установленных интервалов времени схема проведения периодических ремонтов выглядит следующим образом (таблица 2).

*Таблица 2* – **Проведение плановых видов ремонта вагонов за срок их службы**

| Род грузового вагона | Деповской ремонт | | Капитальный ремонт | |
|---|---|---|---|---|
| | Годы проведения с начала эксплуатации | Количество за срок службы | Годы проведения с начала эксплуатации | Количество за срок службы |
| **Крытые**<br>Универсальные, включая оборудованные теплоизоляцией | 3, 6, 9, 12*, 16, 19, 22, 28, 31** | 9 | 13, 25 | 2 |
| Для перевозки зерна | 3, 6, 9, 12, 18, 21, 24, 27 | 8 | 15 | 1 |
| Для перевозки автомобилей | 3, 6***, 11, 14***, 19, 22, 25, 28 | 8 | 8, 16 | 2 |
| Для перевозки скота | 3, 5, 7. 9, 11, 13, 17, 19, 21, 23, 25, 27, 29** | 13 | 15 | 1 |
| **Платформы**<br>Универсальные | 3, 6, 9, 12, 18, 21, 24, 30**** | 8 | 15, 27 | 2 |
| Для перевозок большегрузных контейнеров, крупнотоннажных контейнеров и колесной техники | 3, 6, 9, 12, 15***, 20, 23, 26, 29 | 9 | 17 | 1 |
| Для перевозки рулонной стали, листовой стали, заготовок, колес, колесных пар | 3, 6, 9, 12, 15***, 20, 23, 27, 30**** | 9 | 17 | 1 |
| Для перевозки лесоматериалов | 3, 6, 9, 12, 15***, 20, 23, 27, 30**** | 9 | 17 | 1 |
| **Полувагоны**<br>Универсальные модели 12-132-03 на тележках 18-578 | 4, 6, 10, 12, 14, 18, 20 | 7 | 8, 16 | 2 |
| Универсальные, глуходонные, с глухим кузовом | 3, 5, 7, 9, 13, 15, 17, 19, 21** | 9 | 11 | 1 |
| Думпкары | 3, 5, 7, 9*, 12, 14, 16*, 19, 21** | 9 | 10, 17 | 2 |
| Хоппер-дозаторы | 3, 6, 9*, 13, 16***, 21, 24** | 7 | 10, 18 | 2 |
| **Цистерны**<br>4-осные нефтебензиновые | 3, 6, 9, 12*, 16, 19, 22, 28, 31** | 9 | 13, 25 | 2 |
| 8-осные нефтебензиновые | 3, 5, 7, 9, 13, 15, 17, 19, 21*, 24, 26, 28, 30 | 13 | 11, 22 | 2 |
| Для перевозки кислоты 4- и 8-осные | 2, 4*, 7, 9*, 12, 14,16 | 7 | 5, 10 | 2 |
| Для перевозки цемента и других порошкообразных грузов | 3, 5, 7, 9,* 12, 14, 16, 18, 22, 24, 26 | 11 | 10, 20 | 2 |
| Для перевозки пропана, аммиака, углеводородных газов | 2, 4, 6, 8, 12, 14, 16, 18, 22, 24, 26, 28, 32, 34, 36, 38 | 16 | 10, 20, 30 | 3 |

*Деповской ремонт за 1 год до капитального ремонта.
**Деповской ремонт за 1 год до окончания нормативного срока службы.
***Деповской ремонт за 2 года до капитального ремонта.
****Деповской ремонт за 2 года до окончания нормативного срока службы.

Анализируя данные таблицы 1, следует обратить внимание на наличие несогласованности между сроками проведения периодических ремонтов и сроком службы вагонов, что отражено в таблице 2:

– выполнение капитального ремонта до наступления установленного срока деповского ремонта;

– выполнение последнего деповского ремонта до окончания срока службы вагона менее чем установленная периодичность деповских ремонтов.

В вагоносборочных участках депо Белорусской железной дороги принята поточно-бригадная форма организации работ, при которой вагон всё время ремонта простаивает на одной и той же ремонтной позиции, а специализированные бригады рабочих последовательно переходят от одного вагона к другому, выполняя закрепленные за ними производственные операции. Годовой выпуск вагонов из ремонта при поточно-бригадной форме организации работ, $N_г$, определяется по формуле

$$N_г = \frac{Д_р n_п n_{см}}{t_р^{см}}, \tag{1}$$

где $Д_р$ – количество рабочих дней в году (определяется режимом работы депо и может составлять от 365 до 355 дней); $n_п$ – количество позиций в вагоносборочном участке депо, на которых выполняется ремонт вагонов; $n_{см}$ – количество смен работы вагоносборочного участка в течение рабочего дня; $t_р^{см}$ – продолжительность ремонта вагонов, рабочих смен. Обычно для деповского ремонта вагонов – 1 смена, капитального – 2 смены, капитального ремонта с повышенным объемом работ – 3 смены (полувагоны для перевозки цемента и минеральных удобрений).

Исходя из формулы (1) потребное количество ремонтных позиций

$$n_п = \frac{N_г t_р^{см}}{Д_р n_{см}}. \tag{2}$$

С учетом того, что вагонные депо при плановых видах ремонта вагонов, как правило, работают в односменном режиме продолжительностью 12 часов, формулу (2) можно упростить к виду

$$n_п = \frac{N_г t_р^{см}}{Д_р}. \tag{3}$$

Среднее количество плановых ремонтов вагона в течение одного года

$$K_г = \frac{K_{сл}}{t_{сл}}, \tag{4}$$

где $K_{сл}$ – количество плановых ремонтов одного вагона за весь срок службы (см. таблицу 2); $t_{сл}$ – нормативный срок службы вагона, лет (см. таблицу 1).

Значение количества ремонтов вагона в течение одного года, $N_{г.в}$, можно рассматривать как годовую программу ремонта, привязанную к одному вагону

$$N_{г.в} = K_г = \frac{K_{сл}}{t_{сл}}. \tag{5}$$

Подставив выражение $N_{г.в}$ из формулы (5) в выражение (2), получим потребное количество ремонтных позиций для одного вагона:

$$n_{п.в} = \frac{K_{сл} t_р^{см}}{Д_р t_{сл}}. \tag{6}$$

Значения, рассчитанные с использование зависимости (5), колеблются в пределах от 0,00113 до 0,00094. Поскольку оперировать с такими малыми величинами затруднительно, расчет выполним применительно к 1000 вагонов. Результаты расчета показаны в таблице 3.

*Таблица 3* – **Расчет потребности в ремонтных позициях для выполнения плановых видов ремонта грузовых вагонов в расчете на 1000 вагонов**

| Род грузового вагона | Нормативный срок службы, лет | Количество ремонтов за весь срок службы | | Количество ремонтных позиций | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Деповской ремонт | Капитальный ремонт | Деповской ремонт | Капитальный ремонт | Всего |
| **Крытые**<br>Универсальные, включая оборудованные теплоизоляцией | 32 | 9 | 2 | 0,79 | 0,35 | 1,14 |
| Для перевозки зерна | 30 | 8 | 1 | 0,75 | 0,19 | 0,94 |
| Для перевозки автомобилей | 30 | 8 | 2 | 0,75 | 0,38 | 1,13 |
| Для перевозки скота | 30 | 13 | 1 | 1,22 | 0,19 | 1,41 |
| **Платформы**<br>Универсальные | 32 | 8 | 2 | 0,70 | 0,35 | 1,06 |
| Для перевозок большегрузных контейнеров, крупнотоннажных контейнеров и колесной техники | 32 | 9 | 1 | 0,79 | 0,18 | 0,97 |
| Для перевозки рулонной стали, листовой стали, заготовок, колес, колесных пар | 32 | 9 | 1 | 0,79 | 0,18 | 0,97 |
| Для перевозки лесоматериалов | 32 | 9 | 1 | 0,79 | 0,18 | 0,97 |
| **Полувагоны**<br>Универсальные модели 12-132-03 на тележках 18-578 | 22 | 7 | 2 | 0,90 | 0,51 | 1,41 |
| Универсальные, глуходонные, с глухим кузовом | 22 | 9 | 1 | 1,15 | 0,26 | 1,41 |
| Думпкары | 22 | 9 | 2 | 1,15 | 0,51 | 1,66 |
| Хоппер-дозаторы | 25 | 7 | 2 | 0,79 | 0,68 | 1,46 |
| **Цистерны**<br>4-осные нефтебензиновые | 32 | 9 | 2 | 0,79 | 0,35 | 1,14 |
| 8-осные нефтебензиновые | 32 | 13 | 2 | 1,14 | 0,35 | 1,50 |
| Для перевозки кислоты 4- и 8-осные | 18 | 7 | 2 | 1,10 | 0,63 | 1,72 |
| Для перевозки цемента и других порошкообразных грузов | 28 | 11 | 2 | 1,11 | 0,60 | 1,71 |
| Для перевозки пропана, аммиака, углеводородных газов | 40 | 16 | 3 | 1,13 | 0,42 | 1,55 |
| **В среднем по всем типам вагонов** | | | | 0,93 | 0,37 | 1,30 |

С учетом того, что на полигоне Белорусской железной дороги возможно обращение вагонов, находящихся в собственности различных предприятий и организаций в количестве около 50 тысяч, потребность в ремонтных позициях для выполнения их деповского и капитального ремонтов составит $1{,}3 \cdot 50 = 65$ позиций.

**Список литературы**


1 **Гизатуллина, В. Г.** Разработка методики для расчета показателей и коэффициентов производительности труда на предприятиях вагонного хозяйства / В. Г. Гизатуллина, В. Ф. Разон, О. В. Воробей // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. (Гомель 25–26 ноября 2021 г.) : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2021. – С. 97–98.

2 **Гизатуллина, В. Г.** Анализ трудоемкости ремонта грузовых вагонов в депо белорусской железной дороги / В. Г. Гизатуллина, В. Ф. Разон, А. Н. Кальницкий // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. (Гомель 25–26 ноября 2021 г.) : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2021. – С. 98–100.

3 **Гизатуллина, В. Г.** Основные подходы к выбору норм времени отдельных видов работ для их использования при определении производительности труда на предприятиях вагонного хозяйства / В. Г. Гизатуллина, В. Ф. Разон, Н. В. Здановская // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. (Гомель 24–25 ноября 2022 г.) : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2022. – С. 97–98.

4 **Гизатуллина, В. Г.** Расчет производительности труда на предприятиях вагонного хозяйства / В. Г. Гизатуллина, В. Ф. Разон, Н. В. Здановская // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. (Гомель 24–25 ноября 2022 г.) : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2022. – С. 99–100.

5 **Разон, В. Ф.** Методика оценки производственной мощности колесных цехов вагоноремонтных заводов / В. Ф. Разон // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию БелИИЖТа – БелГУТа (Гомель 16–17 ноября 2023 г.) : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2023. – С. 77–78.

6 **Разон, В. Ф.** Методика оценки производственной мощности колесно-роликовых участков вагонных депо Белорусской железной дороги / В. Ф. Разон // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию БелИИЖТа – БелГУТа (Гомель 16–17 ноября 2023 г.) : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2023. – С. 79–80.

УДК 629.46.083

# ВЛИЯНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ НА ПОТРЕБНОСТЬ В ПЕРИОДИЧЕСКИХ РЕМОНТАХ

*В. Ф. РАЗОН*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Сроки проведения периодических ремонтов грузовых вагонов на Белорусской железной дороге утверждены Приказом № 15Н от 16.01.2017 г. Рассмотрим влияние срока службы вагонов на потребность в ремонтной базе применительно к четырем вариантам срока службы: 25, 50, 75 и 100 процентов.

В выполненных расчетах определена потребность в ремонтных позициях в расчете на 1000 вагонов с учетом следующих факторов:

– количества рабочих дней в году;
– продолжительности выполнения деповского и капитального ремонта;
– периодичности выполнения ремонтов;
– нормативного срока службы вагонов.

В результате расчетов получена суммарная потребность в ремонтных позициях для выполнения плановых видов ремонта по основным типам вагонов, показанная в таблице 1.

*Таблица 1* – **Потребность в ремонтных позициях для выполнения плановых видов ремонта грузовых вагонов с учетом срока службы в расчете на 1000 вагонов**

| Род грузового вагона | Нормативный срок службы, лет | Процент от нормативного срока службы | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 25 | 50 | 75 | 100 |
| **Крытые**<br>Универсальные, включая оборудованные теплоизоляцией | 32 | 0,70 | 1,23 | 1,06 | 1,14 |
| Для перевозки зерна | 30 | 0,70 | 1,13 | 0,98 | 0,94 |
| Для перевозки автомобилей | 30 | 1,41 | 1,13 | 1,22 | 1,13 |
| Для перевозки скота | 30 | 1,06 | 1,50 | 1,47 | 1,41 |
| **Платформы**<br>Универсальные | 32 | 0,70 | 1,06 | 1,06 | 1,06 |
| Для перевозок большегрузных контейнеров, крупнотоннажных контейнеров и колесной техники | 32 | 0,70 | 0,88 | 1,06 | 0,97 |
| Для перевозки рулонной стали, листовой стали, заготовок, колес, колесных пар | 32 | 0,70 | 0,88 | 1,06 | 0,97 |
| Для перевозки лесоматериалов | 32 | 0,70 | 0,88 | 1,06 | 0,97 |
| **Полувагоны**<br>Универсальные модели 12-132-03 на тележках 18-578 | 22 | 0,94 | 1,28 | 1,49 | 1,41 |
| Универсальные, глуходонные, с глухим кузовом | 22 | 0,94 | 1,54 | 1,49 | 1,41 |
| Думпкары | 22 | 0,94 | 1,79 | 1,82 | 1,66 |
| Хоппер-дозаторы | 25 | 0,94 | 1,41 | 1,19 | 1,46 |
| **Цистерны**<br>4-осные нефтебензиновые | 32 | 0,70 | 1,23 | 1,06 | 1,14 |
| 8-осные нефтебензиновые | 32 | 1,06 | 1,41 | 1,64 | 1,50 |
| Для перевозки кислоты 4- и 8-осные | 18 | 2,25 | 1,88 | 2,01 | 1,72 |
| Для перевозки цемента и других порошкообразных грузов | 28 | 1,21 | 1,81 | 1,88 | 1,71 |
| Для перевозки пропана, аммиака, углеводородных газов | 40 | 1,69 | 1,69 | 1,69 | 1,55 |
| **В среднем по всем типам вагонов** | | 1,02 | 1,34 | 1,37 | 1,3 |

Из расчетов следует, что минимальная потребность в ремонтных позициях – в среднем 1,02 на 1000 вагонов – наблюдается у вагонов со сроком службы около 25 %. Это объясняется тем, что у новых вагонов первый деповской ремонт наступает позже, чем последующие, а также тем, что основная масса этих вагонов еще не требует капитального ремонта с длительным простоем.

Наибольшая потребность в ремонте – 1,37 позиций на 1000 вагонов – наблюдается у вагонов со сроком службы 75 %. Причина в том, что у этих вагонов проводят капитальный ремонт в расчете на один год эксплуатации значительно чаще, чем у вагонов других групп.

УДК 629.42.083:629.4.072

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ЛОКОМОТИВА ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ЛОКОМОТИВНЫХ БРИГАД

*Ю. Г. САМОДУМ*
*Белорусский государственный университет транспорта*

*И. А. ЛИСИЧКИН*
*Белорусская железная дорога, г. Минск*

Одной из основных задач локомотивного хозяйства Белорусской железной дороги является повышение эксплуатационной надежности и эффективности использования локомотивов. На новых сериях локомотивов используется большое количество микропроцессорной электронной техники. Эти локомотивы оборудуются различными диагностическими системами, имеющими функции контроля, управления и записи параметров работы оборудования локомотива. Использование данных, получаемых диагностическими системами, позволяет своевременно оценивать техническое состояние локомотивов, а также понимать, на какие узлы и агрегаты необходимо обращать внимание при ремонте и техническом обслуживании локомотивов. Основными контролируемыми параметрами систем тепловозов являются параметры работы дизеля и его систем.

В 2021 году в локомотивное депо Гомель поступил первый тепловоз ТЭМ18ДМ. В настоящее время обслуживаемый парк локомотивов этой серии в депо Гомель составляет 6 единиц. Тепловоз ТЭМ18ДМ является маневрово-вывозным тепловозом с электрической передачей постоянно-постоянного тока, серийно выпускается на Брянском машиностроительном заводе (АО «УК ’’БМЗ’’») с 2007 года. Мощность тепловоза составляет 780 кВт, максимальная сила тяги – 319 кН. Максимальная конструкционная скорость тепловоза составляет 100 км/ч, скорость длительного режима – 10,5 км/ч. Полная масса тепловоза – 126 т, осевая нагрузка – 21 т/ось. Тепловоз способен работать в кривых с радиусом не менее 80 м.

В связи с относительно небольшим периодом эксплуатации на Белорусской железной дороге тепловозов этой серии перед работниками локомотивных депо встает задача качественного обучения локомотивных бригад и ремонтного персонала. Для этого необходимо представлять, какие узлы и агрегаты являются наиболее уязвимыми в эксплуатации. В локомотивных депо Белорусской железной дороги учет отказов в работе узлов и агрегатов ведется по собственному приписному парку. В локомотивном депо Гомель был выполнен анализ отказов узлов и агрегатов тепловозов ТЭМ18ДМ приписного парка депо [1]. Результаты анализа представлены в виде диаграммы распределения отказов по группам оборудования (рисунок 1).

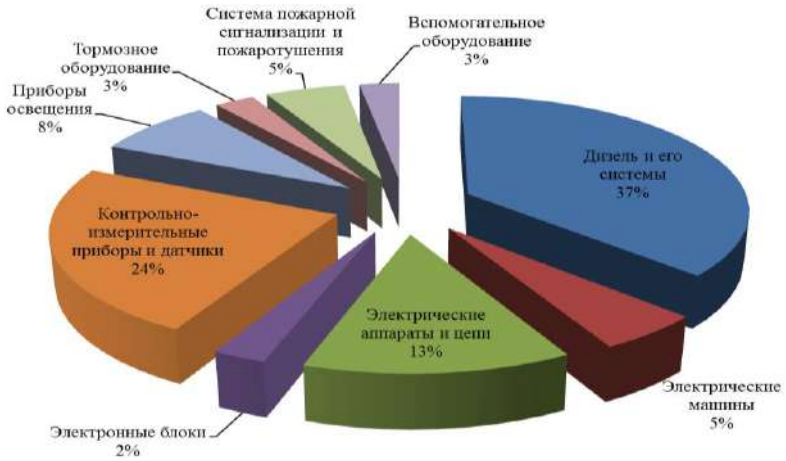



Рисунок 1 – Диаграмма распределения отказов тепловозов серии ТЭМ18ДМ

Как видно из рисунка 1, наибольшее число отказов (37 %) связано с неисправностями дизеля и его систем. На втором месте по числу отказов (24 %) находятся неисправности датчиков и контрольно-измерительных приборов, на третьем – неисправности электрических цепей и аппаратов (13 %).

Локомотивной бригаде была бы полезна своевременная информация не только о неисправностях, но и о причинах их возникновения.

Например, при эксплуатации локомотива ТЭМ18ДМ № 3549 у машинистов имелись замечания по периодическому снижению мощности дизель-генераторной установки при работе на 4-й позиции. В условиях депо была проверена работа датчиков системы охлаждения и системы смазки, которые могут влиять на срабатывание защиты дизеля – замечаний по температуре охлаждающей жидкости и моторного масла, давлению масла и топлива в системах дизеля не выявлено, все параметры соответствовали норме. Однако установлено, что в момент снижения мощности происходит также и снижение выходного сигнала широтно-импульсной модуляции УСТА, что указывает на периодическое кратковременное поступление в систему УСТА сигналов о неисправностях. Проанализировав дискретные сигналы, поступающие в блок УСТА, было определено, что в момент снижения мощности на входе в блок УСТА кратковременно пропадает сигнал о замкнутом контакторе КВ (вспомогательные контакты). Таким образом, информирование машиниста системой диагностики о снижении мощности ДГУ не сопровождалось указанием причины.

Штатная бортовая система диагностики тепловоза ТЭМ18ДМ интегрирована в унифицированный пульт управления и предназначена для оперативного поиска места и определения причин отказов контролируемого оборудования локомотива; оценки энергетической эффективности силовой установки локомотива; хранения и передачи получаемой информации на автоматизированное рабочее место [2].

В процессе эксплуатации локомотива запись состояния и параметров систем тепловоза формируются в файлы регистрации на накопителе дисплейного модуля ТПК.

При эксплуатации тепловозов неизбежно возникают различные неисправности, которые проявляются в виде отклонения от нормальной работы. На тепловозах серии ТЭМ18ДМ бортовая система диагностики при отклонении в работе контролируемых узлов выводит на дисплейный модуль машиниста тревожное сообщение, которое отображается в нижней части дисплея и выделяется красным цветом фона. Для подтверждения восприятия машинисту требуется нажать кнопку на дисплейном модуле, после чего сообщение о неисправности будет считаться прочитанным и скроется из основного меню дисплея. При этом машинист обязан по показаниям на дисплейном модуле выяснить причину появления тревожного сообщения и принять меры по устранению неисправности.

Качество принятых решений и скорость их принятия прямо зависят от уровня технической подготовки локомотивных бригад, знания конструкции и электрической схемы тепловоза, меню дисплейного модуля и перечня контролируемых им параметров, порядка взаимодействия различных систем и узлов локомотива в целом.

В локомотивных депо осуществляется непрерывное профессиональное обучение работников. Техническая учеба является одной из форм оперативного повышения профессионализма работников, где особое внимание уделяется изучению вопросов безопасности движения (регламент переговоров, изменения в техническо-распорядительном акте станций), технологии ремонта, конструкции тягового подвижного состава и др. Для конкретных серий локомотивов локомотивными бригадами изучается анализ случаев отказов и повреждений, возникновения неисправностей, чрезвычайных ситуаций, аварий и методы их устранения; практическая отработка действий в условиях отказа технических средств в чрезвычайных и аварийных ситуациях; совершенствование навыков в своевременном выявлении и устранении неисправностей.

**Вывод.** По каждой серии локомотива имеются типовые рекомендации для локомотивных бригад по устранению часто встречающихся сбоев в работе оборудования либо неисправностей. Для тепловозов серии ТЭМ18ДМ такие рекомендации отсутствуют в силу небольшого срока их эксплуатации. Учитывая, что парк локомотивов этой серии на Белорусской железной дороге планируется увеличивать, то наличие систематизированной информации о наиболее часто встречающихся неисправностях и способах их возможного устранения, в том числе и силами локомотивной бригады, не вызывает сомнения. Поэтому в ближайшей перспективе запланирована разработка такого документа на основании опыта эксплуатации тепловозов ТЭМ18ДМ в локомотивных депо Белорусской железной дороги.

**Список литературы**

1 Анализ отказов тепловозов серии ТЭМ18ДМ за 2022–2024 г. – Гомель, 2024. – 12 с.

2 Комплект электрооборудования для тепловоза ТЭМ18ДМ с бортовым энергоснабжением, унифицированными пультами управления и электротормозом. Руководство по эксплуатации 27.Т.315.00.00.000 РЭ. – Коломна : АО «ВНИКТИ», 2012. – 26 с.

УДК 629.4.015

# ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ В КРИВЫХ УЧАСТКАХ ПУТИ

*П. А. САХАРОВ, М. Е. БЕЛЬЧЕНКО*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В настоящее время актуальным остается вопрос обеспечения безопасности движения поездов. Значительная часть сходов подвижного состава с рельсов происходит в кривых участках пути, в связи с чем оценка устойчивости движения вагонов по рельсам в кривых представляет особый интерес. Нарушение устойчивости в большинстве случаев связано с действием значительных горизонтальных поперечных сил в точках контакта колес с рельсами, вызванных действием боковых направляющих и центробежных сил, а также поперечной составляющей продольных сил, передаваемых через автосцепки под углом по отношению к осям вагонов. При этом наиболее склонны к нарушению безопасности движения поезда большой массы и длины, а также неоднородные по массе с порожними вагонами в голове или центре поезда [1]. Существует необходимость оценки уровня поперечных направляющих сил, действующих в точках контакта колес с рельсами в кривых участках различного радиуса, а также их предельных значений, вызывающих нарушение устойчивости движения.

Для исследования указанного выше вопроса разработана пространственная компьютерная динамическая модель. Она включает трехмерные модели рельсового пути и колесных пар, геометрические характеристики которых приняты в соответствии с конструкторской документацией (рельсы типа Р65 и стандартные колесные пары грузовых вагонов). Объемные модели рельсов и колесных пар позиционированы и импортированы в программный комплекс динамического моделирования MSC.ADAMS. Остальные узлы вагона выполнены упрощенно в виде простейших тел непосредственно в указанном программном комплексе. Габариты вагона, масса и упругие свойства рессорного подвешивания приняты в соответствии с характеристиками полувагона модели 12-726-80. Для возможности оценки влияния продольных сил в поезде на устойчивость движения подвижного состава количество вагонов в модели принято равным трем. Модель представлена на рисунке 1.

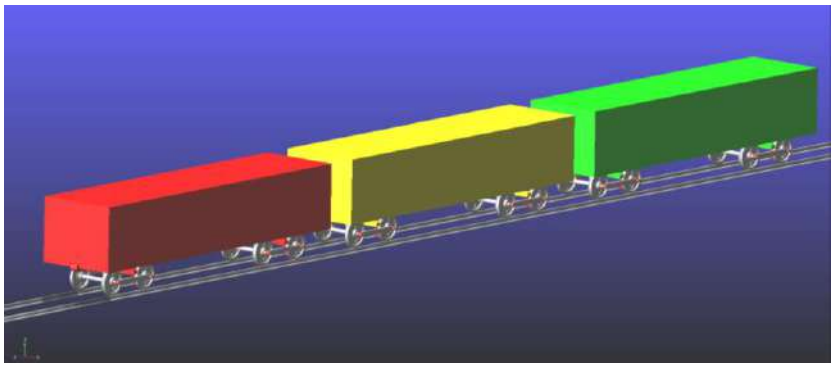


Рисунок 1 – Модель движения вагонов по рельсовой колее в программе MSC.ADAMS

Контактное взаимодействие колес с рельсами реализуется с помощью встроенных функциональных возможностей программного комплекса MSC.ADAMS. Для этого во вкладке «Forces» в разделе «Special Forces» выбрана команда «Create a Contact», указаны взаимодействующие друг с другом объекты и характеристики, моделирующие их упруго-вязкие свойства. Последние приняты на основании рекомендаций, указанных в работе [2]. Взаимодействие узлов тележек между собой обеспечено приложенными механическими связями. Разработанная компьютерная модель позволяет исследовать движение подвижного состава по прямым и кривым участкам пути, определять перемещения, скорости, ускорения и силы взаимодействия узлов вагона между собой и с рельсовым путем, а также взаимодействие вагонов друг с другом.

С помощью разработанной модели определены наиболее нагруженные в процессе движения по кривому участку пути колесные пары. Расчеты выполнены для кривой радиусом 400 м. Результаты показали, что наибольшие силы действуют на первые по ходу движения колесные пары тележек. Их

средние значения между наружным рельсом и колесом превысили 150 кН, а между внутренним рельсом и колесом – 60 кН, при массе вагона брутто 80 т и скорости движения 100 км/ч. Вторые колесные пары каждой тележки менее нагружены. Действующие на них средние силы составили около 120 и 80 кН соответственно для наружного и внутреннего колес. Стоит отметить, что вертикальная и горизонтальная силы могут передаваться от колеса на рельс в разных точках профиля катания, поэтому целесообразно оценивать их влияние в отдельности. Для рассмотренного случая на наиболее нагруженной первой колесной паре вагона в точке контакта гребня наружного колеса с рельсом максимальные горизонтальные силы достигали 110 кН при среднем значении около 70 кН. На внутреннее колесо при этом действовали средние горизонтальные силы 20 кН. Средние вертикальные силы на наружное и внутреннее колесо соответственно составили около 140 и 60 кН. Похожие соотношения сил показали результаты расчетов движения вагонов при других массах и радиусах кривых участков.

Таким образом, при движении по кривому участку пути наибольшую нагрузку воспринимают первые по ходу движения колесные пары тележек. При этом на наружное колесо действуют существенно большие силы, чем на внутреннее.

Для наиболее нагруженной первой колесной пары определены средние значения горизонтальных поперечных и вертикальных сил, действующих в точках контакта с рельсами при различных значениях массы вагонов, скорости их движения и радиуса кривого участка пути. Рассмотрены случаи движения вагонов по кривым радиусом от 400 до 1000 м со скоростью 40–100 км/ч. Результаты показали, что горизонтальные силы на внутреннем колесе пропорциональны массе вагона и составляют 3–28 кН при массе вагонов 21–90 т. На наружном колесе они изменяются в диапазоне от 4 до 80 кН и пропорциональны не только массе, но и скорости движения. Вертикальные силы с увеличением скорости движения и уменьшением радиуса кривой увеличиваются на наружном колесе и уменьшаются на внутреннем. К примеру, в кривой 400 м увеличение скорости с 40 до 100 км/ч приводит к увеличению вертикальной силы на наружное колесо в зависимости от массы вагона на величину до 30 % и снижению ее на внутреннем колесе до 34 %.

Разработанная модель позволила определить предельные боковые силы в точке контакта гребня направляющего колеса с рельсом, при достижении которых происходит сход вагона с рельсов. Построены зависимости указанных предельных сил от массы вагонов при различных скоростях движения. Для кривого участка пути радиусом 400 м результаты представлены на рисунке 2.

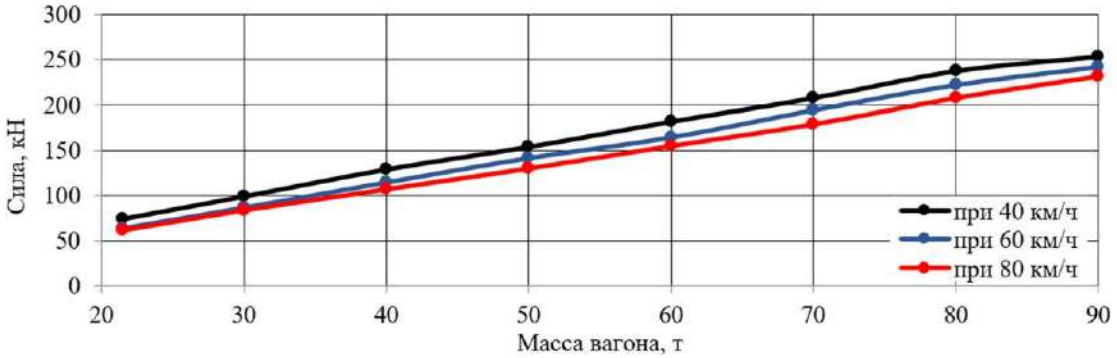



Рисунок 2 – Зависимости предельных боковых сил, приводящих к сходу подвижного состава с рельсов, от массы вагонов при различных скоростях движения в кривых участках пути радиусом 400 м

Таким образом, разработанная модель движения вагонов по рельсовой колее позволила оценить силовое взаимодействие колесных пар с рельсами в кривых участках пути. Результаты расчетов могут быть использованы для оценки безопасности движения подвижного состава в кривых участках пути, напряженно-деформированного состояния колесных пар и рельсов или их износа.

**Список литературы**

1 **Shimanovsky, A. O.** Research of the modern absorbing apparatus power characteristics influence on the freight train intercar forces / A. O. Shimanovsky, P. A. Sakharau, M. G. Kuzniatsova // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 985. – P. 1–7.

2 **Марченко, Д. М.** Верификация сил трения, реализуемых в MSC.ADAMS при работе функции «Contact» / Д. М. Марченко, А. О. Шимановский // Механика. Исследования и инновации : сб. науч. тр. / Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель, 2018. – Вып. 11. – С. 185–194.

УДК 006.015.8

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ БЕЗОПАСНОСТИ К ОБОРУДОВАНИЮ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА, РАБОТАЮЩЕМУ ПОД ИЗБЫТОЧНЫМ ДАВЛЕНИЕМ

*З. Ю. ТРЕТЬЯК, К. В. СВИРИДЕНКО, Е. М. АЛЬХОВСКАЯ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Технический регламент Евразийского экономического союза (далее – ЕАЭС) ТР ТС 032/2103 «О безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением» [1] устанавливает обязательные для применения и исполнения на таможенной территории ЕАЭС единые требования безопасности к оборудованию, работающему под избыточным давлением, выпускаемому в обращение и предназначенному для применения на таможенной территории ЕАЭС.

Технический регламент [1] распространяется на следующие виды оборудования:

а) сосуды, предназначенные для сжатых, сжиженных, растворенных под давлением газов и паров, используемые для рабочих сред группы 1 и имеющие: расчетное давление свыше 0,05 МПа, вместимость более 0,001 м$^3$ и произведение значения расчетного давления на значение вместимости, составляющее свыше 0,0025 МПа·м$^3$; расчетное давление свыше 20 МПа, вместимость свыше 0,0001 до 0,001 м$^3$ включительно;

б) сосуды, предназначенные для сжатых, сжиженных, растворенных под давлением газов и паров, используемые для рабочих сред группы 2 и имеющие: расчетное давление свыше 0,05 МПа, вместимость более 0,001 м$^3$ и произведение значения расчетного давления на значение вместимости, составляющее свыше 0,005 МПа·м$^3$; расчетное давление свыше 100 МПа, вместимость свыше 0,0001 до 0,001 м$^3$ включительно;

в) сосуды, предназначенные для жидкостей, используемые для рабочих сред группы 1 и имеющие: расчетное давление свыше 0,05 МПа, вместимость более 0,001 м$^3$ и произведение значения расчетного давления на значение вместимости, составляющее свыше 0,02 МПа·м$^3$; расчетное давление свыше 50 МПа, вместимость свыше 0,0001 до 0,001 м$^3$ включительно;

г) сосуды, предназначенные для жидкостей, используемые для рабочих сред группы 2 и имеющие: расчетное давление свыше 1 МПа, вместимость более 0,01 м$^3$ и произведение значения расчетного давления на значение вместимости, составляющее свыше 1 МПа·м$^3$; расчетное давление свыше 100 МПа, вместимость свыше 0,0001 до 0,01 м$^3$ включительно;

д) котлы, имеющие вместимость более 0,002 м$^3$, предназначенные для получения горячей воды, температура которой свыше 110 °С, или пара, избыточное давление которого свыше 0,05 МПа, а также сосуды с огневым обогревом, имеющие вместимость более 0,002 м$^3$;

е) трубопроводы и арматура, имеющие расчетное давление свыше 0,05 МПа, номинальный диаметр более 25 мм, предназначенные для сжатых, сжиженных, растворенных под давлением газов и паров и используемые для рабочих сред группы 1;

ж) трубопроводы и арматура, имеющие расчетное давление свыше 0,05 МПа, номинальный диаметр более 32 мм и произведение значения расчетного давления и значения номинального диаметра, составляющее свыше 100 МПа·мм, предназначенные для сжатых, сжиженных, растворенных под давлением газов и паров и используемые для рабочих сред группы 2;

з) трубопроводы и арматура, имеющие расчетное давление свыше 0,05 МПа, номинальный диаметр более 25 мм и произведение значения расчетного давления и значения номинального диаметра, составляющее свыше 200 МПа·мм, предназначенные для жидкостей и используемые для рабочих сред группы 1;

и) трубопроводы и арматура, имеющие расчетное давление свыше 1 МПа, номинальный диаметр более 200 мм и произведение значения расчетного давления и значения номинального диаметра свыше 500 МПа·мм, предназначенные для жидкостей и используемые для рабочих сред группы 2;

к) элементы оборудования (сборочные единицы) и комплектующие к нему, выдерживающие воздействие давления свыше 0,05 МПа;

л) показывающие и предохранительные устройства, за исключением устройств, отнесенных к средствам измерений;

м) барокамеры (кроме одноместных медицинских);

н) устройства и приборы безопасности.

Применительно к железнодорожному подвижному составу требования [1] распространяются на следующее оборудование:

– сосуды, предназначенные для газов, сжиженных газов, растворенных под давлением используемых для рабочих сред групп 1, 2;

– сосуды, предназначенные для жидкостей, используемых для рабочих сред групп 1, 2;

– элементы оборудования и комплектующие к нему, выдерживающие воздействия давления;

– арматура, имеющая номинальный диаметр более 25 мм (для оборудования с рабочей средой группы 1), арматура, имеющая номинальный диаметр более 32 мм (для оборудования, используемого для газов с рабочей средой группы 2);

– показывающие и предохранительные устройства.

Технический регламент [1] не распространяется на тормозное оборудование подвижного состава железнодорожного транспорта.

В дополнение к [1] для подтверждения соответствия железнодорожного подвижного состава и его составных частей необходимо учитывать и другие технические регламенты ЕАЭС – ТР ТС 001/2011 «О безопасности железнодорожного подвижного состава», ТР ТС 002/2011 «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта», которые устанавливают общие требования безопасности к железнодорожному подвижному составу, включая требования к его конструкции, производству, модернизации, ремонту и эксплуатации.

Таким образом, требования к безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением в железнодорожном подвижном составе – комплексные и включают в себя как общие требования по безопасности, так и специфические требования к оборудованию, работающему под давлением.

В качестве примера в таблице 1 приведены требования безопасности [1] к сосудам контейнера-цистерны для перевозки и хранения неохлажденных сжиженных газов и продуктов химических под давлением, вместимость 24,5 м$^3$, максимальное допустимое рабочее давление – 2,2 МПа, рабочая среда группы 1 (сжиженные газы), категория оборудования 4, сталь изготовления сосуда P460NL2 EN 10028-3.

*Таблица 1* – **Требования безопасности и показатели для подтверждения соответствия сосуда контейнера-цистерны для перевозки и хранения неохлажденных сжиженных газов и продуктов химических под давлением**

| Обозначение документа, определяющего показатель | Показатель | Значение показателя |
|---|---|---|
| *Требование безопасности 1: Оборудование должно разрабатываться (проектироваться) и изготавливаться (производиться) таким образом, чтобы при применении по назначению, эксплуатации и техническом обслуживании обеспечивалось его соответствие требованиям безопасности* | | |
| Пункт 5.1.8 ГОСТ 31314.3-2006 | Любое запорное устройство на контейнере-цистерне, которое в незакрытом состоянии может привести к возникновению опасной ситуации, должно быть обеспечено надежной системой закрытия, имеющей по возможности систему внешней индикации рабочего положения запорного устройства | Наличие |
| Пункт 5.6.1.3 ГОСТ 31314.3-2006 | Цистерны или отсеки цистерн без вакуумных предохранительных устройств должны выдерживать внешнее давление, на 40 кПа превышающее внутреннее давление | Должно обеспечиваться |
| Пункт 5.6.4.3 ГОСТ 31314.3-2006 | Контейнеры-цистерны или их отсеки, предназначенные для транспортирования опасных грузов, должны быть оснащены предохранительными устройствами, отвечающими требованиям компетентного органа | Наличие |
| *Требование безопасности 2: При изготовлении (производстве) оборудования и устройств безопасности изготовителем обеспечивается их соответствие параметрам и характеристикам, установленной проектной документацией, и требованиям настоящего технического регламента (ТР ТС 032/2013)* | | |
| Пункт 5.6.4.4 ГОСТ 31314.3-2006 | На каждом предохранительном устройстве должно быть четко указано давление, на которое предохранительное устройство настроено | Наличие |
| Пункт 5.1.10 ГОСТ 31314.3-2006 | Материалы, применяемые для изготовления контейнеров-цистерн, должны быть стойкими к воздействию перевозимого груза и окружающей среды и иметь гарантированные свойства (прочность, вязкость, свариваемость и т. д.) | Должно обеспечиваться |
| Пункт 5.6.2 ГОСТ 31314.3-2006 | При необходимости дополнительно к требованиям 5.1.10 ГОСТ 31314.3-2006 следует учитывать допуск на коррозию | Должно обеспечиваться |
| Пункт 5.6.6 ГОСТ 31314.3-2006 | Измерительная аппаратура, которая может находиться в прямом контакте с содержимым цистерны, должна быть выполнена из прочных материалов | Должно обеспечиваться |

*Окончание таблицы 1*

| Обозначение документа, определяющего показатель | Показатель | Значение показателя |
|---|---|---|
| *Требование безопасности 3: Конструкция оборудования должна обеспечивать безопасный доступ персонала к приборам безопасности и приборам контроля параметров рабочей среды оборудования* | | |
| Пункт 5.6.5 ГОСТ 31314.3-2006 | Контейнеры-цистерны должны иметь люки или другие отверстия, позволяющие провести их полный внутренний осмотр | Наличие |
| Пункт 5.6.5 ГОСТ 31314.3-2006 | Диаметр люков должен быть не менее, мм | 500 |
| *Требование безопасности 4: Сварные соединения не должны иметь внешних или внутренних дефектов (повреждений), которые могут повлиять на безопасность оборудования. Минимальные значения механических характеристик сварных соединений оборудования должны быть не ниже минимальных значений механических характеристик соединяемых материалов* | | |
| Пункт 27 приложения 2 ТР ТС 032/2013 | Сварные соединения не должны иметь внешних или внутренних дефектов (повреждений), которые могут повлиять на безопасность оборудования | Должно обеспечиваться |
| *Требование безопасности 5: Экспериментальные испытания на прочность оборудования проводятся на образце. В процессе испытаний обеспечивается возможность наблюдения за критическими зонами оборудования с помощью контрольно-измерительных средств, способных достоверно регистрировать деформации и напряжения* | | |
| Пункт 6.14.3 ГОСТ 31314.3-2006 | Напряжения, возникающие в стенках и днищах цистерны во время испытаний давлением не должны превышать, МПа | 285 |
| *Требование безопасности 6: На листах, плитах, трубах и поковках, используемых при изготовлении (производстве) оборудования, должна сохраняться маркировка изготовителя* | | |
| Пункт 36 приложения 2 ТР ТС 032/2013 | На листах, плитах, трубах и поковках, используемых при изготовлении (производстве) оборудования, должна сохраняться маркировка изготовителя | Наличие |
| *Требование безопасности 7: Сварные соединения не должны иметь внешних или внутренних дефектов (повреждений), которые могут повлиять на безопасность оборудования; минимальные значения механических характеристик сварных соединений оборудования должны быть не ниже минимальных значений механических характеристик соединяемых материалов; применяемый в оборудовании материал считается пластичным, если при испытании на растяжение его относительное удлинение после разрыва составляет не менее 14 %, а ударная вязкость, определенная на образцах с концентратором типа KCV (с V-образным надрезом), составляет не менее 27 Дж/см² при температуре выше 20 °С, но не выше минимально допустимой температуры* | | |
| Пункты 27, 39 приложения 2 ТР ТС 032/2013 | Временное сопротивление, МПа | Не менее 570 |
| | Предел текучести, МПа | Не менее 460 |
| | Удлинение после разрыва, % | Не менее 17 |
| | Ударная вязкость при температуре –50, 0, 20 °С, Дж/см$^2$ | Не менее 27 |
| | Трещины в сварном соединении при статическом изгибе | Отсутствие являющихся браковочным признаком трещин при достижении параллельности сторон согласно ГОСТ 6996-66 |
| *Требование безопасности 7: При работающих предохранительных клапанах допускается превышение расчетного давления в сосуде не более чем на 25 % при условии, что это превышение подтверждено расчетом на прочность и предусмотрено руководством (инструкцией) по эксплуатации сосуда* | | |
| Пункт 55 приложения 2 ТР ТС 032/2013 | При работающих предохранительных клапанах допускается превышение расчетного давления в сосуде не более чем на 25 % при условии, что это превышение подтверждено расчетом на прочность и предусмотрено руководством (инструкцией) по эксплуатации сосуда | Должно обеспечиваться |
| *Требование безопасности 7: Требования к маркировке* | | |
| Пункт 29 ТР ТС 032/2013 | На оборудование наносится маркировка в виде четких и нестираемых надписей, содержащих следующую информацию:<br>а) наименование и (или) обозначение типа, марки, модели оборудования;<br>б) параметры и характеристики, влияющие на безопасность;<br>в) наименование материала, из которого изготовлено (произведено) оборудование (элементы);<br>г) наименование изготовителя и его товарный знак (при наличии);<br>д) заводской номер;<br>е) дата изготовления (производства) | Наличие |
| Пункт 30 ТР ТС 032/2013 | Место нанесения маркировки определяется проектной организацией и указывается в руководстве (инструкции) по эксплуатации | Должно обеспечиваться |

Соответствие сосудов контейнера-цистерны для перевозки и хранения неохлажденных сжиженных газов и продуктов химических требованиям [1] обеспечивается путем непосредственного выполнения этих требований или путем выполнения требований стандартов, включенных в перечень стандартов, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований [1]. Аналогичным образом могут быть установлены требования безопасности для оборудования железнодорожного подвижного состава, работающего под давлением.

**Список литературы**

1 ТР ТС 032/2013. О безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением / Евразийская экономическая комиссия. – Минск : БелГИСС, 2023. – 33 с.

УДК 620.178.152.4

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА МИКРОУДАРНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

*Н. К. ТУРСУНОВ*
*Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан*

*А. П. КРЕНЬ*
*Институт прикладной физики НАН Беларуси, г. Минск*

*Т. Т. УРАЗБАЕВ, У. Т. РАХИМОВ*
*Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан*

Индентирование с высокой скоростью деформации осуществлялось с помощью оборудования, разработанного в Институте прикладной физики НАН Беларуси, позволяющего регистрировать текущую скорость индентора и всю кривую динамического нагружения (рисунок 1). Оборудование включает динамический портативный твердомер и электронный блок для регистрации и записи сигнала. Регистрация сигнала производилась по традиционной для динамических твердомеров схеме с помощью катушки индуктивности. Далее осуществлялся переход от ЭДС к скорости $V$, глубине внедрения $h$ и контактному усилию $P$, развиваемому при ударе. Более подробно со способом регистрации кривой нагружения можно ознакомиться в [1], где описан подробный алгоритм получения диаграммы нагружения.

Рисунок 1 – Схема оборудования (*а*) и внешний вид прибора (*б*)

Экспериментальные исследования получения высокопрочного чугуна ВЧ50 проведены в шести вариантах. Первый и второй варианты – традиционная модификация в ковше магниевым ферросплавом (ФСMg5 – 2 %) либо с добавлением силикокальция (ФСMg5 – 2 % + СК30 – 0,5 %). Для улучшения эксплуатационных и механических свойств жидкий чугун дополнительно обрабатывали

в реакционной камере по «сэндвич-процессу» с использованием комплексных модификаторов и стальной дроби. Третий и четвёртый варианты включали модификаторы КМ-Si46Mg6AlCa2(Ce+La)0,5 и КМ-Si70Al1,5Ca0,65Ba4 в различных дозировках. По результатам оценивали эффективность модификации, оптимальное количество добавок, формирование графита и механические свойства отливок [2]. Результаты обработки чугуна представлены в таблице 1 и сопоставлены с традиционной предлагаемой технологией.

*Таблица 1* – **Результаты экспериментальных исследований процесса ковшовой обработки чугуна**

| Вариант обработки | Содержание модификаторов, % | $[Mg]_{qol}$, % | $[Al]_{qol}$, % | $[S]_{qol}$, % | $[O]_{\Sigma}$, ppm |
|---|---|---|---|---|---|
| **ИТП** | **Чугун** | **0,005** | **0,007** | **0,025** | **80** |
| 1 (ТТ) | ФСМг5 – 2 % | 0,040 | 0,009 | 0,022 | 40 |
| 2 (ТТ) | ФСМг5 – 2 % + СК30 – 0,5 % | 0,045 | 0,0010 | 0,020 | 35 |
| 3 (ПТ) | КМ-Si46Mg6AlCa2(Ce+La)0,5 – 1,4 %<br>КМ-Si70Al1,5Ca0,65Ba4 – 0,15 %<br>ВКМ-Si75Al4Ca0,9 – 0,6 % | 0,045 | 0,021 | 0,014 | 20 |
| 4 (ПТ) | КМ-Si46Mg6AlCa2(Ce+La)0,5 – 1,6 %<br>КМ-Si70Al1,5Ca0,65Ba4 – 0,20 %<br>ВКМ-Si75Al4Ca0,9 – 0,8 % | 0,048 | 0,022 | 0,012 | 18 |
| **5 (ПТ)** | **КМ-Si46Mg6AlCa2(Ce+La)0,5 – 1,8 %<br>КМ-Si70Al1,5Ca0,65Ba4 – 0,30 %<br>ВКМ-Si75Al4Ca0,9 – 1 %** | **0,052** | **0,023** | **0,010** | **15** |
| 6 (ПТ) | КМ-Si46Mg6AlCa2(Ce+La)0,5 – 2 %<br>КМ-Si70Al1,5Ca0,65Ba4 – 0,35 %<br>ВКМ-Si75Al4Ca0,9 – 1,2 % | 0,055 | 0,025 | 0,009 | 12 |

*Примечание* – ТТ – традиционная технология; ПТ – предложенная технология; КМ – комплексные модификаторы; БКМ – брикетированные комплексные модификаторы.

Результаты исследования механических свойств чугуна марки ВЧ50, обладающего высокой прочностью после процесса комплексной модификации чугуна, представлены в таблице 2, предлагаемая технология сопоставлена с традиционной.

*Таблица 2* – **Обработка чугуна в ковше и литейной системе и результаты экспериментальных исследований процесса подачи**

| Вариант | Категория свойств | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Предел прочности при растяжении $\sigma_b$, МПа, кг/мм$^2$ | Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа, кг/мм$^2$ | Относительное удлинение δ, % | Твердость по Бринеллю, НВ |
| **ГОСТ 7293-85** | не менее | | | |
| | **500** | **320** | **7,0** | **153-245** |
| 1 (ТТ) | 480/485 | 300 | 5,8 | 180/183 |
| 2 (ТТ) | 500/503 | 325 | 6,1 | 190/192 |
| 3 (ПТ) | 557/560 | 678 | 7,5 | 205/206 |
| 4 (ПТ) | 606/600 | 370 | 7,7 | 228/226 |
| **5 (ПТ)** | **610/615** | **375** | **8,5** | **230/232** |
| 6 (ПТ) | 620/630 | 380 | 6 | 250/255 |

*Примечание* – Значения прочности и твёрдости были получены на установке УзБел ИФЧХ-Ч путём неразрушающего контроля отливки.

Наивысшие механические свойства получены при применении комплексных модификаторов КМ–Si46Mg6AlCa$_2$(Ce+La)0,5, КМ-Si70Al1,5Ca0,65Ba4 и ВКМ–Si75Al4Ca0,9 (варианты 3–6). Однако вариант 6 не соответствует требованиям ГОСТ 7293-85 по твёрдости и удлинению. Наилучшие результаты показали варианты 4 и 5, причём вариант 5 признан оптимальным: предел прочности увеличился на 27 %, текучести – на 25 %, твёрдость – на 28 %.

**Список литературы**

1 **Kren, A.** Non-destructive evaluation of metal plasticity using a single impact microindentation / A. Kren, M. Delendik, A. Machikhin // International Journal of Impact Engineering. – 2022. – № 162. – P. 104141.

2 Improvement of the technology for obtaining synthetic cast iron using local secondary waste raw materials / U. Rakhimov, N. Tursunov, S. Tursunov [et al.] // Универсум: технические науки. 2025. – № 4 (133), Ч. 8. – DOI: 10.32743/УниТеч.2025.133.4.

УДК 621.74.94

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

*Н. К. ТУРСУНОВ, А. А. САИДИРАХИМОВ*
*Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан*

Механические свойства материала характеризуют его сопротивление разрушению, деформации или поведение в процессе разрушения. К ним относятся твердость, пластичность, прочность, упругость, ударная вязкость, сопротивление усталости (выносливость) и др.

Одним из основных критериев качества металла является его хладостойкость, т. е. высокая пластичность и вязкость при низких температурах.

Химический состав и механические свойства стали марки 20ГЛ по ГОСТ 32400-2013 приведены в таблицах 1 и 2 [1].

*Таблица 1* – **Химический состав стали 20ГЛ**

В массовых процентах

| C | Si | Mn | Al | P | S | Cr | Ni | Cu | Fe |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | не более | | | | | |
| 0,17 – 0,25 (–0,020) | 0,30 – 0,50 (±0,10) | 1,10 – 1,40 (±0,10) | 0,020 – 0,060 (+0,005) | 0,020 (+0,005) | 0,020 (+0,005) | 0,30 (+0,20) | 0,30 (+0,30) | 0,60 | ост. |
| *Примечание* – В скобках указаны допускаемые отклонения по химическому составу стали. | | | | | | | | | |

*Таблица 2* – **Механические свойства стали 20ГЛ**

| Предел текучести, МПа | Временное сопротивление, МПа | Относительное удлинение, % | Относительное сужение, % | Ударная вязкость, $KCV^{-60}$, кДж/м$^2$ |
|---|---|---|---|---|
| не менее | | | | |
| 343 | 510 | 18 | 30 | 200 |

Рассмотрены результаты анализа проб на химический состав и механические характеристики некоторых плавок стали марки 20ГЛ. На рисунке 1 показана зависимость механических характеристик от содержания углерода в стали.

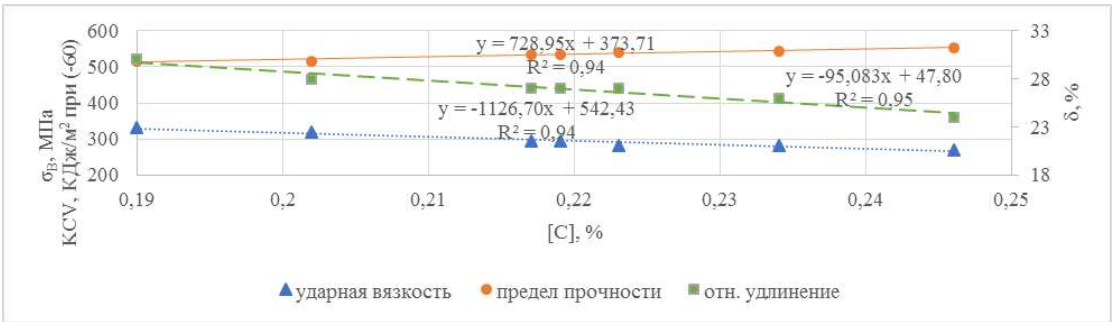



Рисунок 1 – Зависимость механических свойств от содержания углерода

Из рисунка 1 видно, что с увеличением содержания углерода прочность растет, а пластичность и ударная вязкость снижаются. С увеличением углерода от 0,19 до 0,25 % значительно снижается относительное удлинение стали от 30 до 24 %. Повышение содержания углерода в стали, сопровождающееся ростом доли перлита в структуре, приводит к увеличению предела прочности и снижению пластичности. Снижение ударной вязкости, возможно, связано с увеличением перлитной доли в стали.

Кремний также вводят в сталь для ее раскисления. Кремний входит в твердый раствор в феррите, повышает прочностные свойства стали.

На рисунке 2 представлена зависимость механических характеристик от содержания кремния в стали.

Из рисунка 2 видно, что с увеличением содержания кремния в пределах 0,35–0,50 % значение относительного удлинения и ударной вязкости незначительно снижается, а предел прочности повышается.

Марганец – это технологическая добавка, которую вводят в сталь для раскисления и десульфурации – устранения вредного влияния серы.

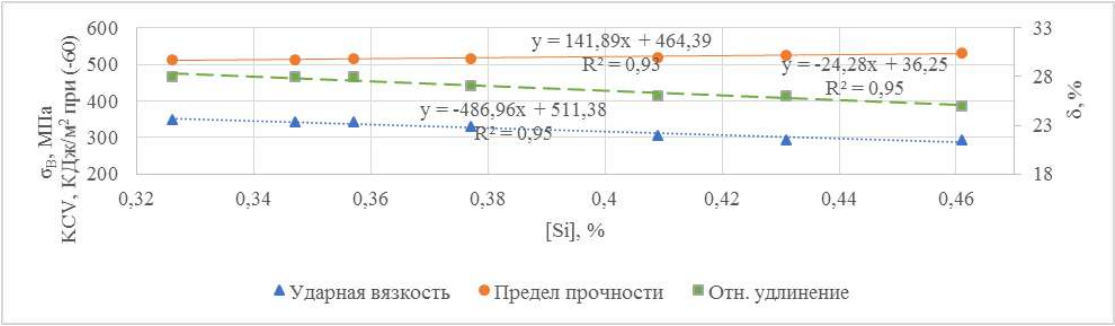



Рисунок 2 – Зависимость механических свойств от содержания кремния

На рисунке 3 показана зависимость механических свойств от содержания марганца.

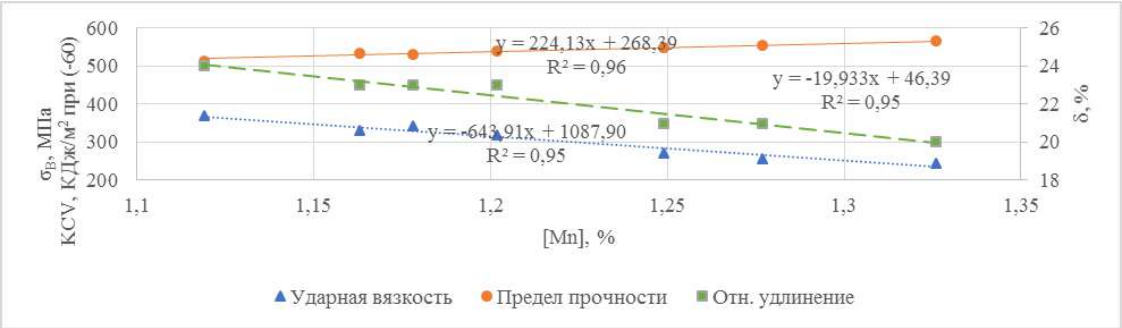



Рисунок 3 – Зависимость механических свойств от содержания марганца

Из рисунка 3 видно, что при повышении содержания марганца от 1,1 до 1,3 % относительное удлинение существенно уменьшается. Марганец также приводит к падению ударной вязкости, однако повышает предел прочности стали.

Алюминий играет роль раскисления и измельчения зерен, что повышает ударную вязкость и пластичность стали. Кроме того, азот может быть связан в нитриды, алюминий (0,05 %) вводят в ковш перед разливкой для получения наследственно мелкозернистой структуры [2].

На рисунке 4 показана зависимость влияния алюминия на механические свойства стали.

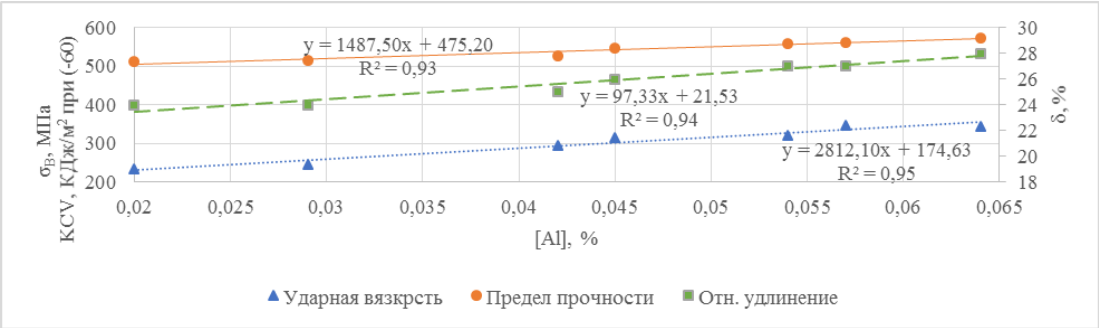



Рисунок 4 – Зависимость механических свойств от содержания алюминия

Из рисунка 4 видно, что при высоком содержании алюминия уровень механических характеристик стали достигает высоких значений. При раскислении алюминием содержание его должно быть на верхнем уровне по ГОСТ в пределах 0,04–0,06 %. Алюминий не оказывает явного вредного влияния на механические свойства стали.

Фосфор является вредной примесью, значительно снижает свойство стали. С повышением содержания фосфора увеличиваются хрупкость, прочность, хладноломкость, снижаются пластичность и вязкость стали [3].

Большой радиус атома серы (0,104 нм) по сравнению с атомом железа приводит к росту прочности и потере пластичности из-за напряженного состояния в решетке железа [4].

На рисунке 5 представлено влияние суммарного содержания серы и фосфора на механические характеристики стали.

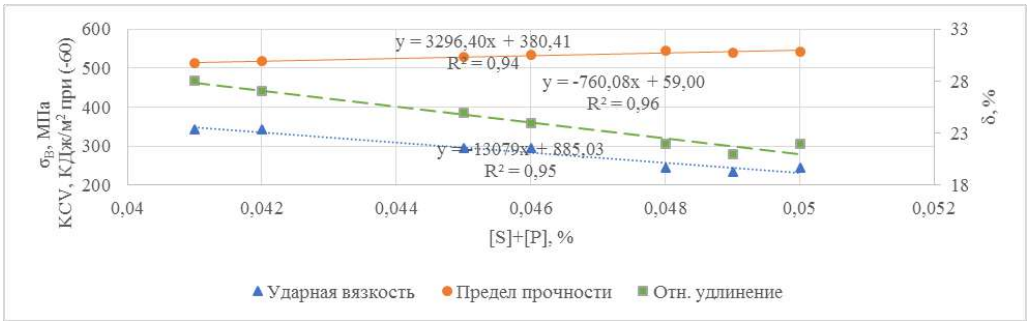



Рисунок 5 – Влияние серы и фосфора на механические свойства стали

Из рисунка 5 видно, что сера и фосфор являются вредными примесями, значительно снижая ударную вязкость и относительное удлинение. Особенно ударная вязкость снижается от 350 до 230 КДж/м$^2$ с увеличением суммарного содержания серы и фосфора от 0,040 до 0,050 %.

На рисунке 6 показаны неметаллические включения в стали 20ГЛ. Основная часть оксидных включений (эндогенные включения) образуются в результате раскисления во время присадки раскислителей и охлаждения жидкой стали (докристаллизационные) и во время ее кристаллизации (кристаллизационные) [5].

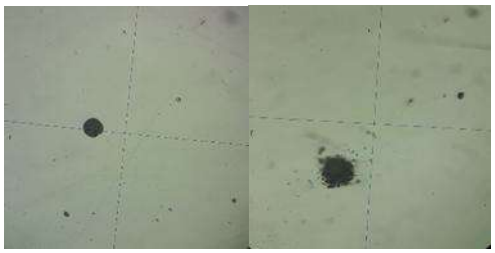


Рисунок 6 – Неметаллические включения в стали 20ГЛ

С повышением содержания серы сталь загрязняется сульфидными включениями. Падение ударной вязкости и пластичности объясняется не только загрязнением стали неметаллическими включениями, но и изменением растворимости серы, которая будет обогащать границы аустенитных и ферритных зерен при остывании металла [4].

Раскисление только алюминием не обеспечивает благоприятных форм и топографии неметаллических включений, а следовательно, и физико-механических свойств стали. Поэтому применяется комплексное модифицирование, при котором вместе с алюминием вводятся элементы для глобуляризации и более дезориентированного распределения оксидно-сульфидных образований. Наиболее перспективными в этом направлении являются щелочноземельные и редкоземельные металлы (ЩЗМ и РЗМ) [6].

Металлографические исследования проводили на поперечных шлифах из литого металла (трефовидных проб) и после травления 3%-м раствором $HNO_3$, в спирте. Использован модульный микроскоп «*Olympus BX 41M LED*» для определения микроструктуры металла.

На рисунке 7 представлена микроструктура стали 20ГЛ после термообработки.

Рисунок 7 – Микроструктура стали 20ГЛ после нормализации и отпуска (×100)

Микроструктура однородная, ферритно-перлитная, мелкозернистая, с равномерным распределением структурных составляющих. Балл зерна по ГОСТ 5639-82 – 8–9, что является допустимым по ГОСТ 32400-2013 (не ниже 8) [7].

Феррит – мягкая, пластичная составляющая структуры. Свойства феррита, в первую очередь, зависят от содержания в нем углерода, легирующих элементов и величины зерна. Углерод и азот,

образующие с железом твердые растворы внедрения, обеспечивают наиболее значительный эффект упрочнения феррита, что в основном обусловлено их сильным взаимодействием с дислокациями и закреплением последних [8].

На прочность феррита сильно влияет размер его зерна. С измельчением зерна феррита одновременно с дополнительным упрочнением снижается температура вязко-хрупкого перехода [8].

Таким образом, измельчение зерен феррита является эффективным способом упрочнения, поскольку одновременно уменьшается склонность к хрупкому разрушению.

Вязкость сталей с ферритно-карбидной структурой увеличивается при измельчении перлитных колоний и зерен феррита. Эти структурные параметры существенно зависят от размера аустенитного зерна. Поэтому для получения высокой степени механических свойств при проведении термической обработки стремятся получить мелкое аустенитное зерно [8].

Испытания показывают, что структура стали с минимальным содержанием вредных примесей и оптимальной легирующей системой обеспечивает высокий уровень прочности и эксплуатационной надежности. Таким образом, эффективное управление химическим составом и технологиями модифицирования стали позволяет получить оптимальные механические характеристики, необходимые для надежной и безопасной эксплуатации деталей подвижного состава.

**Список литературы**


1 ГОСТ 32400-2013. Рама боковая и балка надрессорная литые тележек железнодорожных грузовых вагонов. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2014. – 62 с.

2 Металловедение : учеб. для вузов : в 2 т. Т. 2. Термическая обработка. Сплавы / И. И. Новиков, В. С. Золоторевский, В. К. Портной [и др.] ; под общ. ред. В. С. Золоторевского. – 2-е изд., испр. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2014. – 528 с.

3 **Семин, А. Е.** Современные проблемы металлургии и материаловедения : практикум / А. Е. Семин, А. В. Алпатов, Г. И. Котельников. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2015. – 56 с. – ISBN 978-5-87623-890-0.

4 **Лунев, В. В.** Сера и фосфор в стали / В. В. Лунев, В. В. Аверин. – М. : Металлургия, 1988. – 256 с.

5 Электрометаллургия стали и ферросплавов : учеб. для вузов / Д. Я. Поволоцкий, В. Е. Рощин, М. А. Рысс [и др.] – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1984. – 568 с.

6 **Дурынин, В. А.** Исследование и совершенствование технологии производства с целью повышения ресурса стальных изделий из крупных поковок ответственного назначения / В. А. Дурынин, Ю. П. Солнцев. – СПб. : Химиздат, 2006. – 272 с. – ISBN 5-93808-127-0.

7 ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. – Взамен ГОСТ 5639-65 ; введ. 1983-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 2001. – 15 с.

8 **Смирнов, М. А.** Основы термической обработки стали : учеб. пособие / М. А. Смирнов, В. М. Счастливцев, Л. Г. Журавлев. – М. : Наука и технологии, 2002. – 519 с.


УДК 669.14:536.7

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОБРАЗОВАНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В СТАЛИ МАРКИ 20ГЛ


*Н. К. ТУРСУНОВ, А. А. САИДИРАХИМОВ*

*Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан*


Неметаллические включения по природе происхождения разделяются на два вида:

1) эндогенные включения – образуются в результате химических реакций в процессе выплавки, раскисления, разливки, а также при кристаллизации вследствие изменения растворимости элементов;

2) экзогенные включения – соединения, попавшие в сталь из шихтовых и огнеупорных материалов. Эти включения также могут образовать комплексные соединения [1]:

$$[\mathrm{Mn}]+[\mathrm{S}]=\mathrm{MnS}; \qquad \Delta G^0=-209500+112,02T. \tag{1}$$

$$\lg K_{\mathrm{MnS}}=-\frac{\Delta G^0}{2,3RT}=-\frac{-209500+112,02T}{2,3\cdot 8,31\cdot T}=\frac{10961,12}{T}-5,86. \tag{2}$$

$$K_{\mathrm{MnS}}=\frac{a_{\mathrm{MnS}}}{a_{\mathrm{Mn}}\cdot a_{\mathrm{S}}}=\frac{1}{[\mathrm{Mn}]\cdot f_{\mathrm{Mn}}\cdot[\mathrm{S}]\cdot f_{\mathrm{S}}}=\frac{1}{[\mathrm{Mn}]\cdot[\mathrm{S}]}. \tag{3}$$

При $T$ = 1600 °C константа равновесия $K_{MnS}$ = 0,98 и $1/\ K_{MnS} \approx 1$. Для стали с содержанием марганца 1,1–1,4 % произведение концентраций марганца и серы $([Mn]\times[S])$ намного ниже $1/\ K_{MnS}$. Следовательно, в условиях сталеплавильных процессов в жидком металле сульфиды марганца образовываться не могут.

На рисунке 1 представлена стандартная энергия образования оксида и сульфида марганца.

Рисунок 1 – Зависимость стандартной энергии образования оксида и сульфида марганца от температуры

Образование оксида марганца более термодинамически выгодно, чем сульфида $(\Delta G^0_{MnO} < \Delta G^0_{MnS})$. Образование сульфида марганца возможно при низком содержании кислорода в стали.

Рисунок 2 показывает образование оксида и сульфида марганца с содержанием марганца в стали 1,15 %.

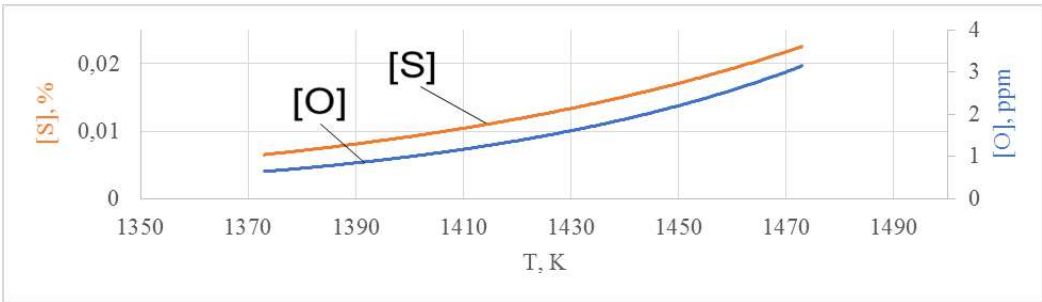



Рисунок 2 – Образование соединений марганца в стали

Из рисунка 2 видно, что содержание кислорода во время кристаллизации при температуре ~1473 К должно быть не более 3,1 *ppm*, чтобы марганец с содержанием 1,15 % эффективно связывал ~0,023 % серы. Это очень низкое содержание кислорода, достижимое в условиях глубокого раскисления:

$$Fe + [S] = FeS; \qquad \Delta G^0_4 = -63000 + 53,45T. \tag{4}$$

$$\lg K_{FeS} = -\frac{\Delta G^0_4}{2,3RT} = -\frac{-63000 + 53,45T}{2,3\cdot 8,31\cdot T} = \frac{3296,2}{T} - 2,8. \tag{5}$$

$$K_{FeS} = \frac{a_{FeS}}{a_{Fe}\cdot a_S} = \frac{1}{[S]\cdot f_S} = \frac{1}{[S]}. \tag{6}$$

При $T$ = 1600 °C, константа равновесия $K_{FeS} \approx 0,091$ и $1/K_{FeS} \approx 11$. Следовательно, в условиях сталеплавильных процессов в жидком металле сульфиды железа образовываться не могут. Во время кристаллизации и охлаждения стали вследствие понижения растворимости сера выделяется из раствора в виде включений сульфидов FeS или оксисульфидов FeS–FeO [2].

Равновесие железо – марганец – сера описывается реакцией

$$FeS + Mn = MnS + Fe. \tag{7}$$

Температурная зависимость в интервале 1100–1190 °C представлена уравнением [2]

$$\lg K = \lg \frac{a_{\mathrm{MnS}}}{a_{\mathrm{FeS}} \cdot a_{\mathrm{Mn}}} = \lg \frac{a_{\mathrm{MnS}}}{a_{\mathrm{FeS}} \cdot [\mathrm{Mn}]} = \frac{6914}{T} - 3{,}546. \quad (8)$$

Например, при концентрации марганца 1,1–1,4 % отношение $a_{\mathrm{MnS}} / a_{\mathrm{FeS}}$ в сульфидной фазе при 1200 °С составляет 15–20. При 1100 °С – 33–42. При понижении температуры отношение активности сульфида марганца к активности сульфида железа увеличивается, марганец связывает серу. Также с повышением концентрации марганца увеличивается активность сульфида марганца.

Ослабление вредного действия серы, которое достигается в присутствии марганца, связано с образованием MnS при охлаждении стали [3]:

$$[\mathrm{Al}] + [\mathrm{N}] = \mathrm{AlN}; \qquad \Delta G_4^0 = -277700 + 120{,}43T. \quad (9)$$

$$\lg K_{\mathrm{AlN}} = -\frac{\Delta G_4^0}{2{,}3RT} = -\frac{-277700 + 120{,}43T}{2{,}3 \cdot 8{,}31\,T} = \frac{14529{,}38}{T} - 6{,}3. \quad (10)$$

$$K_{\mathrm{AlN}} = \frac{a_{\mathrm{AlN}}}{a_{\mathrm{Al}} \cdot a_{\mathrm{N}}} = \frac{1}{[\mathrm{Al}] \cdot f_{\mathrm{Al}} \cdot [\mathrm{N}] \cdot f_{\mathrm{N}}} = \frac{1}{[\mathrm{Al}] \cdot [\mathrm{N}]}. \quad (11)$$

При $T$ = 1600 °С константа равновесия $K_{\mathrm{AlN}} \approx 28{,}66$ и $1/K_{\mathrm{AlN}} \approx 0{,}035$. Для стали с содержанием алюминия в количестве 0,02–0,06 % произведение концентраций алюминия и азота $([\mathrm{Al}] \cdot [\mathrm{N}])$ намного ниже $1/K_{\mathrm{AlN}}$. Следовательно, в условиях сталеплавильных процессов в жидком металле нитриды алюминия образовываться не могут.

При введении алюминия в сталь для раскисления (0,02–0,06 % Al) удаление включений нитрида алюминия происходить вообще не может, поскольку образуются они только в твердом металле [4].

На рисунке 3 представлено образование нитрида и оксида алюминия с содержанием алюминия 0,040 % в стали.

Из рисунка 3 видно, что после затвердевания по мере охлаждения стали при температуре ~1400 К алюминий с содержанием 0,040 % связывает ~51 *ppm* азота. При этом концентрация кислорода должна быть не более ~0,001 *ppm*.

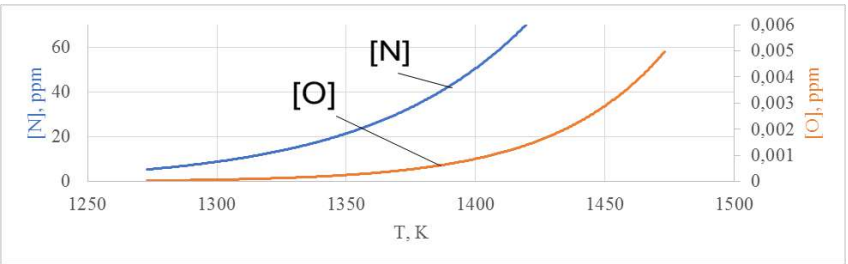



Рисунок 3 – Образование соединений алюминия в стали

Конструкционные стали практически всегда раскисляются алюминием, который обеспечивает значительно более низкое содержание кислорода в металле (0,003–0,005 %). Кроме того, алюминий связывает растворенный азот в стали, в результате чего можно получить наследственно мелкозернистую структуру. Получение мелкозернистой структуры является эффективным средством упрочнения стали и повышения ее сопротивляемости разрушению [5]. На рисунке 4 представлена стандартная энергия образования соединений алюминия.

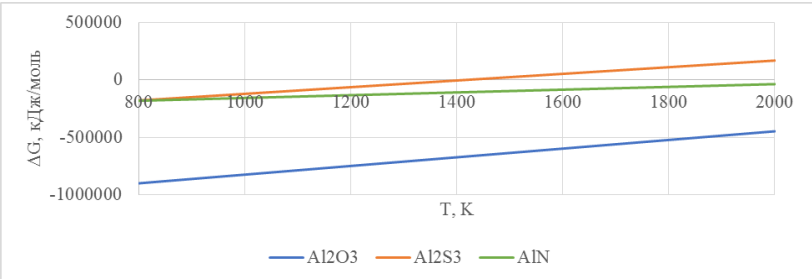



Рисунок 4 – Зависимость стандартной энергии образования соединений алюминия от температуры

Из рисунка 4 видно, что $\Delta G^0_{Al_2O_3} < \Delta G^0_{AlN} < \Delta G^0_{Al_2S_3}$, образование оксида алюминия термодинамически более выгодно, чем образование нитрида и сульфида алюминия:

$$[Ca]+[S]=CaS; \qquad \Delta G^0_4 = -783100 + 258,52T. \tag{12}$$

$$\lg K_{CaS} = -\frac{\Delta G^0_4}{2,3RT} = -\frac{-783100+258,52T}{2,3\cdot 8,31T} = \frac{40972,11}{T} - 13,526. \tag{13}$$

$$K_{CaS} = \frac{a_{CaS}}{a_{Ca}\cdot a_S} = \frac{1}{[Ca]\cdot f_{Ca}\cdot[S]\cdot f_S} = \frac{1}{[Ca]\cdot[S]}. \tag{14}$$

При $T$ = 1600 °C константа равновесия $K_{CaS} \approx 2,24\cdot 10^8$ и $1/K_{CaS} \approx 0,44\cdot 10^{-8}$. Для стали с содержанием кальция 0,0001 % произведение концентраций кальция и серы $([Ca]\cdot[S])$ намного выше $1/K_{CaS}$. Следовательно, в условиях сталеплавильных процессов в жидком металле образуются сульфиды кальция.

На рисунке 5 показано взаимодействие кальция с кислородом и серой.

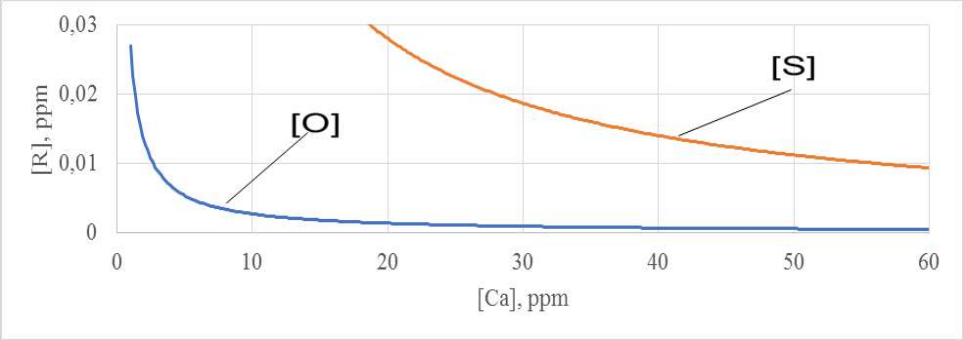



Рисунок 5 – Образование оксида и сульфида кальция в стали

Кальций является летучим и реакционноспособным элементом, что обеспечивает его низкую растворимость в стали. Из графика (см. рисунок 5) видно, что при температуре 1600 °C, для равновесного образования CaS, кальций с содержанием 50 ppm связывает примерно 0,011 ppm серы. При этом содержание кислорода должно быть примерно $[O] \le 0,00054$ ppm. На рисунке 6 представлена стандартная энергия образования соединений кальция в стали.

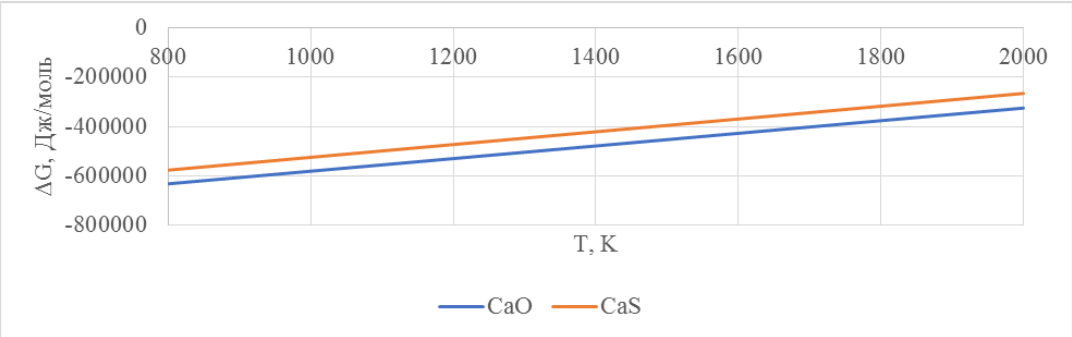



Рисунок 6 – Зависимость стандартной энергии образования соединений кальция от температуры

Из термодинамических данных можно увидеть, что отрицательное значение стандартной энергии Гиббса реакции образования сульфида кальция говорит о том, что кальций имеет высокую термодинамическую склонность к связыванию серы. Однако $\Delta G^0_{CaO} < \Delta G^0_{CaS}$ что способствует активному связыванию кальция и кислорода. Поэтому при избытке кислорода кальций сначала образует оксид. После глубокого раскисления, при очень низком содержании кислорода, образуется сульфид кальция в стали.

Образование неметаллических включений в стали – неизбежный процесс, поэтому необходимо более тщательное удаление их из расплава или перевод из «опасных» во включения с нейтральными характеристиками.

**Список литературы**


1 **Гольдштейн, М. И.** Специальные стали : учеб. для вузов / М. И. Гольдштейн, С. В. Грачев, Ю. Г. Векслер. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : МИСИС, 1999. – 408 с.

2 Процессы раскисления и образования неметаллических включений в сталях / отв. ред. Н. В. Агеев. – М. : Наука, 1977. – 207 с.

3 **Григорян, В. А.** Теоретические основы электросталеплавильных процессов : учеб. для вузов / В. А. Григорян, Л. Н. Белянчиков, А. Я. Стомахин. – М. : Металлургия, 1987. – 272 с.

4 **Поволоцкий, Д. Я.** Раскисление стали / Д. Я. Поволоцкий. – М. : Металлургия, 1972. – 208 с.

5 **Дурынин, В. А.** Исследование и совершенствование технологии производства с целью повышения ресурса стальных изделий из крупных поковок ответственного назначения / В. А. Дурынин, Ю. П. Солнцев. – СПб. : Химиздат, 2006. – 272 с. – ISBN 5-93808-127-0.


УДК 621.742

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ СМЕСЕЙ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

*Н. К. ТУРСУНОВ, О. Т. ТОИРОВ*

*Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан*

Производство качественных стальных отливок ответственного назначения сопряжено с необходимостью строгого соблюдения температурного режима процесса разливки. Снижение температуры металла во время транспортировки и заливки в форму приводит к значительным тепловым потерям, что является одной из основных причин возникновения таких дефектов, как недоливы, спаи, усадочные раковины и повышенная газонасыщенность [1, 2]. Особенно остро эта проблема стоит при разливке крупногабаритных отливок, таких как «боковая рама» вагона, где время между выпуском металла из печи и окончанием заливки может быть значительным [3, 4].

Эффективным технологическим приемом, направленным на минимизацию теплопотерь с открытой поверхности металла в изложнице или ковше, является применение теплоизоляционных смесей (ТИС). Формируя на поверхности расплава защитный теплоизоляционный слой, ТИС позволяют поддерживать температуру металла в заданном технологическом интервале, что напрямую влияет на повышение качества отливок и экономию энергоресурсов [5]. ТИС применяются в виде порошка (пудры) или гранул, что обеспечивает равномерное распределение по поверхности металла и формирование сплошного изолирующего слоя (рисунок 1).

Рисунок 1 – Общий вид ТИС на поверхности жидкого металла

Практическая методика применения ТИС заключается в нанесении расчетного количества смеси на поверхность жидкого металла сразу после заполнения изложницы или ковша. Смесь, попадая на расплав, расплавляется по поверхности, образуя тонкую термоизолирующую пленку или сохраняясь в сыпучем состоянии, но с уплотненной нижней частью.

Внедрение ТИС в технологический процесс разливки стали на литейном производстве позволяет достичь следующих результатов.

**Снижение тепловых потерь –** температура металла в изложнице сохраняется на 20–40 °С выше по сравнению с традиционной технологией, что особенно критично при длительной разливке или при транспортировке на значительные расстояния.

**Повышение качества отливок –** снижается количество брака, связанного с недостаточной жидкотекучестью металла (недоливы, холодные спаи). Улучшаются условия питания массивных узлов отливки, уменьшается вероятность образования усадочных дефектов.

**Увеличение стойкости футеровки –** теплоизоляционный слой уменьшает тепловой удар по футеровке изложницы при заливке, что способствует увеличению ее межремонтного ресурса.

**Энергосбережение –** снижение температуры выпуска металла из печи на 10–15 °С без ущерба для технологии заливки приводит к существенной экономии электроэнергии (на 5–10 %).

Применение теплоизоляционных смесей является экономически целесообразным и технологически эффективным методом повышения качества стального литья и снижения себестоимости производства. Методика использования ТИС проста в реализации и не требует значительных капиталовложений. Дальнейшие исследования целесообразно направить на оптимизацию состава смесей для различных марок сталей и условий разливки, а также на разработку отечественных аналогов импортных теплоизоляционных материалов.

**Список литературы**

1 Производство стальных отливок : учеб. для вузов / Л. Я. Козлов, В. М. Колокольцев, К. Н. Вдовин [и др.] ; под общ. ред. Л. Я. Козлова. – М. : МИСиС, 2013. – 352 с.

2 **Тоиров, О. Т.** Суюқ металлни қуйишда иссиқликни изоляция қилувчи аралашмадан фойдаланиш методикаси / О. Т. Тоиров, Д. А. Ахмедова // Теория и практика современной науки. – 2023. – № 5 (95). – С. 186–189.

3 Using of exothermic inserts in the large steel castings production of a particularly / O. T. Toirov, N. Q. Tursunov, D. I. Nigmatova, L. A. Qo'chqorov // Web of Scientist: International Scientific Research Journal. – 2022. – Vol. 3, № 1. – P. 250–256.

4 Разработка теплоизоляционных смесей для прибылей стальных отливок с применением фосфатборатов / И. Е. Илларионов, Л. Ш. Пестряева, Ш. В. Садетдинов [и др.] // Черные металлы. – 2020. – № 7. – С. 28–33.

5 **Садоха, М. А.** Повышение эффективности производства отливок из цветных и черных сплавов / М. А. Садоха, А. П. Мельников // Литье и металлургия. – 2014. – № 2 (75). – С. 47–50.

УДК 669.187.2

## РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ПРОЦЕССОВ РАФИНИРОВАНИЯ И МОДИФИЦИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПЛАВКИ

*Н. К. ТУРСУНОВ, Т. Т. УРАЗБАЕВ, Т. М. ТУРСУНОВ*
*Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан*

Сталь 20ГЛ применяется для ответственных отливок в железнодорожном машиностроении, где критически важны прочность и ударная вязкость при низких температурах. Обеспечение требуемых свойств невозможно без эффективной выплавки и внепечной обработки, направленной на рафинирование и формирование однородной мелкозернистой структуры.

Экспериментальные исследования проводились на плавках стали марки 20ГЛ, выплавленных в индукционной тигельной печи (ИТП). В процессе ковшевой обработки стали экспериментальные исследования проведены по 6 вариантам (таблица 1). Первый и второй варианты проводились по традиционным технологиям раскисления, которые используются во всём мире, т. е. раскисляют только алюминием (Al – 0,1 %) или алюминием и силикокальцием (Al – 0,1 % + СК30 – 0,1 %). С целью повышения эксплуатационной надежности и улучшения механических свойств предлагае-

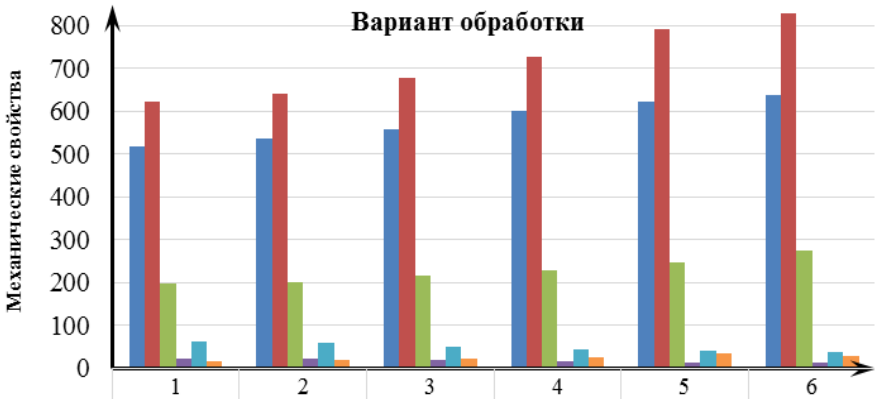
мая технология отличается от существующих, где во время выпуска жидкой стали в ковш при заполнении 1/3 часть металла обрабатывалась: в третьем, в четвертом, в пятом и шестом вариантах – алюминием Al – 0,1 % и комплексным модификатором FeVAlCa – 0,1; 0,15; 0,18 и 0,2 % от массы жидкого металла соответственно. Состав алюминия АЛ1 (99 % Al), силикокальций СК30 (30 % Ca, 50 % Si, 2 % Al, 17,5 % Fe) и комплексный модификатор FeVAlCa состоит из стальной оболочки, масса которого составляет 41 % от общей массы (24,5 % Ca; 23,1 % Al; 0,8 % Si; 1,3 % Mn; 0,25 % C; 24,5 % V и 25,55 % Fe).

*Таблица 1* – **Результаты экспериментального исследования процесса ковшовой обработки стали**

| Вариант обработки | Количество присадки, % | $[Al]_{кон}$, % | $[S]_{кон}$, % | $[V]_{кон}$, % | $[N]_{\Sigma}$, % | $[O]_{\Sigma}$, % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 (ТТ) | 1. Al – 0,1 | 0,022 | 0,025 | – | 0,0203 | 0,0097 |
| 2 (ТТ) | 1. Al – 0,1<br>2.СК 30 – 0,1 | 0,031 | 0,024 | – | 0,0226 | 0,0087 |
| 3 (ПТ) | 1. Al – 0,1<br>2. КМ FeVAlCa – 0,1 | 0,035 | 0,021 | 0,019 | 0,02207 | 0,0075 |
| 4 (ПТ) | 1. Al – 0,1<br>2. КМ FeVAlCa – 0,15 | 0,047 | 0,018 | 0,029 | 0,0316 | 0,0052 |
| 5 (ПТ) | 1. Al – 0,1<br>2. КМ FeVAlCa – 0,18 | 0,054 | 0,017 | 0,035 | 0,0390 | 0,0038 |
| **6 (ПТ)** | **1. Al – 0,1<br>2. КМ FeVAlCa – 0,2** | **0,059** | **0,015** | **0,041** | **0,0447** | **0,0030** |
| *Примечание* – ТТ – традиционная технология; ПТ – предложенная технология; СК – силикокальции; КМ – комплексный модификатор. | | | | | | |

Как видно из данных, приведенных в таблице 1, в зависимости от режима обработки раствора количество серы в составе металла снижается от исходных значений ($[S]_{нач}$) от 0,025 до 0,015 % (на 6-м варианте предлагаемой технологии), что увеличило степень десульфурации на 40 %. Содержание общего кислорода в металле, полученное по варианту 6, в 3,2 раза меньше, чем по варианту 1 традиционной технологии. Общее количество азота в металле в представленном варианте выше в 2,2 раза, по сравнению с традиционной технологией по варианту 1. По варианту 5 общее количество азота $[N]_{\Sum}$ = 0,0390 %, свободного $[N]_{своб}$ = 0,0150 %, а также образующего нитрид и карбонитрид за счет связанного с ванадием $[N]_{связ}$ = 0,0240 % оказалось равным, при количестве ванадия в металле 0,035 %.

Результаты исследования механических свойств (средние значения более 100 плавок) стали марки 20ГЛ после термической обработки приведены на рисунке 1.




| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Предел текучести σт, Мпа | 518 | 535 | 557 | 601 | 624 | 639 |
| Временное сопротивление σВ, Мпа | 622 | 642 | 678 | 726 | 791 | 828 |
| Твердость,по Бринеллю, НВ | 197 | 202 | 217 | 229 | 248 | 275 |
| Относит. удлинение δ,% | 23 | 21 | 20 | 17 | 14 | 12 |
| Относит. сужение ψ, % | 62 | 58 | 49 | 44 | 40 | 37 |
| Ударная вязкость, кДж/м2, при -60°С | 15,9 | 19,5 | 21,9 | 26,1 | 33,2 | 28,5 |

Рисунок 1 – Механические свойства стали марки 20ГЛ

Как видно из данных, приведенных на рисунке 1, наиболее высокие значения по механическим свойствам получены при обработке металла комплексным модификатором FeVAlCa по вариантам 4, 5 и 6. Вариант 6 не соответствует по твердости требованиям ГОСТ 22703-2012, поэтому оптимальным представляется вариант 5. Результаты исследования показали, что при ковшовой обработке стали марки 20ГЛ с комплексным модификатором – FeVAlCa при добавлении 0,18 % от массы жидкого металла и содержании ванадия [V] = 0,035 %, повышаются механические свойства: временное сопротивление – до 33 %, предел текучести – до 20,5 %, твердость – до 26 %, особенно – значение ударной вязкости – в 2 раза больше, чем по варианту 1 традиционной технологии [2].

Внедрение предложенной технологии позволило существенно повысить качество корпуса автосцепки, улучшить его механические и эксплуатационные характеристики, а также усовершенствовать макро- и микроструктуру металла по сравнению с традиционной технологией.

**Список литературы**

1 ГОСТ 22703-2012. Детали литые сцепных и автосцепных устройств железнодорожного подвижного состава. Технические условия. – Взамен ГОСТ 22703-77 ; введ. 2013-07-01. – М. : Стандартинформ, 2013. – 22 с.

2 Влияние комплексного модифицирования металла для улучшения структуры и свойства стали марки 20ГЛ / Т. Т. Уразбаев, Т. М. Турсунов, У. Т. Рахимов, Д. Ш. Валиева // Машинасозлик : Илмий-техника журнали, 2023. – № 1. – С. 25–29.

3 **Турсунов, Н. К.** Методика расчета комплексного раскисления стали марки 20ГЛ с алюминием и кальцием / Н. К. Турсунов, Т. Т. Уразбаев, Т. М. Турсунов // Universum : технические науки. – Москва : Международный центр науки и образования, 2022. – № 2 (95). – С. 20–25.

УДК 629.44; 629.4.027.5

# ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЗАГРУЗКИ ВАГОНА НА ИЗМЕНЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ СТУПИЦЫ ЦЕЛЬНОКАТАНОГО КОЛЕСА, НАПРЕССОВАННОГО НА ПОДСТУПИЧНУЮ ЧАСТЬ ОСИ КОЛЁСНОЙ ПАРЫ

*Р. И. ЧЕРНИН, О. М. МОИСЕЙЧИКОВА*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Для оценки влияния загрузки вагона на эквивалентные напряжения на поверхности ступицы цельнокатаного колеса к разработанной модели [1] при значениях натяга по границам рекомендованного диапазона [2] (0,10 и 0,25 мм) прикладывалась нагрузка от 1,5 до 16 тонн с шагом в 1,5 тонны.

Расположение 8 сечений, в которых определялись эквивалентные напряжения и в дальнейшем находилось их среднее значение для каждого из сечений, приведено на рисунке 1.

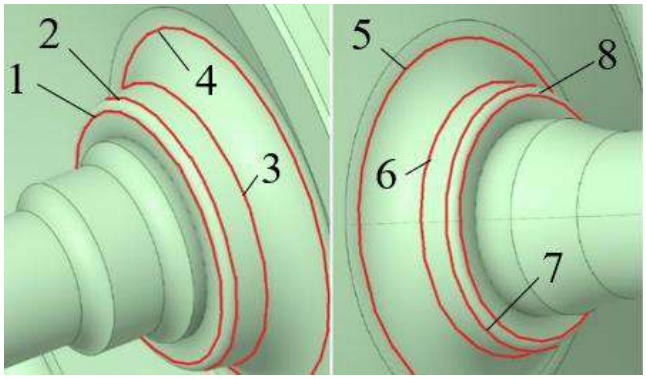



Рисунок 1 – Расположение сечений на поверхности ступицы колеса

На рисунке 2 представлены результаты расчёта модели (эквивалентные напряжения и контактное давление в зоне сопряжения ступицы с подступичной частью оси) при статической нагрузке на шейку оси вагона, равной 16,5 тонны при натягах 0,1 и 0,25 мм.

*а)*

*б)*

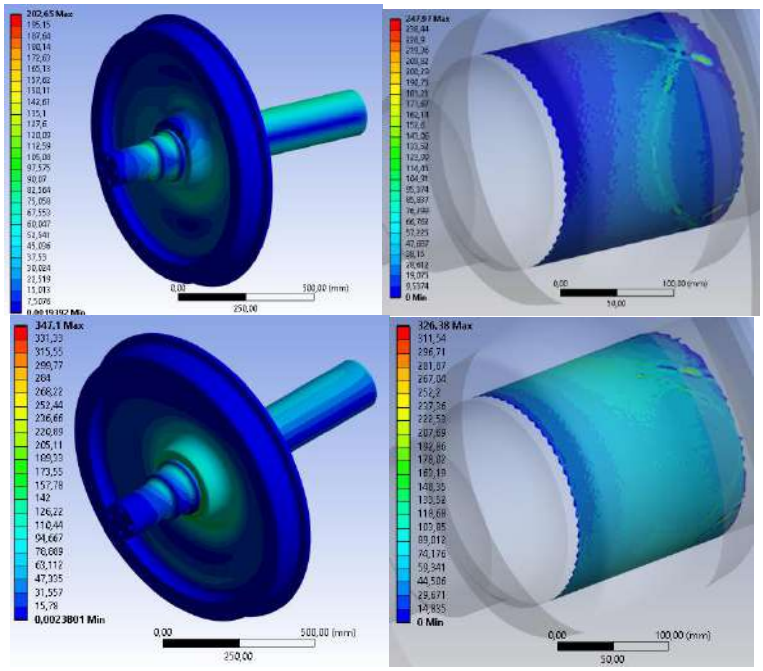


Рисунок 2 – Результаты расчёта эквивалентных напряжений и контактного давления в сопряжении ступицы цельнокатаного колеса с подступичной частью оси колёсной пары при нагрузке, равной 16,5 т.: *а* – натяг 0,10 мм; *б* – натяг 0,25 мм

Для определения величины натяга в соединении δ по эквивалентным напряжениям ($\sigma_{tП}$)), возникающим на поверхности ступицы колеса, используется зависимость, которая вытекает из решения Ляме – Гадолина [3]:

$$\delta = \frac{d_2^2 \sigma_{tП}}{d_1 E},$$

где $d_1$ – диаметр сопряжения, мм; $d_2$ – наружный диаметр охватывающей детали, для каждого рассматриваемого сечения, мм; $E$ – модуль упругости, МПа.

При использовании результатов расчётов модели без учёта прикладываемой нагрузки [1] в качестве «нуля» получено влияние загрузки на изменение среднего значения эквивалентных напряжений на наружной поверхности ступицы колеса (рисунок 3).

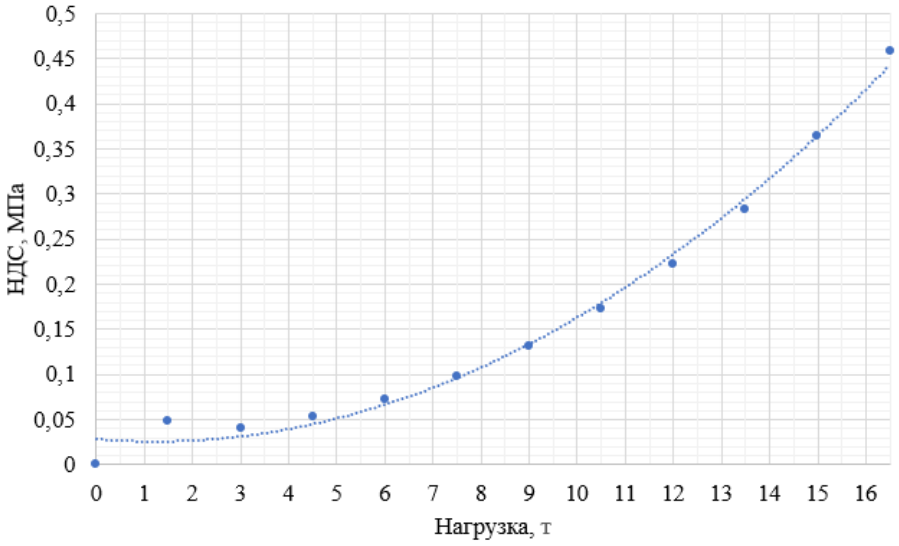



Рисунок 3 – Влияние загрузки вагона на величину среднего значения эквивалентных напряжений на наружной поверхности ступицы цельнокатаного колеса ($y = 0{,}0018x^2 - 0{,}0044x + 0{,}0286$, $R^2 = 0{,}9908$)

Из зависимости (см. рисунок 3) следует, что при увеличении загрузки среднее значение эквивалентных напряжений на наружной поверхности ступицы цельнокатаного колеса возрастает.

Следующим шагом для верификации полученной в результате моделирования зависимости, является проведение экспериментальной напрессовки колеса на ось с дальнейшим её нагружением с регистрацией эквивалентных напряжений с помощью разработанного ранее устройства [4].

**Список литературы**

1 **Чернин, Р. И.** Совершенствование технологии контроля запрессовки колеса на ось при формировании колёсных пар вагонов / Р. И. Чернин // Перспективы развития транспортного комплекса : сб. статей / Белорус. науч.-исслед. ин-т трансп. «Транстехника» ; редкол.: В. С. Миленький [и др.] ; рец.: А. А. Ерофеев, А. О. Лобашев. – Минск : БелНИИТ «Транстехника», 2024. – С. 316–326. – URL: https://www.transtekhnika.by/nauchnye-razrabotki/nauchnye-publikatsii/ (дата обращения: 15.09.2025).

2 Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524) мм (РД ВНИИЖТ 27.05.01-2017). – 253 с.

3 **Александров, А. В.** Сопротивление материалов / А. В. Александров, В. Д. Потапов, Б. П. Державин. – М. : Высш. шк., 2000. – 560 с

4 Патент 2431 Респ. Беларусь № u 20050254 ; заявл. 02.05.2005 ; опубл. 28.02.2006. Устройство для контроля прочности механической напрессовки колеса на ось колёсной пары / В. И. Сенько, И. Л. Чернин, Р. И. Чернин, С. Ф. Гориченко ; заявитель Белорус. гос. ун-т трансп. // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 1 (48). – С. 172–173.

УДК 528.854; 539.4

# МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТРЕЩИНЫ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*С. В. ШИЛЬКО, Е. Г. ОРЕШКЕВИЧ, А. П. САЗАНКОВ*
*Институт механики металлополимерных систем*
*им. В. А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель*

**Введение.** Мониторинг геометрических параметров трещины (ширины, глубины, площади) в процессе разрушающих механических испытаний является важным этапом фрактографического исследования конструкционных материалов. К сожалению, традиционные методы анализа кинетики трещинообразования весьма трудоемки и нуждаются в автоматизации.

**Целью исследования** является разработка методики и программного обеспечения автоматизированного определения геометрических параметров трещины на основе анализа видеоизображений с возможностью интеграции с данными, получаемыми в программном обеспечении современных испытательных машин.

В работе использована оригинальная методика фрактографического исследования в виде программного приложения на языке Python с привлечением библиотек компьютерного зрения (OpenCV, NumPy, Pandas, Tkinter).

Разработанная компьютерная программа предназначена для обработки видеоизображений в форматах MP4, AVI, MOV и *.raw-файлов программного обеспечения испытательной машины, содержащих параметры испытаний (ширину образца, количество циклов нагружения и т. д.).

*Общее описание работы программы*

1 Загрузка данных. Пользователь загружает видеофайл и *.raw-файл через графический интерфейс (кнопки «Загрузить видео», «Загрузить RAW файл»). Видео копируется в буферную директорию (./predict/buffer_video), а *.raw -файл преобразуется для извлечения параметров образца.

2 Извлечение кадров. Видеозапись разбивается на отдельные кадры (PNG-изображения), сохраняемые в файле ./data/frames).

3 Калибровка масштаба. Ширина образца в пикселях рассчитывается путем трассировки лучей от фиксированной точки до контура образца в первом кадре. По известной ширине в миллиметрах определяется коэффициент масштабирования.

4 Анализ трещины. Для каждого кадра выполняются следующие действия.

4.1 Создается маска образца в HSV-цветовом пространстве (рисунок 1, *а*).

4.2 Для поиска краев трещины проводятся лучи от двух статических точек с угловым сканированием в диапазоне ±90° (рисунок, 1, *б*).

4.3 Определяется наиболее глубокая точка трещины, как наиболее удаленная от линии, соединяющей края трещины (рисунок 2, *а*).

4.4 Рассчитывается центр трещины и ее площадь путем заливки области между краями и наиболее глубокой точкой (рисунок 2, *б*).

5 Обработка разрыва. Программа фиксирует кадр разрыва, когда глубина трещины становится равной ширине образца.

6 Сохранение результатов. Параметры трещины (ширина, глубина, площадь в пикселях и миллиметрах) сохраняются в виде Excel-файла. Дебаг-изображения (маски, лучи, области трещины) сохраняются в ./data/frames_debug для визуального контроля.

*а)* *б)*

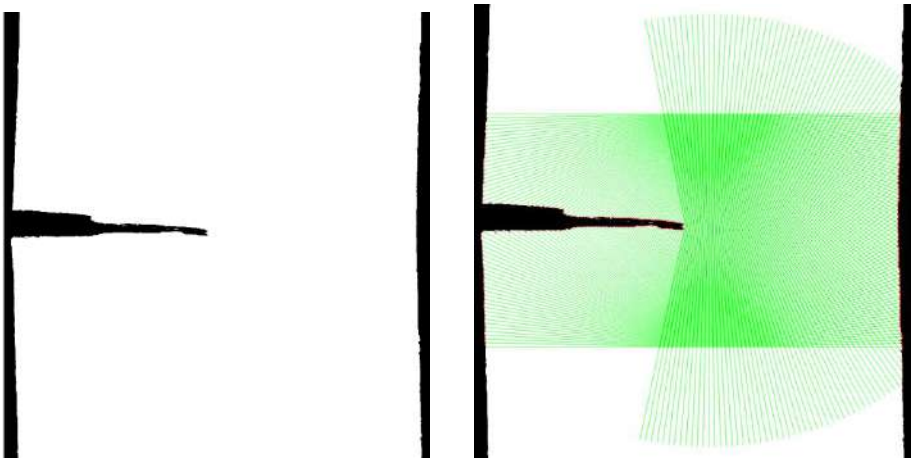


Рисунок 1 – HSV маска (*а*) и маска с рейтресингом (*б*)

*а)* *б)*

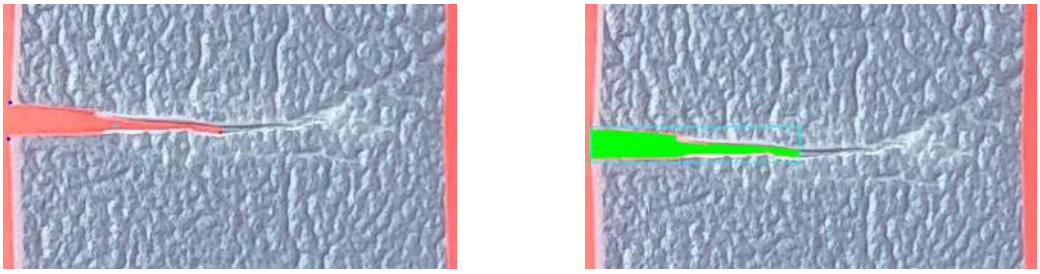


Рисунок 2 – Зона развития трещины с выделением глубины и ширины (*а*) и площади (*б*)

Программа была протестирована на нескольких видео (среднее значение – около 1000 кадров) разрушающих испытаний полимерных материалов, в частности, АБС-пластиков. Установлено, что обработка одного кадра занимает ~3–4 с, а точность измерений определяется калибровкой (±5 %) и качеством видеосъемки (рекомендуемое разрешение – от 720 p).

Особенности и преимущества разработанной методики:

– автоматизация трудоемких элементов фрактографического анализа (исключение субъективности ручных измерений, интеграция с данными испытательной машины);

– повышение точности анализа (калибровка по ширине образца обеспечивает погрешность ±5 %, что ниже, чем при использовании визуальных методов;

– универсальность (применимость к испытаниям любых материалов при наличии видео и *.raw-данных.

**Заключение.** Разработанная методика и программное обеспечение обеспечивают эффективный и точный анализ геометрических параметров трещины в процессе механических испытаний конструкционных материалов. Совершенствование разработки предполагает применение алгоритмов машинного обучения для более глубокого анализа и прогнозирования разрушения с адаптацией под высокоскоростные видеокамеры и другие средства измерения.

*Исследование поддержано БРФФИ (проект № Т24МП-057 «Разработка и приборная реализация метода экспресс-оценки усталостной прочности полимерных композиционных материалов».*

**Список литературы**

1 **OpenCV /** Официальная документация по библиотеке для анализа изображений на Python. – URL: https://docs.opencv.org/4.x/index.html (дата обращения: 16.08.2025).

2 **Pandas /** Официальная документация по библиотеке для анализа данных на Python. – URL: https://pandas.pydata.org (дата обращения: 16.08.2025).

3 **Numpy /** Официальная документация по библиотеке для научных вычислений на Python. – URL: https://numpy.org (дата обращения: 16.08.2025).

4 **Tkinter /** Официальная документация по библиотеке для создания пользовательского интерфейса на Python. – URL: https://docs.python.org/3/library/tkinter.html (дата обращения: 16.08.2025).

УДК 629.4.027

# КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ РЕЗИНОКОРДНОЙ МУФТЫ ЛОКОМОТИВА ПОД НАГРУЗКОЙ

*А. О. ШИМАНОВСКИЙ, Ю. Д. КАРАЦЮБА*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Резинокордная муфта (РКМ) локомотива обеспечивает передачу крутящего момента от тягового двигателя к осевому редуктору путем соединения вала двигателя и шестерни редуктора [1]. Использование упругой муфты позволяет скомпенсировать несоосность соединяемых валов, поскольку допускает некоторый излом и перекос их осей. Кроме того, наличие резинокордного элемента дает возможность снижения ударных нагрузок, возникающих в деталях привода в процессе движения [2]. РКМ применяются на электропоездах серий ЭР, ЭД, ЭП советского и российского производства, а также на некоторых локомотивах с гидравлической передачей для соединения элементов силовых и вспомогательных приводов, обладающих мощностью от 15 до 770 кВт [3].

При осмотрах выявляются такие повреждения РКМ, как трещины в поверхностном слое резины, доходящие до кордного слоя, разрыв резинокордного слоя вместе с капроновым кордом в районе крепления к металлическим частям (рисунок 1), износ поверхностного слоя резины до стального корда под фланцами крепления. Анализ статистической информации об эксплуатации 177 секций тягового подвижного состава в локомотивных (моторвагонных) депо показал, что в течение 2024 года зафиксировано 39 случаев разрушения болтов крепления РКМ и 26 – повреждения резинокордного слоя. Аналогичная ситуация наблюдалась при эксплуатации РКМ и на Латвийской железной дороге [4]. В подавляющем большинстве случаев повреждения болтов крепления наблюдаются у фланца тягового редуктора, а резинокордного слоя – со стороны тягового электродвигателя. Выход из строя РКМ приводит к остановке тягового подвижного состава на внеплановый ремонт, связанный с необходимостью разбора тяговой передачи.

Рисунок 1 – Разрыв резинокордного слоя вместе с капроновым кордом

Для выработки путей повышения долговечности конструкции РКМ требуется анализ влияния различных факторов на напряжения в ее элементах. Учет особенностей деформирования резинокордного слоя, имеющего сложную геометрию, может быть выполнен только путем компьютерного моделирования. Целью данной статьи является разработка компьютерных моделей, позволяющих осуществлять уточненное определение напряженно-деформированного состояния элементов РКМ при разных эксплуатационных режимах.

Средствами программного комплекса ANSYS Workbench разработана геометрическая модель РКМ, которая представлена на рисунке 2, *а*. При разработке конечноэлементной модели учтены особенности армирования резины, а также выработана схема описания граничных условий, позволяющая с достаточной степенью точности учесть условия работы РКМ [5].

В результате расчетов получено распределение напряжений и деформаций в рассматриваемой муфте. На рисунке 2, *б* показана схема распределения эквивалентных по Мизесу напряжений, из которой видно, что наибольшие напряжения возникают вблизи места крепления муфты к металлическому фланцу, т. е. именно там, где на практике наблюдается разрыв резинокордного слоя (см. рисунок 1). Тем самым подтверждается применимость разработанной модели для анализа работы РКМ.

*а*) *б*)

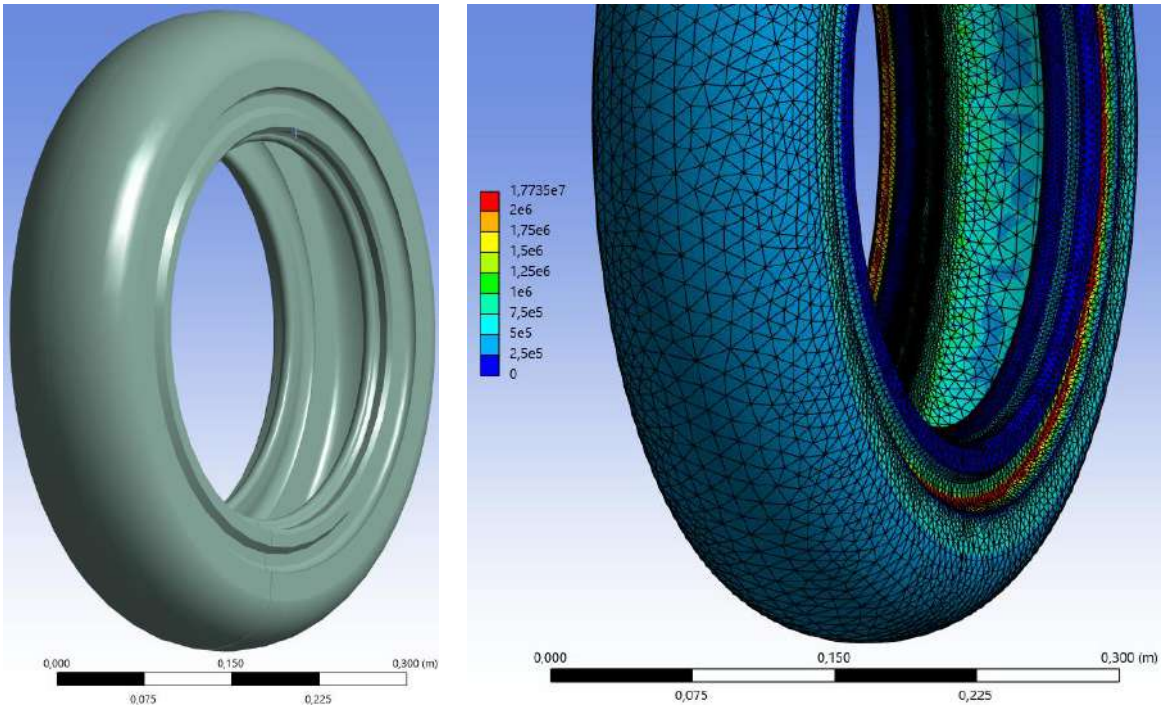



Рисунок 2 – Геометрическая модель РКМ (*а*) и эквивалентные по Мизесу напряжения, в Па, в ней (*б*)

Предложенная модель может быть использована при анализе путей модернизации узла соединения вала двигателя и шестерни редуктора с целью увеличения долговечности РКМ и снижения числа внеплановых ремонтов.

**Список литературы**

1 Электропоезд ЭР9Т: Руководство по эксплуатации. Книга 1 / Рижский вагоностроительный завод. – Рига, 1990. – 540 с.

2 Тепловозы ТГМ4Б, ТГМ4БЛ: Руководство по эксплуатации и обслуживанию / Людиновский тепловозостр. з-д. – М. : Транспорт, 1990. – 208 с.

3 **Евдокимов, А. П.** Экспериментальные исследования торовой резинокордной оболочки упругой муфты приводов тепловозов / А. П. Евдокимов / Машиностроение и инженерное образование. – 2006. – № 2 (7). – С. 2–18.

4 Examining failures in rubber-cord couplings within ER2 series electric trains / P. Gavrilovs, D. Gorbacovs, J. Eiduks [et al.] // Transport. – 2024. – Vol. 34, is. 2. – P. 183–196.

5 **Шимановский, А. О.** Влияние условий закрепления контура сэндвич-панелей на их напряженно-деформированное состояние / А. О. Шимановский, И. Е. Кракова // Механика. Исследования и инновации. – 2020. – Вып. 13. – С. 183–188.

УДК 629.4.027

# ПЕРСПЕКТИВЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПО ОПТОВОЛОКНУ

*А. О. ШИМАНОВСКИЙ, В. В. КОЗАЧЕНКО*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В современных условиях традиционные методы передачи электроэнергии, основанные на использовании металлических проводников, не всегда оказываются эффективными, например, при значительных электромагнитным помехах. В связи с этим приобретает значение поиск альтернативных решений, способных удовлетворить растущие требования к энергетической инфраструктуре. Оптоволоконные кабели обеспечивают достаточную пропускную способность, устойчивость к электромагнитным помехам, безопасность на взрыво- и пожароопасном производстве, невысокие потери и компактные размеры, что позволяет передавать энергию на большие расстояния с высокой эффективностью, гарантируя при этом надежность работы системы.

Анализ исследований в рассматриваемой области показывает, что существует значительное число публикаций, посвященных передаче электроэнергии по оптоволокну Power-over-Fiber (PoF) [1]. Данная технология перспективна, например, для питания удаленных устройств в телекоммуникационных сетях, включая инфраструктуру 5G, где требуется частое размещение антенн для обеспечения высокой скорости передачи данных [2].

На рисунке 1 представлена используемая в настоящее время общая схема передачи электроэнергии по оптоволокну [3]. Из генератора *1* произвольных сигналов выходит модулированный сигнал и накладывается на электрический, который производит источник *2* питания, после чего поступает на лазерный диод *3*, где формируется сигнал лазера. По оптическому волокну *4* он попадает в фотоэлектрическую ячейку *5*, после чего на блоке *6* развязки сигнал делится на сигнал модуляции и электрический сигнал. Сигнал модуляции проходит блок *7* предварительной обработки сигнала и попадает на контроллер *8* сигнала. В свою очередь электрический сигнал после блока развязки попадает сразу к потребителю *9*.

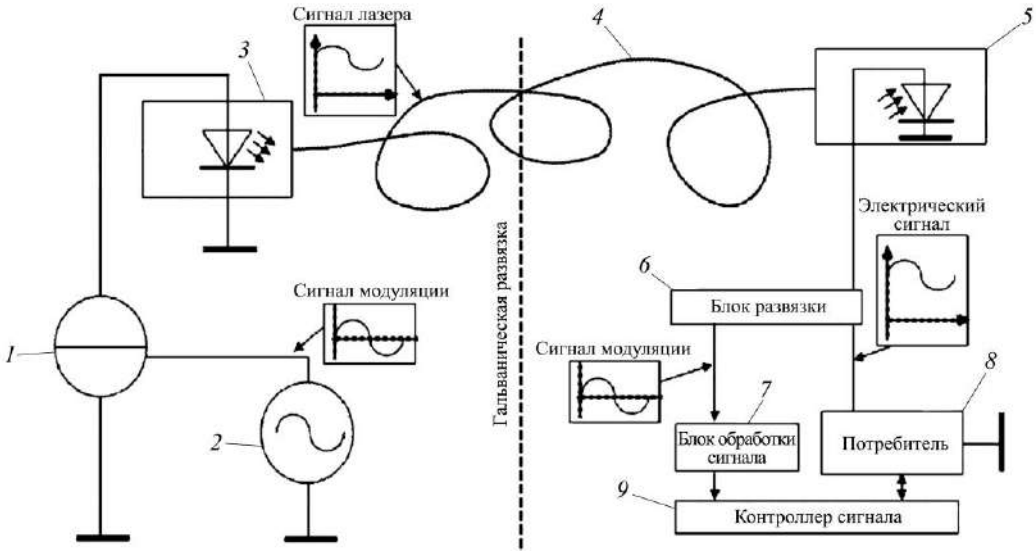



Рисунок 1 – Схема передачи электроэнергии по оптоволокну

Выполненный анализ показал, что оптическое волокно благодаря явлению полного внутреннего отражения и низким потерям может быть использовано в системах электроснабжения. Для дальних линий с высоким качеством передачи предпочтительны одномодовые волокна, обладающие низким затуханием (~0,2 дБ/км), для локальных систем с высокими мощностями – многомодовые, компоненты которых более дешевы. Лазерные диоды и фотогальванические преобразователи обеспечивают эффективное преобразование электроэнергии в свет и обратно, но требуют тщательного выбора характеристик, исходя из требуемой мощности передачи энергии и эффективности процесса.

К основным техническим характеристикам системы PoF относятся мощность, напряжение и дальность. Максимальная мощность ограничивается возможностями преобразования оптической энергии в электрическую. Современные PoF-системы позволяют передавать от нескольких ватт до десятков ватт на расстояния до 10 км [2]. Напряжение формируется на стороне приёмника и зависит от схемы преобразования и конструкции фотоэлектрического преобразователя. Для обеспечения безопасности и совместимости с электроникой используются низковольтные цепи (до 48 В). Дальность передачи ограничивается затуханием в оптическом волокне и эффективностью преобразования сигнала. Для одномодовых волокон и лазерных диодов дальность может достигать более километра, для многомодовых – сотни метров.

В настоящее время разработаны централизованная и децентрализованная архитектуры систем передачи электроэнергии по оптоволокну [4]. Централизованная предполагает наличие одного мощного оптического источника энергии (лазерного диода или массива лазеров), который подает световой сигнал по оптическому волокну к нескольким приемным устройствам. Такая схема позволяет обеспечить питание группы удаленных потребителей от единого центра, что упрощает управление системой, но требует высококачественного оборудования. При децентрализованной архитектуре применяются несколько независимых передатчиков, которые расположены ближе к потребителям, что позволяет повысить надежность системы, снизить потери при распределении и гибко масштабировать сеть. Однако в этом случае требуется большее количество компонентов и усложненная синхронизация. Выбор архитектуры зависит от конкретных условий эксплуатации: расстояний, количества и типа питаемых устройств, требований к надежности и стоимости.

В качестве примера возможного практического использования системы передачи электроэнергии по оптоволокну на основе существующих компонент осуществлен подбор оборудования для обеспечения работы видеокамеры скрытого наблюдения. В качестве лазерного источника сигнала принят прибор LSM-010, который обладает регулировкой уровня мощности, автономной системой питания и простым управлением. Для оптической линии выбран кабель TVTPVCLC. Для преобразования оптического сигнала в электрический использован фотовольтаический преобразователь YCH-H003. Объектом потребления энергии является IP Видеокамера Wisent SNB06003. Распределительное устройство – кросс оптический стоечный 1U.

Таким образом, технология передачи электроэнергии по оптоволокну обладает значительным потенциалом для широкого применения. Для выхода на массовый рынок и расширения функциональных возможностей требуются дальнейшие комплексные исследования и инженерные разработки.

**Список литературы**

1 **Matsuura, M.** Recent advancement in Power-over-Fiber technologies / M. Matsuura // Photonics. – 2021. – Vol. 8, is. 8. – Article 335. – P. 1–14.

2 Перспективы применения технологии Power-over-Fiber / А. А. Гаркушин, В. В. Криштоп, В. А. Максименко [и др.] // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 1. – С. 46–67.

3 Patent US 2021/0409116 A1, IPC H04B 10/25 (2006.01), H04B 10/54 (2006.01), H04B 10/69 (2006.01), H04B 10/67 (2006.01). Power-over-fiber system and method for operating a power-over-fiber system : filing date 30.06.2020 : publ. date 30.12.2021 / R. Krimmer, A. Ziegler ; applicant Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG. – 11 p.

4 Patent US 2025/0060547 A1, IPC IPC G02B 6/44 (2006.01), G02B 6/38 (2006.01), G02B 6/42 (2006.01), H01B 11/22 (2006.01), H04L 12/10 (2006.01), H05K 5 / 02 (2006.01). Power and optical fiber interface : filing date 21.06.2024 : publ. date 20.02.2025 / T. P. Huegerich [et al.] ; applicant Commscope technologies LLC. – 20 p.

# 3 ИНФОРМАЦИОННАЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНИКИ И СВЯЗИ

УДК 004.67

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ОТВЛЕЧЕНИЯ ВОДИТЕЛЯ

*Е. А. АЛУЕВ*
*Брестский государственный технический университет, Республика Беларусь*

Системы распознавания лиц используют алгоритмы, которые анализируют изображения лиц и сравнивают их с базами данных. Обычно процесс включает несколько этапов: обнаружение лица, извлечение его характеристик и сопоставление с известными изображениями. Для достижения высокой точности используются методы машинного обучения.

В предыдущей работе [1] по разработке системы детектирования отвлечения водителя от управления транспортным средством (ТС) была достигнута возможность уверенного распознавания закрытия глаз и зевания, которое трактовалось как наличие усталости с соответствующей потерей концентрации на дорожной обстановке. Однако за последнее время возможности нейронных сетей по детектированию и распознаванию изображений существенно улучшились. Например, EfficientDet, Yolov4, IterDet и другие детекторы обходят метод Хаара, примененный в OpenCV, как по скорости работы, так и по качеству распознавания.

В качестве одного из вариантов развития системы была рассмотрена работа [2], в которой предлагалось выявлять водителей, использующих мобильные телефоны во время вождения, что часто приводит к авариям, с помощью сверточной нейронной сети (CNN). Для выявления отвлекающихся водителей, использующих мобильные телефоны во время вождения, авторы записывали видео с изображением водителя на камеру GoPro, где каждая секунда видеозаписи делится на 24 кадра. Затем к этим изображениям применялся алгоритм глубокого обучения для определения отвлекающегося или неотвлекающегося водителя.

Для усовершенствования системы и расширения ее функций был использован аппаратный модуль Raspberry Pi 4 [3], обладающий гораздо большим быстродействием и памятью. Это позволило запустить Mediapipe, разработанный корпорацией Google. Идея данного фреймворка в рассмотрении процесса работы с данными как граф, вершины которого – это модули обработки данных [4]. Фреймворк реализует графическое преобразование видео, позволяет комбинировать ML-е компоненты с механической обработкой и на выходе получать кроссплатформенное решение для мобильных и десктопных устройств.

Для данной разработки по определению действий водителя во время движения, а именно отвлечения от управления ТС, использовались возможности Mediapipe, которые позволяют решать необходимые для проекта задачи: распознавать лица и делать Face Mesh, определять зрачки и контуры глаза, находить руки и определять наличие предметов в руках, идентифицировать движения объекта.

Mediapipe состоит из трех основных структурных компонентов: калькуляторов (вершин графа), входных/выходных пакетов и графов вычислений.

Калькулятор – это вершина графа, код, выполняющий трансформацию над входными данными и отдающий выходные. Для создания калькулятора понадобилось реализовать четыре метода:

– GetContract() – проверка входящих и выходящих данных на соответствие заранее заданным;

– Open() – инициализация калькулятора при запуске;

– Process() – запуск вычисления ноды, используя понятие контекста – сущности, в которой записаны текущие переменные в текущем моменте запуска пайплайна;

– Close() – освобождение ресурсов калькулятора.

Граф представляет собой совокупность входных данных и вершин (калькуляторов), реализующую какой-то пайплайн вычисления. Граф определяется в формате TensorFlow Graph Text.

Для решения задачи детектирования объектов на входном изображении ML-моделью нужно:

– получить входную картинку и преобразовать её размеры в 640×640;

– превратить сжатую картинку в тензор;
– прогнать этот тензор через модель и получить сырые предсказания;
– сырые предсказания конвертировать в понятный для Mediapipe тип Detections;
– получить этот тип на выходе графа.

При тренировке модели были использованы датасеты изображений водителей, собранные при тестировании предыдущей системы анализа действий водителей [1]. Дополнительно были использованы изображения водителей, держащих в руке мобильный телефон или управляющих (прикасающихся к поверхности) устройством, закрепленным на панели ТС. Это позволило выявлять такие события, как использование мобильного телефона или навигатора во время управления ТС.

Также в работе были учтены вопросы, выявленные в [5], что позволило всесторонне обсудить ограничения системы на этапе создания прототипа.

Одной из основных проблем, с которыми пришлось столкнуться при разработке системы, являлось качество изображения. В условиях плохого освещения или под неправильным углом алгоритм может ошибочно идентифицировать события, на которые он обучен. Например, при недостаточной освещенности системы могут не различать детали лиц, что ведет к повышению уровня ложных срабатываний.

Второй существенной проблемой являлась вибрация, а именно вертикальные перемещения водителя на пневматическом сидении при движении по неровностям. Это создавало нечеткие изображения водителя, что снижало качество распознавания.

На финальной стадии апробации системы были достигнуты высокие результаты распознавания действий водителя, классифицируемые как отвлечение от управления ТС. Незначительные отклонения от правильного распознавания изображений лица и рук водителя связаны с постоянно изменяющейся освещенностью лица, особенно в ночное время суток, когда свет фар встречных ТС резко изменяет освещенность кабины грузовика. Также были выявлены некоторые неточности распознавания наличия предметов в руках водителя.

Практическое применение методики в разработанной системе показало, что у разработанной системы есть потенциал расширения функций в части детектирования большего числа событий, связанных с отвлечением внимания от вождения ТС, например прием пищи и разговор по рации. Реализация этих функций позволит существенно увеличить вероятность соблюдения водителем ПДД во время движения.

**Список литературы**

1 **Алуев, Е. А.** Применение каскада Хаара для детектирования отвлечения водителя от управления транспортным средством / Е. А. Алуев // Международная конференция – выставка «Электронные услуги и информационные системы для транспорта и логистики» – (IT2TLT-2017) : материалы Междунар. конф., Минск, 12 окт. 2017 г. / Ассоциация «Инфопарк». – Минск, 2017.

2 Texting & Driving. Detection Using Deep Convolutional Neural Networks / J. Celaya-Padilla, C. Galván Tejada, J. Lozano-Aguilar [et al.] // Applied Sciences. – 2019. – № 9 (15). – 2962. – DOI: 10.3390/app9152962.

3 Raspberry Pi hardware. – URL: https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html (date of access: 10.09.2025).

4 MediaPipe: A Framework for Building Perception Pipelines / C. Lugaresi, J. Tang, H. Nash [et al.]. – URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.08172 (date of access: 10.09.2025).

5 **Одинец, Д. Н.** Методика анализа больших массивов данных для оценки качества работы водителя и технического состояния автомобиля / Д. Н. Одинец, Е. А. Алуев // BIG DATA и анализ высокого уровня : материалы X Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 13 марта 2024 г. В 2 ч. Ч. 2 / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск, 2024. – С. 194–200.

УДК 656.259.12

## ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ДЛИНЫ ТОНАЛЬНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ

*К. А. БОЧКОВ, Д. Д. МЕДВЕДЕВ, И. О. ЖИГАЛИН*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В современной системе железнодорожной автоматики и телемеханики тональные рельсовые цепи (ТРЦ) получили наибольшее распространение в качестве основного средства для контроля со-

стояния рельсовой линии. Их ключевая функция заключается в непрерывном мониторинге и предоставлении достоверной информации о статусе участка пути, что является фундаментальным требованием для обеспечения безопасности движения.

Данные устройства функционируют в четырех критически важных режимах, каждый из которых отвечает за определенный эксплуатационный сценарий:

– нормальный режим: фиксирует состояние свободности участка, когда колесные пары подвижного состава отсутствуют в пределах контролируемой секции;

– шунтовой режим: определяет занятость участка путем регистрации факта шунтирования рельсовой линии колесными парами подвижного состава;

– режим короткого замыкания: соответствует моменту шунтирования питающего конца рельсовой цепи колесными парами подвижного состава;

– контрольный режим: обеспечивает диагностику целостности самой рельсовой линии (обрыв рельсов) и исправности функционирования аппаратуры, гарантируя, что система находится в работоспособном состоянии.

Таким образом, ТРЦ формируют информационную основу для работы систем интервального регулирования движения поездов и автоматической блокировки, обеспечивая их актуальными данными о состоянии путевой инфраструктуры.

Синтезом рельсовой цепи называют ее проектирование при заданных исходных данных. Исходными данными выступают минимальное сопротивление изоляции рельсовой линии и частота сигнального тока, зависящая от рода тяги, системы кодирования и характеристик аппаратуры. На их основе рассчитывают максимальную длину рельсовой цепи, подбирают структурную схему и оптимальные параметры приборов.

Допустимая максимальная длина рельсовой цепи определяется из условия выполнения её основных режимов работы: нормального, шунтового, короткого замыкания и контрольного [1]. Их устойчивость зависит от входных сопротивлений на концах линии, причем требования к ним для шунтового и контрольного режимов противоположны: высокое сопротивление улучшает шунтовой режим, а низкое – контрольный. Разрешение этого противоречия – центральная задача синтеза. Компромисс достигается при такой длине цепи, где минимально допустимое сопротивление для шунтового режима равно максимально допустимому для контрольного. Это оптимальное значение сопротивления обеспечивает предельную длину участка.

Количественная оценка качества работы рельсовых цепей в нормальном, шунтовом, контрольном режимах и режиме короткого замыкания определяется с помощью ряда критериев. Работу рельсовой цепи характеризует: в нормальном режиме – коэффициент перегрузки ($k_н \geq 1$), в шунтовом – коэффициент чувствительности к нормативному шунту ($k_ш \geq 1$), в контрольном – коэффициент чувствительности к обрыву рельса ($k_к \geq 1$), в режиме короткого замыкания – коэффициент максимальной шунтовой мощности ($k_{кз} \geq 1$).

Помимо классического метода синтеза [1] авторами в [2] предложен способ определения максимальной длины тональной рельсовой цепи на основе определения необходимой и достаточной мощности сигнала ($S_{пг}$) в зависимости от исходных данных.

Проектирование тональных рельсовых цепей (ТРЦ3) сопряжено с комплексной задачей выбора одной из пяти стандартизированных сигнальных частот. Данный выбор не является произвольным и обусловлен необходимостью учета множества взаимосвязанных технических и эксплуатационных факторов. Ключевым аспектом в этом процессе является организация правильного чередования частот между смежными рельсовыми цепями.

Для корректного определения максимальной длины тональной рельсовой цепи предлагается использовать два описанных выше метода совместно, так как это нам позволит говорить о том, что в синтезированной рельсовой цепи не только будут выполняться все основные режимы, но и мы четко будем уверены, что такая рельсовая цепь будет существовать физически.

Задача синтеза тональных рельсовых цепей несколько упрощается за счет того, что параметры дроссель-трансформаторов и согласующих устройств, а также их схемы включения уже описаны и типизированы.

В качестве примера приведем графики, по которым определялась максимальная длина станционной ТРЦ3 с дроссель-трансформаторами при электротяге переменного тока с несущей частотой сигнального тока 420 Гц [3]. Графики на рисунках 1–3 получены по результатам моделирования в среде MATLAB.

Определение максимальной длины заключается в следующем:

1) сравнение критериев выполнения нормального режима $k_н$ и режима короткого замыкания $k_{кз}$ с критериями выполнения шунтового $k_ш$ и контрольного режимов $k_к$;

2) сравнение необходимой и достаточной мощности сигнала на выходе путевого генератора в нормальном режиме работы $S_{пг(н)}$ и режиме короткого замыкания $S_{пг(кз)}$ с мощностью сигнала в шунтовом $S_{пг(ш)}$ и контрольном $S_{пг(к)}$ режимах работы должно соблюдаться соответствие $S_{пг(н,\ кз)} < S_{пг(ш,\ к)}$.

Результаты сравнения (см. рисунки 1 и 2) демонстрируют, что в заданных условиях эксплуатации шунтовой и контрольный режимы выполняются для всех рассмотренных длин рельсовой цепи. Это подтверждается соответствием расчетных коэффициентов нормативным требованиям и достаточностью мощности генератора для обеспечения данных режимов.

Полученные результаты создают обоснование для определения предельной длины рельсовой линии $l_{рл}$ при нормативном минимальном сопротивлении изоляции (1 Ом·км). Определение данного параметра позволяет оптимизировать проектные решения и гарантировать надежную работу рельсовой цепи в рамках заданных технических условий (рисунок 3).

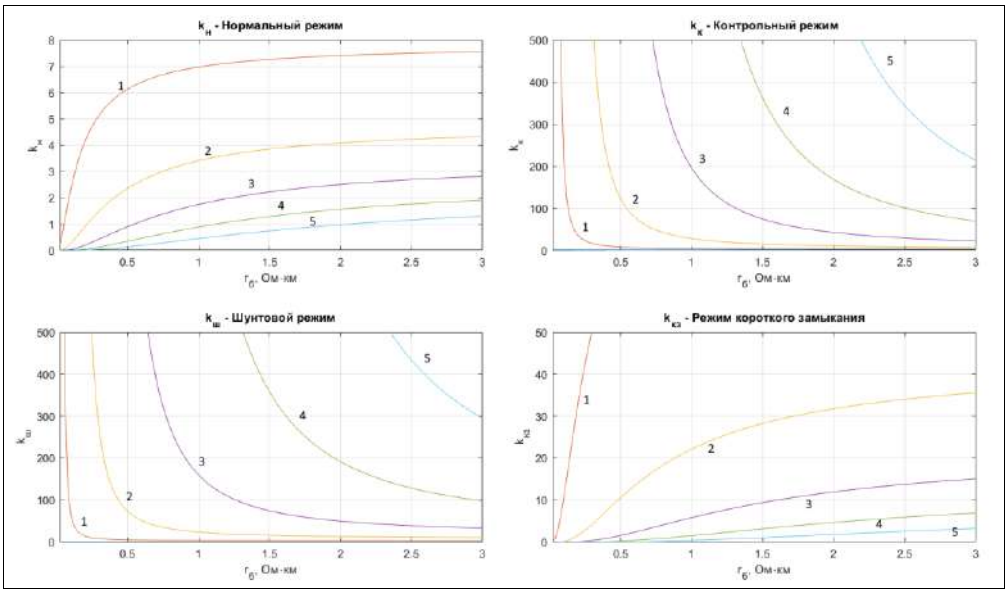



Рисунок 1 – Зависимости коэффициентов выполнения режима работы ТРЦ от сопротивления изоляции. Длина рельсовой линии: *1* – 400 м, *2* – 800 м, *3* – 1200 м, *4* – 1600 м, *5* – 2000 м

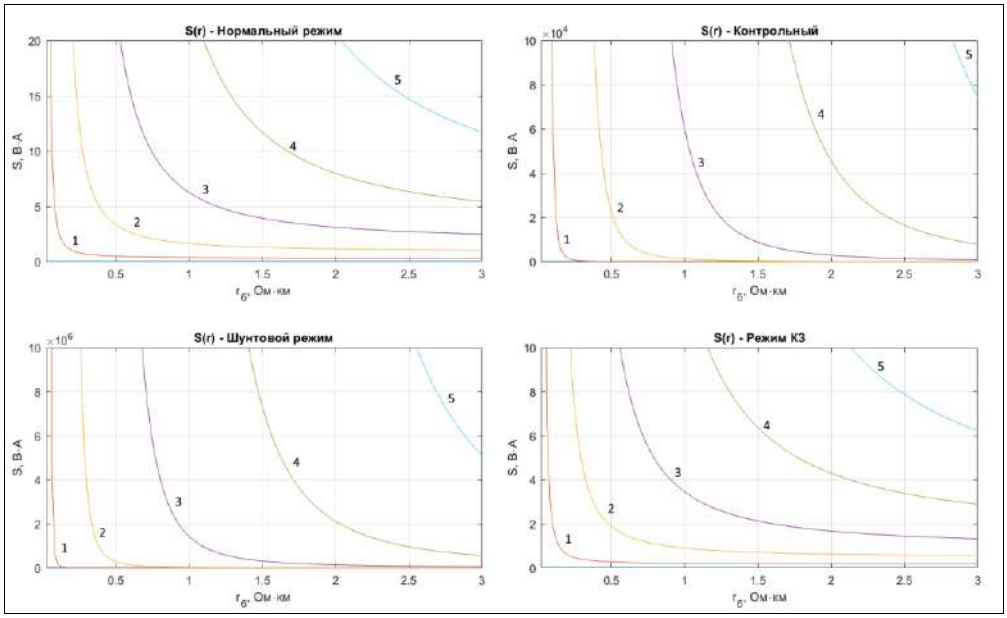



Рисунок 2 – Зависимости мощности сигнала от сопротивления изоляции. Длина рельсовой линии: *1* – 400 м, *2* – 800 м, *3* – 1200 м, *4* – 1600 м, *5* – 2000 м

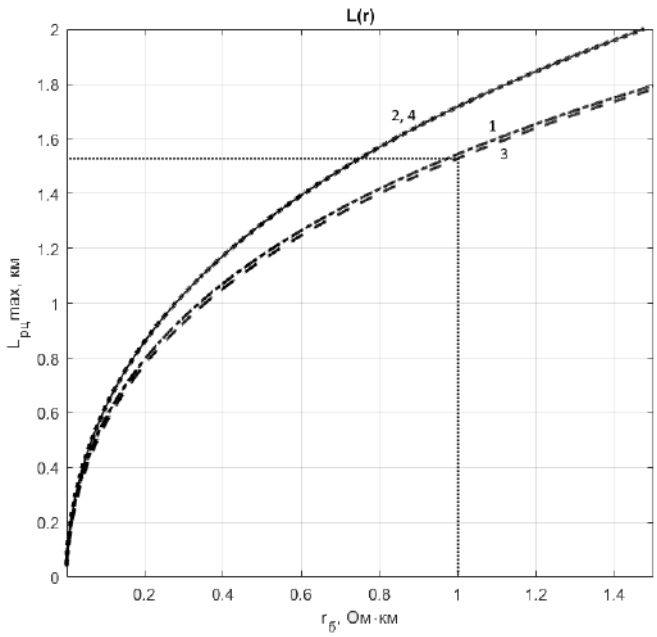



Рисунок 3 – Графики зависимости длины $l_{рл}$ от сопротивления изоляции $r_и$:
*1* – $S_{пг(н)}$, *2* – $S_{пг(кз)}$, *3* – $k_н$, *4* – $k_{кз}$

Полученные графики дают возможность определить максимальную длину $l_{рл}$ при нормативном минимальном значении сопротивления изоляции $r_и$ = 1,0 Ом·км (при частоте несущих колебаний сигнала 420 Гц), которая составляет 1,529 км.

**Список литературы**

1 **Брылеев, А. М.** Теория, устройство и работа рельсовых цепей / А. М. Брылеев, Ю. А. Кравцов, А. В. Шишляков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1978. – 344 с.

2 **Леушин, В. Б.** Определение максимальной длины рельсовой линии при нормативном минимальном значении величины сопротивления изоляции в функции частоты несущих колебаний сигнала рельсовой цепи / В. Б. Леушин, Л. Б. Смирнова, Р. Р. Юсупов // Автоматика на транспорте. – 2018. – Т. 4, № 4. – С. 505–519.

3 ТРЦ-ЭТ50 (АЛС 25,75)-С-96. Станционные рельсовые цепи тональной частоты с наложением АЛС 25 (75) Гц при электротяге переменного тока. – СПб. : ГТСС, 1996. – 57 с.

УДК 656.25

## ОБЗОР АРХИТЕКТУРЫ, ОСОБЕННОСТЕЙ И МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

*К. А. БОЧКОВ, С. Н. ХАРЛАП, Е. П. ЛИТВИНОВ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Автоматизированные системы управления ответственными технологическими процессами (АСУ ОТП) на железнодорожном транспорте обеспечивают надёжное управление объектами инфраструктуры, от которых напрямую зависит безопасность движения поездов. К таким объектам относятся стрелочные переводы, светофоры и др.

АСУ ОТП относятся к классу систем повышенной ответственности, где основным критерием эффективности является функциональная безопасность (ФБ) – способность сохранять безопасное состояние при любых отказах оборудования или ошибках персонала. Наряду с этим, в условиях цифровизации возрастает роль информационной безопасности (ИБ), предотвращающей вмешательство в управляющие и диагностические каналы.

Архитектура АСУ ОТП систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ) построена по иерархическому принципу и включает три уровня:

1 Нижний (полевой) уровень. Представлен датчиками и исполнительными устройствами: стрелочными электроприводами, рельсовыми цепями, счётчиками осей, контактными датчиками и блоками ввода-вывода. Эти элементы работают в реальном времени и передают телеметрию в объектные контроллеры.

Обмен данными осуществляется по промышленным протоколам, использующим физические интерфейсы RS-485/422 (скорость 9,6–115 кбит/с, расстояние до 1,2 км), например Modbus RTU, CAN, IEC 60870-5-101/104. Для отказоустойчивости применяются дублированные каналы связи (до 2 независимых линий) и кольцевые топологии, позволяющие восстановить обмен менее чем за 50 мс при обрыве одного сегмента.

2 Средний (управляющий) уровень. Основной функциональный уровень, реализующий логику управления и диагностики. Он включает микропроцессорные системы централизации (МПЦ), автоблокировки (САБ), системы линейной телемеханики (СЛТ), а также устройства энергоуправления. Здесь формируются маршруты, выполняются взаимные блокировки, контролируется занятость участков пути, осуществляется самодиагностика и обработка сигналов.

Управляющие контроллеры реализуют архитектуры типа 1oo2 (один из двух) или 2oo3 (два из трёх), что обеспечивает допустимую интенсивность опасного отказа на уровне $10^{-8}$–$10^{-9}$ 1/ч – менее одного опасного сбоя за 10000 лет непрерывной работы. Для всех компонентов обязательна сертификация по уровням УПБ 3, УПБ 4 (EN 50129, МЭК 61508).

3 Верхний (диспетчерский и серверный) уровень. Отвечает за визуализацию технологических процессов, архивирование данных и обмен информацией с системами управления движением поездов и технической диагностики. На данном уровне функционируют автоматизированные рабочие места (АРМ) операторов, дежурных по станции и инженерно-технического персонала, обеспечивающие взаимодействие человека с системой управления.

Через АРМ осуществляются мониторинг состояния оборудования, отображение предупреждений, анализ архивных данных и формирование отчётности. Управляющие воздействия формируются и исполняются на уровне объектных контроллеров, сертифицированных на соответствие требованиям функциональной безопасности (УПБ), тогда как верхний уровень выполняет функции наблюдения, анализа и поддержки принятия решений.

Передача данных между уровнями осуществляется по выделенным оптоволоконным линиям (скорость 100 Мбит/с–1 Гбит/с), радиорелейным или VPN-каналам с криптографической защитой.

АСУ ОТП железнодорожного транспорта характеризуются:

1) работой в реальном времени – задержка реакции не превышает 1 с;

2) принципом fail-safe – любой отказ приводит к безопасному состоянию (например, закрытию сигналов);

3) долговечностью оборудования – срок службы до 10–15 лет, наработка на отказ более $10^6$ часов;

4) распределённой структурой – станции и перегонные блоки соединены линиями длиной до 10–20 км;

5) жёсткой нормативной регламентацией – EN 50126/50129, МЭК 61508, отраслевые требования ЖД.

Эти особенности диктуют необходимость комплексного обеспечения функциональной и информационной безопасности, согласованного на всех уровнях системы.

Функциональная безопасность направлена на предотвращение перехода системы в опасное состояние при возникновении отказов оборудования, сбоев связи или ошибок оператора.

Основные методы:

1 Принцип fail-safe. При потере связи с контроллером все светофоры устанавливаются в запрещающее положение, маршруты фиксируются, стрелки блокируются. Вероятность того, что отказ не приведёт к безопасному состоянию, – не более $10^{-9}$ 1/ч.

2 Архитектуры дублирования. Используются схемы 1oo2 и 2oo3, при этом вероятность ошибочного решения снижается на 99 %, а вероятность скрытого отказа не превышает $10^{-7}$. Модули часто выполняются аппаратно- и программно-разнородными (разные микроконтроллеры, компиляторы, логика).

3 Непрерывная самодиагностика. Каждый модуль выполняет проверку исправности памяти, интерфейсов и логики выполнения программы с периодичностью 10–500 мс. Для этого могут быть использованы следующие методы:

– «бегущего нуля» и «бегущей единицы» – позволяют выявить до 95–98 % аппаратных неисправностей памяти (залипания битов, деградацию ОЗУ);

– CRC-контроля кода и данных – обеспечивают вероятность недетектирования случайных искажений порядка $10^{-7}$;

– сравнения контрольных сумм программ с эталоном при старте (проверка выполняется за 50–100 мс), и фоновой самопроверки (background check) – позволяют выявлять «мягкие» ошибки ПЗУ и ОЗУ с вероятностью до 99 %;

4 Многоканальная обработка информации в нескольких вычислительных модулях. Несоответствие результатов между дублируемыми контроллерами обнаруживается за время менее 10 мс. При этом активируется диагностический режим и формируется сообщение в вышестоящую систему.

5 Журналирование событий. Каждое изменение состояния, отказ или ручное вмешательство фиксируются во внутренней энергонезависимой памяти.

6 Верификация и валидация ПО. Программное обеспечение проходит многоступенчатую проверку: формальная спецификация требований, моделирование логики, анализ временных задержек, имитация отказов и сертификация.

Таким образом, ФБ реализуется как комплексная система диагностики, контроля и многоканальной обработки информации, обеспечивающая гарантированное безопасное состояние при любых нарушениях нормальной работы.

Переход на цифровые протоколы и IP-сети в телемеханике создал новые векторы угроз. Нарушение целостности телесигналов или подмена управляющих команд может привести к сбоям с тяжёлыми последствиями. Поэтому ИБ стала неотъемлемой частью проектирования АСУ ОТП.

Основные направления защиты:

1 Сегментация сетей и изоляция контуров. Технологическая сеть управления изолируется от корпоративной. Взаимодействие между сегментами разрешено только через шлюзы с межсетевыми экранами и демилитаризованными зонами (DMZ). Наличие DMZ позволяет снизить риск несанкционированного доступа.

2 Аутентификация и управление доступом. Реализуются ролевое разграничение прав (3–5 уровней доступа), двухфакторная авторизация операторов, централизованное ведение учётных записей. Использование аппаратных ключей снижает вероятность возникновения компрометации.

3 Криптографическая защита каналов. Передача данных между станциями и диспетчерскими пунктами осуществляется с использованием алгоритмов шифрования. Нагрузка на процессор при шифровании практически отсутствует, что не влияет на реальное время управления.

4 Контроль целостности и самопроверка данных. Для обнаружения случайных или злонамеренных изменений пакетов используется CRC-контроль каждого сообщения, обеспечивающий вероятность необнаружения ошибки порядка $10^{-7}$. Обмен тестовыми «сердечными» пакетами (heartbeat) выполняется каждые 1–2 с для подтверждения активности узлов; отсутствие определенного количества сигналов подряд инициирует аварийный режим.

5 Мониторинг и реагирование. Системы сбора событий безопасности способны анализировать большое количество событий за короткий промежуток времени и оповещать персонал при аномалиях трафика.

6 Физическая защита. Шкафы телемеханики, серверные помещения и кабельные каналы оборудуются средствами контроля доступа и сигнализацией вскрытия.

7 Аудит и тестирование. Проводимые проверки целостности ПО и анализа уязвимостей снижают риск эксплуатации уязвимостей.

Комплексное применение этих мер позволяет свести к минимуму вероятность несанкционированного вмешательства и нарушения целостности данных.

Функциональная и информационная безопасность взаимосвязаны: нарушение целостности данных способно спровоцировать опасное состояние, а чрезмерное усложнение защиты может нарушить временные параметры управления.

В современных АСУ ОТП реализуется координированный подход, при котором:

1) критические команды передаются по изолированным каналам с задержкой не более 5 мс [1];

2) проверка целостности и аутентичности данных выполняется в основном программно с использованием оптимизированных алгоритмов, что минимизирует задержки в цикле управления;

3) системы мониторинга ИБ интегрируются с подсистемами самодиагностики ФБ, формируя единое пространство управления рисками;

4) совместная реализация позволяет снизить интенсивность опасных отказов вида (технический отказ + кибервоздействие) до уровня порядка $10^{-9}$ 1/ч.

Автоматизированные системы управления ответственными технологическими процессами железнодорожного транспорта являются фундаментом безопасного функционирования всей отрасли. Их архитектура сочетает дублированные каналы управления, принципы fail-safe и механизмы киберзащиты.

Функциональная безопасность достигается дублированием, диагностикой и контролем целостности, а информационная – сегментацией, шифрованием, CRC-контролем и мониторингом событий. Современные тенденции направлены на интеграцию этих направлений в единую платформу управления безопасностью, обеспечивающую устойчивость железнодорожной автоматики к техническим отказам и киберугрозам.

**Список литературы**

1 **Бочков, К. А.** Оценка временных параметров функционирования микропроцессорных устройств связи с объектами систем железнодорожной автоматики и телемеханики / К. А. Бочков, С. Н. Харлап, Б. В. Сивко // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2012. – № 2 (25). – С. 12–15.

УДК 004.056

## ОЦЕНКА УЯЗВИМОСТИ ПЕРСОНАЛА К АТАКАМ СОЦИАЛЬНОЙ ИНЖЕНЕРИИ: НЕЧЕТКО-МНОЖЕСТВЕННЫЙ ПОДХОД

*Д. В. ВЛАСЕНКО*
*Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., Российская Федерация*

В условиях цифровой трансформации транспортной отрасли проблема защиты от кибератак с использованием социальной инженерии приобретает особую актуальность. До 74 % успешных кибератак связаны именно с человеческим фактором [1]. Транспортная инфраструктура относится к критически важным объектам, где он становится ключевым элементом системы безопасности. Успешность атак с использованием социальной инженерии на транспортные компании прежде всего связана с методами социальной инженерии, что обусловлено спецификой отрасли: высоким уровнем стресса, необходимостью оперативного принятия решений и сложными многоуровневыми коммуникациями. Вопреки всеобщему мнению эффективность этих атак зависит не только от уровня подготовки атакующего, но и от различных характеристик жертвы.

Американский психолог Роберт Чалдини в своей книге «Психология влияния» описывает шесть принципов влияния, которыми успешно пользуются мошенники во время своих атак. К ним относятся авторитет, привлекательность, срочность или дефицит, постоянство и последовательность, социальное доказательство, взаимность [2].

Современные подходы к обеспечению кибербезопасности в основном сосредоточены на технических средствах защиты. Эти методы зачастую не учитывают человеческий фактор, который остается наиболее уязвимым звеном в системе безопасности. Технические средства не могут полностью защитить от социальной инженерии, направленной на манипуляцию персоналом. Существующие системы обучения и тестирования сотрудников также имеют ограниченную эффективность, поскольку не учитывают индивидуальные особенности восприимчивости к манипуляциям.

Предложенная методология оценки уязвимости основана на аппарате теории нечетких множеств Заде. Математическая модель включает четыре ключевых компонента: возрастные характеристики, уровень образования, показатели цифровой грамотности и психологические особенности. Для каждого параметра разработаны функции принадлежности μ, отражающие степень уязвимости сотрудника:

– для возрастного фактора: $\mu_1$ = 0,7 (18–30 лет), 0,4 (31–50 лет), 0,8 (50+ лет);

– для образовательного критерия: $\mu_2$ = 0,3 (техническое образование), 0,6 (гуманитарное), 0,8 (среднее);

– для цифровой грамотности: $\mu_3$ = 0,1 (90–100 % правильных ответов), 0,4 (60–89 % правильных ответов), 0,9 (<60 % правильных ответов);

– для психологической устойчивости: $\mu_4$ = 0,3 (высокая), 0,6 (средняя), 0,9 (низкая).

Общий показатель уязвимости рассчитывается по формуле взвешенной суммы:

$$\mu = \sum_{i=1}^{n} \omega_i \mu_i, \tag{1}$$

где $\mu$ – общий показатель уязвимости; $\mu_i$ – нечеткий элемент со степенью принадлежности; $\omega_i$ – удельный вес элемента.

Удельный вес – это мера относительной важности каждого фактора в формировании общего уровня уязвимости сотрудника. Если говорить проще – насколько сильно каждый фактор влияет на итоговый риск.

Для данной модели было принято решение использовать следующий вес:

– 0,2 для возраста;

– 0,1 для образования;

– 0,3 для цифровой осведомленности;

– 0,4 для психологического фактора.

Это означает, что возраст вносит 20 % общего вклада в оценку пользователя. Этот фактор считается более значимым, чем образование (10 %), но меньшим, чем результат тестов (30 %). Самым весовым фактором для нашей модели является психологический фактор, ведь атаки с помощью социальной инженерии учитывают именно внутренние качества человека.

Выбор данных весовых коэффициентов основан на анализе статистики успешных атак и экспертных оценках специалистов по информационной безопасности. Особое внимание уделяется учету отраслевой специфики: для транспортных работников критически важными являются способность сохранять концентрацию в условиях стресса, умение быстро распознавать подозрительные ситуации и соблюдение установленных регламентов безопасности.

Для оценки психологического фактора в данной модели предлагается использование укороченного пятифакторного опросника личности (Большой пятерки). В рамках подхода учитываются четыре фактора из пяти: нейротизм, добросовестность, сотрудничество и открытость новому. Вклад экстраверсии же на фоне предыдущих особенностей является незначительным и не приводит к повышению точности, однако увеличивает сложность расчётов.

Итоговый показатель уязвимости рассчитывается по следующей формуле:

$$\mu_п = 0{,}4Н + 0{,}3(1 – Д) + 0{,}2(1 – С) + 0{,}1 – (1 – О), \tag{2}$$

где Н – значение нейротизма (чем выше показатель, тем больше уязвимость); Д – нормализованное значение добросовестности; С – нормализованное значение сотрудничества; О – нормализованное значение открытости новому.

Значения сотрудничества (1 – С), добросовестности (1 – Д) и открытости новому (1 – О) считаем обратными, поскольку высокие значения снижают показатель уязвимости. Весовые коэффициенты (0,4 для нейротизма, 0,3 для добросовестности, 0,2 для сотрудничества и 0,1 для открытости новому) отражают вклад каждого фактора в итоговую уязвимости.

Особенностью методологии является ее адаптивность: система позволяет настраивать весовые коэффициенты в зависимости от конкретной специализации и особенностей ее работы.

Тонкость данного метода также подтверждается тем, что возможно использование практически любого набора критериев, так или иначе подходящего под уязвимости человека атакам с использованием социальной инженерии.

Главными же преимуществами метода можно считать возможность тонкой настройки коэффициентов, наглядное представление результатов, простую интеграцию с корпоративными системами, простоту вычислений и внедрения.

Следует особо подчеркнуть, что метод сохраняет свою актуальность даже при изменении тактик социальной инженерии, так как позволяет оперативно адаптировать весовые коэффициенты и параметры оценки. Это делает его универсальным инструментом для обеспечения корпоративной безопасности в условиях постоянно эволюционирующих угроз.

**Список литературы**

1 Verizon. 2023 Data Breach Investigations Report – 2023. – 95 p. – URL: https://www.researchgate.net/publication/371445421_DBIR_2023_Data_Breach_Investigations_Report_10K_20K_30K_About_the_cover (date of access: 27.12 2024).

2 **Чалдини, Р.** Психология влияния / Р. Чалдини ; пер. с англ. А. Миронова. – 5-е изд. – СПб. : Питер, 2021. – 336 с.

УДК 51-7

## МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ КИБЕРАТАК НА СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕХАНИКИ И SCADA

*Д. Н. ВОЛОДИН*
*Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., Российская Федерация*

Современные системы телемеханики и SCADA являются ключевыми элементами инфраструктуры в энергетике, транспорте, промышленности и других критически важных отраслях. Их главная задача – управление технологическими процессами в реальном времени, что предполагает высокие требования к надёжности и отказоустойчивости. Но именно эти системы в последние годы всё чаще становятся объектом целенаправленных кибератак. Причины понятны: вывод из строя такой системы способен вызвать не только экономический ущерб, но и серьёзные социальные и экологические последствия.

Уязвимость SCADA-систем во многом связана с их историческим наследием. Первые поколения таких решений проектировались в условиях изолированных сетей, без учёта современных требований к информационной безопасности. Используемые протоколы – Modbus, DNP3, IEC 60870-5-104 – изначально не предполагали встроенную аутентификацию или шифрование. При подключении этих систем к корпоративным и внешним сетям возникла новая поверхность атаки, которой активно пользуются злоумышленники. Известные примеры, такие как Stuxnet или BlackEnergy, когда вредоносное ПО прямо воздействовало на оборудование автоматики, показали классические средства защиты корпоративных ИТ-сетей не всегда применимы к телемеханике, где главная ценность – непрерывность технологического процесса.

Для повышения безопасности критически важно использовать комплексный подход. Первый блок – это методы обнаружения атак. На практике применяются два основных направления: сигнатурные и поведенческие. Сигнатурные системы базируются на базе известных образцов атак и позволяют быстро выявлять повторяющиеся сценарии. Их слабость – невозможность противостоять новым, ещё не описанным угрозам. Поведенческие методы опираются на анализ аномалий в трафике и работе устройств. Например, внезапное увеличение числа команд на включение или резкое отклонение телеметрии от статистических норм могут быть сигналом о вторжении.

Для формализации подобных методов часто применяется энтропия Шеннона, которая измеряет уровень неопределённости в сетевом трафике:

$$H(X) = \sum_{i=1}^{n} p(x_i)\log_2 p(x_i),$$

где $p(x_i)$ – вероятность появления события $x_i$ (например, определённого типа пакета). При резких изменениях энтропии сетевого трафика система может зафиксировать подозрительное поведение.

Современные подходы используют и машинное обучение: строятся модели нормальной работы устройств, после чего вычисляется ошибка прогноза. Если она превышает заданный порог $\varepsilon$, генерируется тревога:

$$\left| y_{\text{real}} - y_{\text{pred}} \right| > \varepsilon.$$

Второй блок – предотвращение атак. Внедрение шифрования каналов связи и строгой аутентификации пользователей снижает риск перехвата и подмены команд. Практика показывает, что даже внедрение простых механизмов TLS и VPN значительно повышает уровень защиты. Эффективным средством становится сегментация сети: выделение технологической части инфраструктуры и ограничение взаимодействия с внешними системами через строго контролируемые шлюзы. Здесь же находит применение концепция Zero Trust, при которой даже внутренние узлы не считаются априори доверенными, а каждый запрос проходит проверку.

Кроме того, в промышленной кибербезопасности применяются количественные методы оценки риска. Оценка риска определяется по формуле

$$R = PI,$$

где $R$ – риск; $P$ – вероятность реализации угрозы, $I$ – потенциальный ущерб (Impact). Такой подход позволяет приоритизировать ресурсы, например атака с низкой вероятностью, но высоким ущербом (вывод из строя электростанции) будет иметь приоритет выше, чем частая, но малозначительная угроза.

Не менее важно внедрение средств реагирования и восстановления. Полностью предотвратить атаки невозможно, но можно минимизировать ущерб. Регулярные резервные копии конфигураций, заранее подготовленные планы реагирования и отработанные сценарии переключения на резервные каналы связи позволяют быстрее восстанавливаться после инцидента. Опыт многих компаний показывает, что именно готовность к инцидентам определяет реальные потери, а не только уровень применяемых защитных технологий.

Отдельно стоит подчеркнуть роль стандартизации. Международные документы, такие как IEC 62443, задают рамки по обеспечению безопасности для промышленных систем. Их требования включают управление уязвимостями, контроль доступа, управление изменениями, аудит действий операторов. Следование этим стандартам обеспечивает единый уровень безопасности на всех этапах жизненного цикла – от проектирования до эксплуатации.

Таким образом, методы обнаружения и предотвращения кибератак на системы телемеханики и SCADA должны представлять собой не набор разрозненных решений, а целостную стратегию. Она включает мониторинг и анализ трафика, применение аномалийных и сигнатурных детекторов, организацию защищённых каналов связи, сегментацию сетей и постоянную готовность к инцидентам. Только сочетание технических, организационных и нормативных мер способно обеспечить устойчивость систем, которые лежат в основе современной инфраструктуры. Безопасность SCADA – это не вопрос отдельного продукта или технологии, а непрерывный процесс, в котором должны участвовать как инженеры, так и специалисты по кибербезопасности.

**Список литературы**

1 **Bhamare, D.** Cybersecurity for Industrial Control Systems: A Survey / D. Bhamare, M. Zolanvari, A. Erbad [et al.] // Computers & Security. – 2020. – Vol. 89. – Article 101677. – DOI: 10.1016/j.cose.2019.101677.

2 **Аметов, Ф. Р**. Формализация защищённой коммуникации SCADA / Ф. Р. Аметов // eLIBRARY.RU. – 2021. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47462847 (дата обращения: 14.09.2025).

УДК 004.056:621.311.1

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЕКТА ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ПРЕДПРИЯТИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

*С. Ю. ВОРОБЬЁВ, Е. А. ХАНЧЕВСКИЙ*

*Научно-исследовательское и проектно-изыскательское республиканское унитарное предприятие «Белэнергосетьпроект», г. Минск, Республика Беларусь*

Набором общепризнанных международным сообществом требований и лучших практик, предъявляемых к системам менеджмента информационной безопасности (далее – СМИБ), является серия стандартов ISO/IEC 270xx, принятая Международной организацией по стандартизации ISO

(International Organization for Standardization). После проведения мероприятий по переводу и терминологической адаптации Государственным комитетом по стандартизации Республики Беларусь данные технические нормативные правовые акты были введены в действие (по содержанию и смысловой нагрузке они полностью идентичны стандартам ISO). В национальной системе стандартизации действуют следующие из них:

– СТБ ISO/IEC 27000-2024 «Информационные технологии. Методы обеспечения безопасности. Общий обзор и словарь» – представляет собой обзор СМИБ, а также терминологическую базу связанных с ними терминов [1];

– СТБ ISO/IEC 27001-2024 «Информационная безопасность, кибербезопасность и защита конфиденциальности. Требования» (далее – СТБ ISO/IEC 27001) – по сути является основным стандартом данной серии и устанавливает требования к разработке, внедрению, поддержанию и постоянному улучшению СМИБ [2];

– СТБ ISO/IEC 27002-2024 «Информационная безопасность, кибербезопасность и защита конфиденциальности. Средства управления информационной безопасностью» – предназначен для использования при разработке руководства по менеджменту ИБ в конкретных отраслях и организациях с учетом их специфики [3];

– СТБ ISO/IEC 27003-2014 «Информационные технологии. Методы обеспечения безопасности. Руководство по внедрению системы менеджмента информационной безопасности» – описывает процессный подход по определению и разработке СМИБ от начала до фактического завершения проекта [4];

– СТБ ISO/IEC 27004-2014 «Информационные технологии. Методы обеспечения безопасности. Менеджмент информационной безопасности. Измерения» – представляет собой руководство по разработке и применению мер измерения и проведению процесса измерения внедренной СМИБ [5];

– СТБ ISO/IEC 27005-2024 «Информационная безопасность, кибербезопасность и защита конфиденциальности. Руководство по менеджменту рисков информационной безопасности» – описывает механизм реализации выполнении требований, касающихся действий по рассмотрению рисков ИБ и менеджмента рисков ИБ [6].

Внедрение СМИБ в деятельность предприятия, структурно входящего в ГПО «Белэнерго» Министерства энергетики Республики Беларусь (далее – Предприятие), имело под собой следующие основания:

– укрепление деловой репутации как высоконадежной организации, применяющей в своей деятельности наилучшие общепризнанные практики ИБ;

– выполнение требований законодательства в сфере лицензирования для получения лицензии на осуществление деятельности в сфере технической и криптографической защиты информации по проектированию, созданию и аудиту систем ИБ критически важных объектов информатизации [7].

По результату реализации проекта внедрения СМИБ в деятельность Предприятия представилось возможным сформулировать следующие выводы.

1 Следование методологии СТБ ISO/IEC 27001 позволило определить цели внедрения СМИБ в деятельность Предприятия, заинтересованные стороны, участников проекта и сроки реализации.

2 В реализацию проекта был вовлечен весь персонал Предприятия: от директора до специалиста, что способствовало выделению необходимых материальных ресурсов в достаточном количестве, своевременной и качественной актуализации локальной правовой базы, внесению изменений и дополнений в должностные инструкции работников, повышению осведомленности последних по вопросам ИБ.

3 В соответствии с требованиями нормативных актов Президента Республики Беларусь [8, 9] на базе РУП «Национальный центр обмена трафиком» и Национального центра защиты персональных данных Республики Беларусь кроме специалистов, обеспечивающих ИБ, было осуществлено повышение квалификации персонала по вопросам технической и криптографической защиты информации от заместителя директора Предприятия до специалистов структурных подразделений.

4 При осуществлении работы по подбору и изучению соискателей на вакантные должности Предприятия осуществляется тщательное изучение профессиональных, этических качеств, а также гражданской ответственности и законопослушности кандидатов.

5 Парадигма применения в СМИБ законодательных, нормативных и договорных требований позволяет гибко и адаптивно выстраивать локальную правовую базу, регулирующую вопросы ИБ, в том числе путем имплементации требований национального законодательства.

6 Реализацией проекта внедрения СМИБ процесс поддержания надлежащего уровня ИБ в организации не заканчивается (методологией СМИБ предусмотрены систематические мероприятия по переоценке рисков ИБ и проведения внутренних аудитов на соответствие требованиям СТБ ISO/IEC 27001).

7 Подтверждение соответствия требованиям СТБ ISO/IEC 27001 в Национальной системе соответствия Республики Беларусь СМИБ, внедренной в деятельность Предприятия, позволит получить лицензию на право выполнения работ по проектированию, созданию и аудиту систем ИБ критически важных объектов информатизации, а также укрепить деловую репутацию и инвестиционную привлекательность.

**Список литературы**

1 Информационные технологии. Методы обеспечения безопасности. Общий обзор и словарь : СТБ ISO/IEC 27000-2024. – Введ. 25.10.2024 (с отменой на территории РБ СТБ ISO/IEC 27000-2012). – Минск : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2024. – 23 с.

2 Информационная безопасность, кибербезопасность и защита конфиденциальности. Требования : СТБ ISO/IEC 27001-2024. – Введ. 25.10.2024 (с отменой на территории РБ СТБ ISO/IEC 27001-2016). – Минск : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2024. – 19 с.

3 Информационная безопасность, кибербезопасность и защита конфиденциальности. Средства управления информационной безопасностью : СТБ ISO/IEC 27002-2024. – Введ. 25.10.2024 (с отменой на территории РБ СТБ ISO/IEC 27002-2012). – Минск : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2024. – 132 с.

4 Информационные технологии. Методы обеспечения безопасности. Руководство по внедрению системы менеджмента информационной безопасности : СТБ ISO/IEC 27003-2014. – Введ. 14.08.2014. – Минск : Науч.-исслед. ин-т техн. защиты информации. – 59 с.

5 Информационные технологии. Методы обеспечения безопасности. Менеджмент информационной безопасности. Измерения : СТБ ISO/IEC 27004-2014. – Введ. 14.08.2014. – Минск : Науч.-исслед. ин-т техн. защиты информации. – 53 с.

6 Информационная безопасность, кибербезопасность и защита конфиденциальности. Руководство по менеджменту рисков информационной безопасности : СТБ ISO/IEC 27005-2024. – Введ. 25.10.2024 (с отменой на территории РБ СТБ ISO/IEC 27005-2012). – Минск : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2024. – 56 с.

7 О лицензировании : Закон Респ. Беларусь от 14 окт. 2022 г. № 213-З // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 10.09.2025).

8 О киберобезопасности : Указ Президента Респ. Беларусь, 14 февр. 2023 г., № 40 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 10.09.2025).

9 О некоторых мерах по совершенствованию защиты информации : Указ Президента Респ. Беларусь, 16 апр. 2013 г., № 196 : в ред. Указа Президента Респ. Беларусь от 09.12.2019 г. // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 10.09.2025).

УДК 621.314

## ДИАГНОСТИКА ПРЕДОТКАЗНОГО СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ОСНОВЕ ЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА

*И. Л. ГРОМЫКО*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Для диагностики неисправностей трансформаторов в настоящее время существует много различных методов. В качестве информативных параметров используются частичные разряды, анализ растворенного газа, спектроскопия, индекс поляризации, коэффициент диэлектрической проницаемости [1], сопротивление изоляции, измерение напряжения восстановления, ток поляризации и деполяризации, анализ частотных характеристик (*frequency response analysis* – FRA) и др. В последнее время FRA привлекают всё больше внимания для обнаружения механических повреждений из-за его высокой чувствительности к деформациям обмоток трехфазных трансформаторов [2].

Для проведения частотного анализа использован метод трех вольтметров. Схемы подключения задающего генератора сигналов и вольтметров для опытов холостого хода и короткого замыкания приведены на рисунке 1.

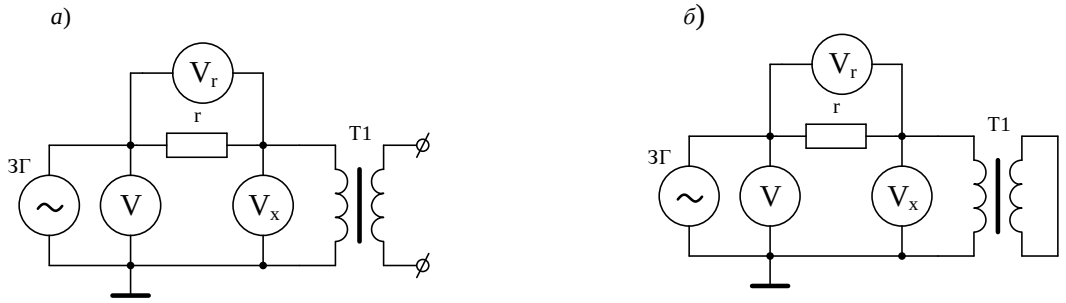



Рисунок 1 – Схемы подключения задающего генератора сигналов и вольтметров:
*а* – для опыта холостого хода; *б* – для опыта короткого замыкания

Для построения частотных характеристик используются четыре мультиметра В7-68 (один используется как частотомер, другие – как вольтметры), задающий генератор сигналов Г3-112 и высокочастотный резистор *r* на 4,5 Ом.

С помощью магазина измерительных сопротивлений выполнялось изменение сопротивления в широких пределах от (0,1 Ом до 100 кОм) для имитации межфазного замыкания обмоток (МФЗ) и предшествующих ему состояний.

На рисунке 2 представлены импедансные и фазочасточные характеристики трехфазного трансформатора ТМ-50/6 при МФЗ в режиме холостого хода для диапазона частот 0–100 кГц. Полученные изображения могут использоваться после нормировки в качестве исходных данных для искусственных нейронных сетей [3]. Особое внимание требуется уделить таким факторам в порядке их значимости, как форма фазовых характеристик, амплитуды резонансов, смещения резонансных частот и число резонансов, связав их с требуемой детализацией при классификации неисправностей.

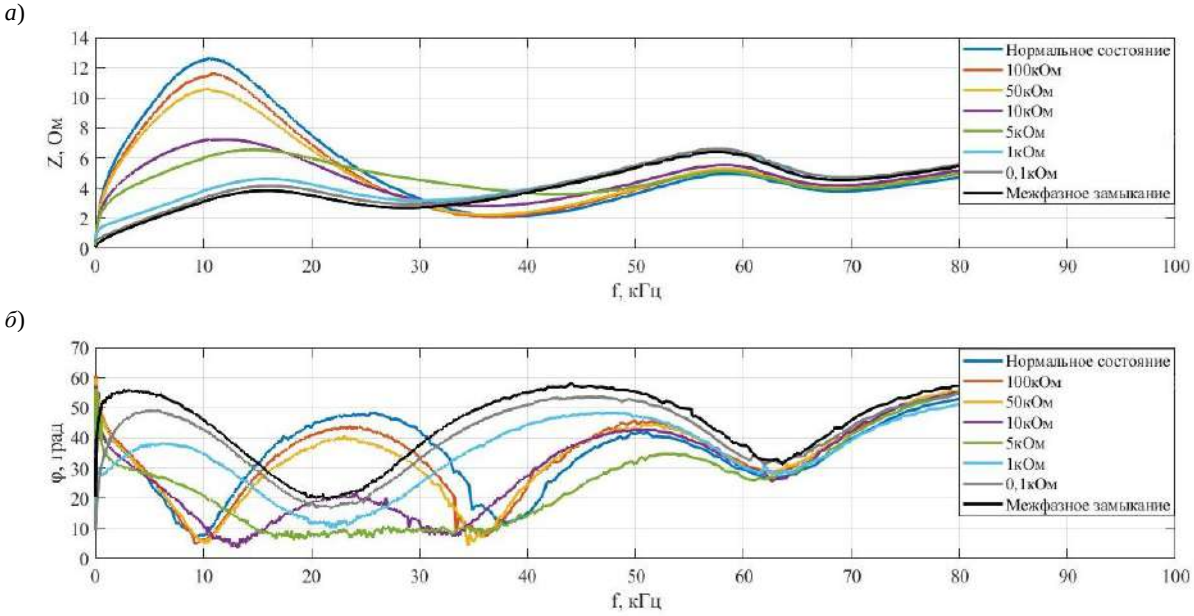



Рисунок 2 – Импедансные (*а*) и фазочастотные (*б*) характеристики при межфазном замыкании трансформатора

Из рисунка 2 можно сделать следующие выводы:

– наиболее значимые изменения присущи первой резонансной области до достижения частоты 30–50 кГц в зависимости от мощности трансформатора;

– амплитуда первой резонансной области импедансных характеристик снижается по мере уменьшения сопротивления до наступления полного МФЗ;

– фазочасточные характеристики отличаются значимым изменением формы кривой и сдвигом частоты в большую сторону для первой резонансной области.

**Список литературы**

1 **Behjat, V**. A new statistical approach to interpret power transformer frequency response analysis: Nonparametric statistical methods / V. Behjat, M. Mahvi, E. Rahimpour // 30th International Power System Conference (PSC), Tehran, Iran. – 2015. – P. 142–148. – DOI: 10.1109/IPSC.2015.7827740.

2 Evaluation of numerical indices for the assessment of transformer frequency response. IET Generation, Transmission & Distribution / M. H. Samimi, S. Tenbohlen, A. A. S. Akmal, H. Mohseni. – 2017. – Vol. 11, № 1. – P. 218–227. – DOI: 10.1049/iet-gtd.2016.0879.

3 **Громыко, И. Л.** Метод неразрушающего контроля состояния однофазных и трёхфазных трансформаторов на основе частотных характеристик / И. Л. Громыко, В. Н. Галушко // Приборы и методы измерений. – 2025. – Т. 16, № 2. – С. 58–167. – DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-158-167.

УДК 004.052.32+681.518.5

# К ОРГАНИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ САМОДВОЙСТВЕННОСТИ БУЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ НА ВЫХОДАХ ДИСКРЕТНЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ЛОГИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ СИГНАЛОВ И РАВНОВЕСНЫХ КОДОВ

*Д. В. ЕФАНОВ*

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Российская Федерация*

*Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва*

*Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан*

В ряде работ [1–3] показано, что одним из эффективных подходов к организации схем встроенного контроля (СВК) для дискретных устройств автоматики и вычислительной техники является использование сразу же нескольких диагностических признаков. При незначительном усложнении контрольного оборудования удается значительно повысить наблюдаемость ошибок на контрольных выходах СВК по сравнению с традиционными методами контроля по одному диагностическому признаку. В зависимости от элементной базы объекта диагностирования, конфигурации элементов и связей между ними, сложности реализуемых булевых функций на его выходах, видов неисправностей удается повысить показатели наблюдаемости в среднем на 25–40 %. Такой эффект объясняется импульсным режимом работы при подаче сигналов логического 0 и логической 1 в виде последовательностей импульсов 0101…01 и 1010…10 соответственно и дополнительным кодовым контролем вычислений. Естественно, это требует временно́й избыточности и специальной настройки работы устройств [4–6].

В [7, 8] обсуждаются вопросы применения равновесных кодов при организации СВК на основе ЛКС с дополнительным контролем вычислений по признаку самодвойственности булевых функций, описывающих контролируемые выходы. Предлагается для организации контроля вычислений таким образом использовать равновесные коды «$r$ из $2r$» ($r/2r$-коды), где $r$ – вес кодового слова, а $2r = n$ – длина кодового слова (количество разрядов в нем). Среди равновесных кодов только такие коды можно использовать для организации контроля вычислений сразу же по двум диагностическим признакам. Это объясняется тем фактом, что множество кодовых слов $r/2r$-кодов содержит пары ортогональных по всем разрядам кодовых слов. Именно поэтому данные коды и можно применить при организации СВК по двум диагностическим признакам.

Среди равновесных кодов вида $r/2r$ можно выделить коды 2/4, 3/6, 4/8, 5/10 и т. д. Мощности $N$ множеств кодовых слов данных кодов образуют такую последовательность: 6, 20, 70, 252, … . Это последовательность центральных биномиальных коэффициентов (A000984 в последовательности Слоана [9]). С ростом $n$ существенно растет мощность множества кодовых слов равновесного кода, что приводит и к росту сложности тестера. Кроме того, в общем случае при синтезе СВК по двум диагностическим признакам требуется учитывать ограничение $2^t \geq C_{2r}^r$, где $t \in \mathbb{N}$ – число входов объекта диагностирования. Это равносильно условию $t \geq \log_2 C_{2r}^r$. В противном случае не удастся сгенерировать полное множество кодовых слов кода $r/2r$. Здесь возникает ограничение числа входов $t_{\min}$ объекта диагностирования для применения контроля вычислений по нескольким диагностическим признакам (таблица 1).

*Таблица 1* – **Параметры кодов *r*/2*r* и объектов диагностирования для организации СВК**

| $r$ | $2r$ | $N$ | $\log_2 C_{2r}^r$ | $t_{\min}$ | $r$ | $2r$ | $N$ | $\log_2 C_{2r}^r$ | $t_{\min}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 4 | 6 | 2,585 | 3 | 7 | 14 | 3432 | 11,745 | 12 |
| 3 | 6 | 20 | 4,322 | 5 | 8 | 16 | 12870 | 13,652 | 14 |
| 4 | 8 | 70 | 6,129 | 7 | 9 | 18 | 48620 | 15,569 | 16 |
| 5 | 10 | 252 | 7,977 | 8 | 10 | 20 | 184756 | 17,495 | 18 |
| 6 | 12 | 924 | 9,852 | 10 | | | | | |

Следует отметить, что напрямую коды $r/2r$ подходят для организации СВК по двум диагностическим признакам для тех объектов диагностирования, которые имеют число выходов $m = 2r$. Для объектов диагностирования с числом выходов $m \neq 2r$ (с нечетным их числом) можно предложить два подхода к организации СВК по двум диагностическим признакам. Первый подход тривиален и состоит в выделении групп выходов с мощностью, равной $2r$. Например, для $m = 11$ можно предложить выделение трех групп выходов по четыре выхода в каждой (один из выходов будет входить сразу же в две группы) и контроль вычислений по 2/4-коду или же выделение двух групп по шесть выходов в каждой (один из выходов будет присутствовать в обеих группах) с контролем вычислений по 3/6-коду и т. д. СВК в этом случае синтезируются по аналогии со структурой из [7, 8]. Выходы отдельных подсхем контроля объединяются на входах самопроверяемого компаратора, синтезируемого на основе элементарных модулей сжатия парафазных сигналов [10]. Второй подход ранее не обсуждался в литературе и связан с тем, что контроль вычислений на нечетном числе выходов можно организовывать с использованием кода $r/2r$ с параметром $2r = m + 1$. В этом случае дополнительный выход с блока вычисления контрольных сигналов будет напрямую, без какой-либо коррекции, формировать требуемый разряд кодового слова. К примеру, для того же случая $m = 11$ получаем $2r = m + 1 = 11 + 1 = 12$, $r = 6$. Выделяем одну группу выходов и контролируем ее на основе 6/12-кода. Естественно, с учетом ограничений, приведенных в таблице 1. Если же число входов меньше обозначенного, то требуется использовать контроль вычислений по коду с меньшим значением $r$.

При синтезе СВК по двум диагностическим признакам требуется производить оценку показателей структурной избыточности по сравнению с традиционными методами, а также оценку показателей обнаруживающей способности. При этом может быть разработан метод, позволяющий за счет модификации структуры объекта диагностирования в некоторую контролепригодную структуру покрывать полное множество ошибок, вызываемых неисправностями из заданной модели. Один из таких методов уже известен и описан в [11]. Но этот метод не учитывает возможности контроля вычислений по двум диагностическим признакам и может быть усовершенствован. К настоящему моменту времени вопрос его модификации остается без ответа.

Существует колоссальное количество способов организации СВК по двум диагностическим признакам с использованием равновесных кодов $r/2r$. При этом разработчик систем диагностирования может синтезировать большое число вариантов СВК даже при выборе одного из вариантов контроля (за счет различных способов доопределения сигналов на каждом наборе значений аргументов [12]). Подход к организации СВК по двум диагностическим признакам интересен во многих приложениях, например, при построении систем критического применения с обнаружением неисправностей при условии редко меняющихся входных данных [13, 14].

**Список литературы**

1 **Ефанов, Д. В.** Исследование свойств самодвойственных комбинационных устройств с контролем вычислений на основе кодов Хэмминга / Д. В. Ефанов, Т. С. Погодина // Информатика и автоматизация. – 2023. – Т. 22, № 2. – С. 349–392. – DOI: 10.15622/ia.22.2.5.

2 **Ефанов, Д. В.** Самодвойственные цифровые устройства с контролем вычислений по кодам Сяо / Д. В. Ефанов, Т. С. Погодина // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2023. – № 63. – С. 118–136. – DOI: 10.17223/19988605/63/14.

3 Combinational Circuits Testing Based on Hsiao Codes with Self-Dual Check Functions / D. V. Efanov, T. S. Pogodina, N. M. Aripov [et al.] // Computation. – 2025. – Vol. 13, is. 1. – 15. – DOI: 10.3390/computation13010015.

4 **Аксёнова, Г. П.** Восстановление в дублированных устройствах методом инвертирования данных / Г. П. Аксёнова // Автоматика и телемеханика. – 1987. – № 10. – С. 144–153.

5 Обнаружение неисправностей в самопроверяемых комбинационных схемах с использованием свойств самодвойственных функций / М. Гессель, В. И. Мошанин, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 1997. – № 12. – С. 193–200.

6 **Ефанов, Д. В**. Тестеры самодвойственных и «близких» к ним сигналов / Д. В. Ефанов, Д. В. Пивоваров // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2024. – Т. 67, № 1. – С. 5–19. – DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-1-5-19.

7 Self-Dual Complement Method up to Constant-Weight Codes for Arrangement of Combinational Logical Circuits Concurrent Error-Detection Systems / D. Efanov, V. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov [et al.] // Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019), Batumi, Georgia, September 13–16, 2019. – P. 136–143. – DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884398.

8 Обнаружение неисправностей в комбинационных схемах на основе самодвойственного дополнения до равновесных кодов / Д .В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Пивоваров // Труды Института системного программирования РАН. – 2019. – Т. 31, № 1. – С. 115–132. – DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(1)-8.

9 The On-Line Encyclopedia of Integer Sequences (OEIS). – URL: https://oeis.org/ (дата обращения: 20.01.2025).

10 **Lala, P. K.** Self-Checking and Fault-Tolerant Digital Design / P. K. Lala. – San Francisco : Morgan Kaufmann Publishers, 2001. – 216 p.

11 Построение самопроверяемых комбинационных схем на основе свойств самодвойственных функций / М. Гессель, А. А. Морозов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2000. – № 2. – С. 151–163.

12 **Efanov, D. V.** Investigation of Ways of Synthesizing Concurrent Error-Detection Circuits Based on Boolean Signal Correction Using Uniform Separable Codes / D. V. Efanov, Y. I. Yelina // Russian Microelectronics. – 2024. – Vol. 53, № 5. – P. 471–482. – DOI: 10.1134/S1063739724600456.

13 Checkability of the Digital Components in Safety-Critical Systems: Problems and Solutions / A. Drozd, V. Kharchenko, S. Antoshchuk [et al.] // Proceedings of 9th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2011), Sevastopol, 2011. – P. 411–416. – DOI: 10.1109/EWDTS.2011.6116606.

14 **Сапожников, Вл. В.** Синтез систем управления движением поездов на железнодорожных станциях с исключением опасных отказов / Вл. В. Сапожников. – М. : Наука, 2021. – 229 с.

УДК 004.052.32+681.518.5

# МЕТОДИКА СИНТЕЗА САМОКВАЗИДВОЙСТВЕННЫХ ДИСКРЕТНЫХ УСТРОЙСТВ С КОНТРОЛЕМ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПО ДВУМ ДИАГНОСТИЧЕСКИМ ПРИЗНАКАМ

*Д. В. ЕФАНОВ*
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Российская Федерация*
*Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва*
*Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан*

Развитие технологий синтеза дискретных устройств и систем управления ответственными технологическими процессами, несомненно, связано и с параллельным совершенствованием области технической диагностики. Особую значимость теоретические исследования принимают при создании новой элементной базы или развитии малоизученных компонентов. Например, так дело обстоит в исследовании особенностей квантовых вычислений [1, 2]. Поэтому важно не только разрабатывать новые методы построения и реализации дискретных устройств с высокими показателями надежности и безопасности, но и продумывать и исследовать методы наделения их структур свойствами контролепригодности, самопроверяемости и отказоустойчивости. Центральным вопросом здесь оказывается возможность создания устройства с оперативным обнаружением неисправностей [3, 4].

Исследования автора показали, что при синтезе дискретных устройств с обнаружением неисправностей можно использовать сразу же два и более диагностических признака для контроля вычислений [5]. При этом структурная избыточность схемы встроенного контроля увеличивается незначительно за счет довольно простых контрольных устройств, а наблюдаемость ошибок на контрольных выходах возрастает на 25–40 % в зависимости от структуры объекта диагностирования и условий трансляции ошибок, вызываемых неисправностями, на его выходы [6].

При синтезе дискретных устройств с обнаружением неисправностей по двум и более диагностическим признакам оказывается эффективным использование логической коррекции сигналов (ЛКС), впервые описанной в [7] под названием «логическое дополнение». Особое место здесь имеют равновесные коды «$r$ из $n$» ($r/n$-коды), где $r$ и $n$ – вес кодового слова и его длина. Довольно легко синтезируется схема встроенного контроля (СВК) по кодам вида $r/2r$, например 2/4, 3/6 и т. д. В [8] предложено использовать такие коды при синтезе СВК с контролем вычислений по признакам при-

надлежности кодовых слов, формируемых в СВК, равновесным кодам вида $r/2r$, а также самодвойственности каждой функции, определяющей значения разрядов кодовых слов этого кода на каждом наборе значений аргументов. За счет простоты схемы сжатия самодвойственных сигналов [9] и тестера самодвойственности [5] удается строить более эффективную СВК, чем при контроле вычислений только по одному диагностическому признаку. Дальнейшие исследования показали, что возможен контроль не только самодвойственности каждой функции, описывающей разряды кодовых слов, но и так называемой самоквазидвойственности [10]. Самоквазидвойственность функции подразумевает равенство ее значений на ортогональных по всем переменным наборах значений аргументов. Покажем, как в случае контроля еще и этого диагностического признака эффективно применять равновесные коды.

При синтезе СВК по двум диагностическим признакам – принадлежности кодовых слов $r/n$-коду и самоквазидвойственности каждой функции, описывающей разряды кодовых слов, – эффективным оказывается использование 1/4-кодов. Данные коды имеют всего четыре рабочих кодовых слова {0001, 0010, 0100, 1000}. Тестеры данных кодов – одни из самых простых тестеров равновесных кодов [11]. Для полной проверки их относительно одиночных константных неисправностей требуется подача всех четырех кодовых слов (это минимально возможное количество тестовых комбинаций для тестеров в принципе).

Базовая структура организации контроля вычислений представлена на рисунке 1. В ней блок $F(X)$ является объектом диагностирования и формирует булевы векторы $<f_4(X)\ f_3(X)\ f_2(X)\ f_1(X)>$ на каждом наборе значений аргументов $<X> = <x_t\ x_{t-1} \ldots x_2\ x_1>$. В СВК каждый вектор $<f_4(X)\ f_3(X)\ f_2(X)\ f_1(X)>$ преобразуется в вектор $<h_4(X)\ h_3(X)\ h_2(X)\ h_1(X)>$ за счет использования функций ЛКС $g_1(X)$, $g_2(X)$, $g_3(X)$, $g_4(X)$, вычисляемых блоком $G(X)$. Преобразования осуществляются в блоке коррекции сигналов (БКС) по формуле $h_j(X) = f_j(X) \oplus g_j(X),\ j = \overline{1, 4}$. Преобразования выполняются так, чтобы вектор $<h_4(X)\ h_3(X)\ h_2(X)\ h_1(X)>$ на каждом наборе значений аргументов принадлежал 1/4-коду и каждая функция $h_j(X)$ была самоквазидвойственной. Для контроля вычислений устанавливается тестер 1/4-кода (1/4-*TSC*), схема сжатия самоквазидвойственных сигналов и тестер самоквазидвойственности *SQDC* [12]. Сигналы с выходов с двух подсхем контроля сжимаются на входах самопроверяемого модуля сжатия парафазных сигналов *TRC* [5, 6, 11].

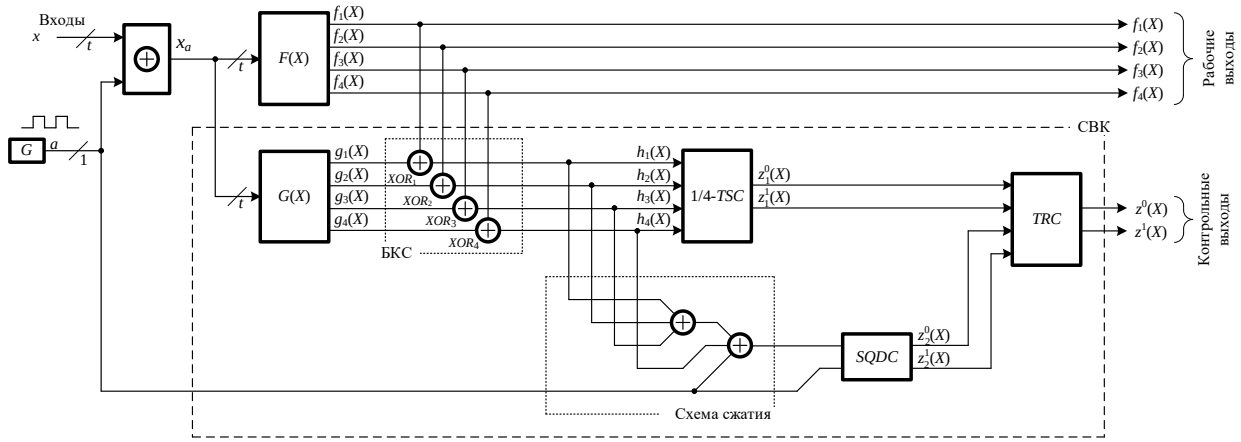



Рисунок 1 – Базовая структура организации СВК

Представленная на рисунке 1 структура работает в импульсном режиме, когда сигналы логического 0 и логической 1 подаются в виде последовательностей импульсов – 0101…01 и 1010…10 соответственно. Для этого используется генератор $G$ импульсов $a$ со скважностью 2, а сигнал с каждого входа объекта диагностирования представляется в виде последовательности с помощью двухвходового элемента сложения по модулю 2: на первый вход его подается сигнал с определенного входа, а на второй – сигнал $a$ с генератора.

Для организации контроля вычислений выделяются комбинационные составляющие в структурах объектов диагностирования. Определяется общее количество $n$ выходов. Выходы разбиваются

на $q = \left\lfloor \frac{n}{4} \right\rfloor$ подмножеств мощностью 4 без пересечений и, возможно (при $n(\mathrm{mod}4) \neq 0$), еще на одно подмножество, где имеется $n(\mathrm{mod}4)$ выходов и $(4 - n(\mathrm{mod}4))$ уже использованных в других выделенных четверках. Для каждой четверки выходов строится отдельная подсхема контроля вычислений по двум диагностическим признакам с использованием 1/4-кода с применением следующих правил:

1 Наборы значений аргументов разбиваются на пары, соответствующие десятичным эквивалентам двоичных представлений наборов, – пары $(i, 2^t - 1 - i)$, $i \in \{0, 1, ..., 2^{t-1} - 1\}$, где $t$ – число входов.

2 Наборы $i$, $i \in \{0, 1, ..., 2^{t-1} - 1\}$, в лексикографическом порядке следования разбиваются на четыре группы по $\frac{2^{t-1}}{4} = 2^{t-3}$ набора в каждой.

3 Каждой полученной группе приписывается одно из кодовых слов 1/4-кода: {0001, 0010, 0100, 1000}.

4 Наборам с номерами $2^t - 1 - i$ приписываются те же кодовые слова 1/4-кода, что и наборам $i$.

5 Определяются значения функций логической коррекции $g_1(X)$, $g_2(X)$, $g_3(X)$, $g_4(X)$.

Далее СВК строится в выбранном элементном базисе.

Представленный подход к синтезу СВК на основе ЛКС с применением 1/4-кода подходит для использования с любыми комбинационными составляющими без ограничений на виды реализуемых ими булевых функций. Подход абсолютно новый и ранее не исследовался учеными и инженерами, поэтому требует многочисленных экспериментов и тестирования на реальных объектах, обеспечивающих автоматическое протекание технологических процессов в различных секторах экономики. Предварительные теоретические выкладки показывают его высокую эффективность в части обнаружения ошибок на выходах комбинационных составляющих дискретных устройств.

**Список литературы**


1 Deductive Matrix Synthesis for Fault Simulation / W. Gharibi, V. Hahanov, D. Devadze [et al.] // 2023 17th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), 22–25 February 2023, Jaroslaw, Poland. – DOI: 10.1109/CADSM58174.2023.10076506.

2 Vector Synthesis of Fault Testing Map for Logic / V. Hahanov, W. Gharibi, S. Chumachenko, E. Litvinova // IAES International Journal of Robotics and Automation (IJRA). – 2024. – Vol. 13, is. 3. – P. 293–306. – DOI: 10.11591/ijra.v13i3.pp293-306.

3 **Сапожников, В. В.** Дискретные автоматы с обнаружением отказов / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1984. – 112 с.

4 **Согомонян, Е .С.** Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомонян, Е. В. Слабаков. – М. : Радио и связь, 1989. – 208 с.

5 **Ефанов, Д. В.** Исследование свойств самодвойственных комбинационных устройств с контролем вычислений на основе кодов Хэмминга / Д. В. Ефанов, Т. С. Погодина // Информатика и автоматизация. – 2023. – Т. 22, № 2. – С. 349–392. – DOI: 10.15622/ia.22.2.5.

6 Combinational Circuits Testing Based on Hsiao Codes with Self-Dual Check Functions / D. V. Efanov, T. S. Pogodina, N. M. Aripov [et al.] // Computation. – 2025. – Vol. 13, is. 1. – 15 p. – DOI: 10.3390/computation13010015.

7 Организация функционального контроля комбинационных схем методом логического дополнения / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, А. В. Дмитриев [и др.] // Электронное моделирование. – 2002. – Т. 24, № 6. – С. 52–66.

8 Self-Dual Complement Method up to Constant-Weight Codes for Arrangement of Combinational Logical Circuits Concurrent Error-Detection Systems / D. Efanov, V. Saposhnikov, Vl. Saposhnikov [et al.] // Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019), Batumi, Georgia, September 13–16, 2019. – P. 136–143. – DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884398.

9 New Self-Dual Circuits for Error Detection and Testing / A. Dmitriev, V. Saposhnikov, Vl. Saposhnikov, M Goessel // VLSI Design. – 2000. – Vol. 11, is. 1. – P. 1–21. – DOI: 10.1155/2000/84720.

10 **Ефанов, Д. В.** Синтез самопроверяемых дискретных устройств на основе полиномиальных кодов с контролем вычислений по нескольким диагностическим признакам / Д. В. Ефанов, Д. В. Пивоваров // Автоматика и телемеханика. – 2025. – № 5. – С. 39–60. – DOI: 10.31857/S0005231025050036. – EDN: AXPIOQ.

11 **Сапожников, В. В.** Самопроверяемые дискретные устройства / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – СПб. : Энергоатомиздат, 1992 – 224 с.

12 **Ефанов, Д. В.** Особенности использования кодов Хэмминга при синтезе самопроверяемых цифровых устройств на основе метода инвертирования данных / Д. В. Ефанов // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2024. – Т. 29, № 3. – С. 379–392. – DOI: 10.24151/1561-5405-2024-29-3-379-392.

УДК 004.052.32+681.518.5

# МЕТОД СИНТЕЗА САМОПРОВЕРЯЕМЫХ ДИСКРЕТНЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИИ РАВНОВЕСНЫХ КОДОВ «1 из 4» и «3 из 4»

*Д. В. ЕФАНОВ*
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Российская Федерация*
*Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва*
*Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан*

*Е. И. ЕЛИНА*
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Российская Федерация*
*Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация*

При использовании дискретных устройств в системах критического применения важнейшими показателями являются показатели надежности и безопасности их функционирования. Требуется обеспечивать реализацию заданных алгоритмов работы с требуемой вероятностью, а также безопасное поведение при отказах [1]. Центральное место в этой связи занимают технические средства, позволяющие своевременно зафиксировать отказы компонентов дискретных устройств, что, в свою очередь, открывает и пути к эффективному парированию их проявлений [2]. Целый класс дискретных устройств, неисправности в которых обнаруживаются в процессе их нормального функционирования, составляют самопроверяемые дискретные устройства [3, 4].

Теория синтеза самопроверяемых дискретных устройств развивается примерно с 60-х годов прошлого столетия, и известно большое число методов синтеза полностью и частично самопроверяемых дискретных устройств. Во всем мире широко применяют методы дублирования и контроля вычислений по паритету [5]. Естественно, они имеют свои достоинства и недостатки. Основным недостатком дублирования является невозможность и даже бессмысленность учета особенностей структуры объекта диагностирования и различных моделей неисправностей для покрытия вызываемых ими ошибок на выходах. Основным недостатком же метода паритета является невозможность покрытия полного множества ошибок на выходах устройств и пропуск любой ошибки с четной кратностью. Поэтому во всем мире разработаны и разрабатываются методы синтеза самопроверяемых дискретных устройств, в основе которых лежат помехозащищенные блоковые коды с малой избыточностью, позволяющие вносить невысокую структурную избыточность в схемы встроенного контроля (СВК) и парировать требуемые ошибки на выходах объектов диагностирования.

Одним из классов равномерных блоковых кодов, широко используемых при синтезе самопроверяемых дискретных устройств, является класс равновесных кодов [3–5]. Множество кодовых слов равновесных кодов образуется путем объединения всех кодовых слов заданной длиной $n$ с одинаковым весом $r \leq n$. Число кодовых слов равновесных кодов равно $C_n^r$. Равновесные коды обозначают как коды «$r$ из $n$», или просто как $r/n$-коды.

В [6] описан метод синтеза СВК для дискретных устройств, подразумевающий использование свойств равновесных кодов. Он заключается в том, что информационные символы, формируемые на выходах объекта диагностирования, дополняются контрольными символами таким образом, чтобы итоговое кодовое слово, формируемое на параллельных выходах объекта диагностирования и контрольного блока при подаче на входы каждого из наборов значений аргументов, принадлежало выбранному $r/n$-коду. Для кодового вектора из $m$ разрядов, формируемого на выходах объекта диагностирования, определяются значения $r_{\min}$ и $r_{\max}$ – минимальное и максимальное значения веса кодовых слов. Тогда при синтезе СВК потребуется дополнительно вычислить $(r_{\max} - r_{\min})$ контрольных функций. На практике это приводит, порой, к использованию $r/n$-кодов с большими значениями $n$, имеющими сложные тестеры и, как следствие, к более сложным процедурам обеспечения их полной проверки при эксплуатации. В ряде случаев не удается добиться подачи полного множества тестовых комбинаций на тестеры.

Исследования авторов настоящей работы показали, что при синтезе самопроверяемых дискретных устройств могут использоваться сразу же два и более равновесных кодов, что позволяет добиться сокращения числа дополнительных сигналов, использования более простых тестеров и снижения показателей структурной избыточности конечных устройств. О таких кодах, названных

авторами композициями равновесных кодов, можно дополнительно почитать в [7]. Авторами настоящей работы образованы композиции равновесных кодов, наиболее простой из которых является композиция кодов 1/4 и 3/4. Ее использование позволяет синтезировать СВК для дискретных устройств по структуре, приведенной на рисунке 1. Она организуется для группы из трех выходов объекта диагностирования $F(X)$ – $f_1(X)$, $f_2(X)$ и $f_3(X)$, где $<X>$ обозначает набор значений аргументов. Так как во множество кодовых слов композиции кодов 1/4 и 3/4 входят кодовые слова с весом $r = 1$ и $r = 3$, достаточно дополнить сигналы, формируемые на выходах объекта диагностирования, всего одним сигналом $g(X)$, вычисляемым блоком контрольной логики $G(X)$. Любой вектор $<f_3(X)\ f_2(X)\ f_1(X)>$ преобразуется в кодовое слово, принадлежащее композиции кодов 1/4 и 3/4, с использованием всего одного дополнительного сигнала. Для контроля принадлежности кодового слова $<g(X)\ f_3(X)\ f_2(X)\ f_1(X)>$ композиции кодов 1/4 и 3/4 устанавливается тестер данной композиции, имеющий простейшую структуру (рисунок 2, на рисунке $<Y> = <y_4\ y_3\ y_2\ y_1>$), требующую для полной проверки всего четырех комбинаций из множества {1000, 0010, 1101, 0111} или {0001, 1011, 0100, 1110}.

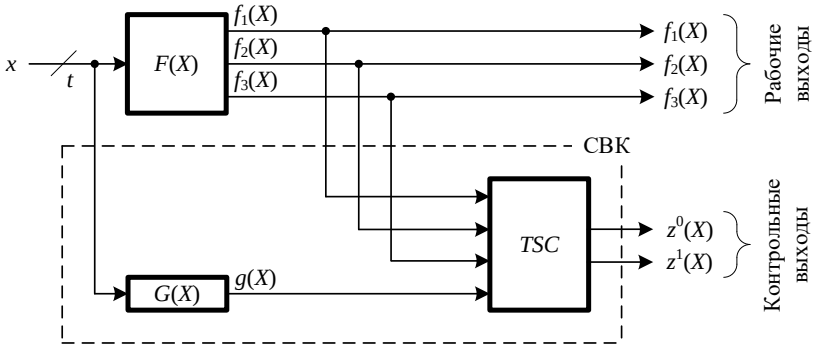



Рисунок 1 – Базовая структура организации СВК

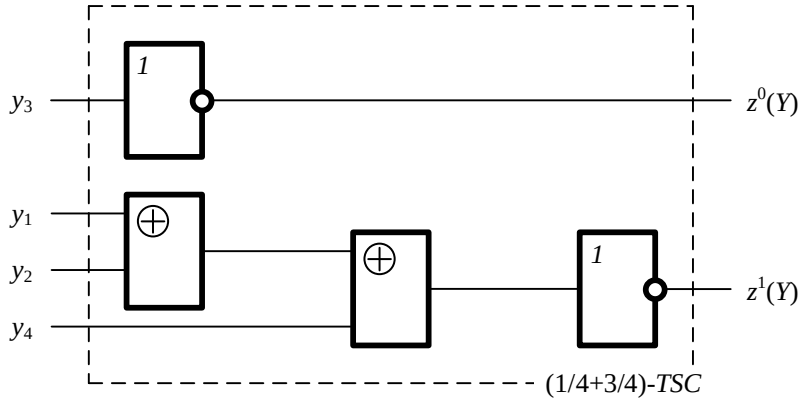



Рисунок 2 – Простейшая структура тестера композиции кодов 1/4 и 3/4

Использование структуры, приведенной на рисунке 1, и композиции равновесных кодов 1/4 и 3/4 позволяет на практике синтезировать более простые самопроверяемые дискретные устройства, чем при использовании дублирования и отдельных равновесных кодов. Поэтому следование такому методу синтеза самопроверяемых дискретных устройств может оказаться эффективным при построении высоконадежных систем критического применения.

**Список литературы**


1 **Гавзов, Д. В.** Методы обеспечения безопасности дискретных систем / Д. В. Гавзов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 1994. – № 8. – С. 3–50.

2 **Пархоменко, П. П.** Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства) / П. П. Пархоменко, Е. С. Согомонян. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 320 с.

3 **Согомонян, Е. С.** Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомонян, Е. В. Слабаков. – М. : Радио и связь, 1989. – 208 с.

4 Сапожников, В. В. Самопроверяемые дискретные устройства / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – СПб. : Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.

5 New Methods of Concurrent Checking: Edition 1 / M. Göessel, V. Ocheretny, E. Sogomonyan, D. Marienfeld. – Dordrecht : Springer Science+Business Media B. V., 2008. – 184 p.

6 **Слабаков, Е. В.** Построение полностью самопроверяемых комбинационных устройств с использованием равновесных кодов / Е. В. Слабаков, Е. С. Согомонян // Автоматика и телемеханика. – 1980. – № 9. – С. 173–181.

7 **Ефанов, Д. В.** Композиции двух равновесных кодов с ортогональными по всем разрядам комбинациями для синтеза самопроверяемых дискретных устройств / Д. В. Ефанов // Проблемы управления. – 2025. – № 3. – С. 49–62.

УДК 004.052.32+681.518.5

# СПОСОБ СИНТЕЗА КОДЕРОВ ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ КОДОВ В ВИДЕ КОМБИНАЦИОННЫХ ЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ

*Д. В. ЕФАНОВ*
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Российская Федерация*
*Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва*
*Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан*

*Д. В. ПИВОВАРОВ*
*Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация*

Полиномиальные, или алгебраические, коды широко применяются в сетях передачи данных, а также при построении дискретных устройств с обнаружением неисправностей и ошибок в вычислениях [1–5]. Существует большое разнообразие способов построения полиномиальных кодов с различными свойствами обнаружения ошибок различных видов (по числу сочетаний искажений нулевых и единичных разрядов) и кратностей в информационных символах кодовых слов [6, 7]. Характеристики обнаружения ошибок конкретным полиномиальным кодом определяются использованным при его построении порождающими полиномом.

При кодировании данных и получении кодовых слов полиномиальных кодов повсеместно применяются сдвиговые регистры, реализуемые на основе устройств, запоминающих сигналы (как правило, D-триггеры), функционирующих в несколько тактов [8]. Это обстоятельство усложняет применение данного класса кодов при синтезе самопроверяемых дискретных устройств, где требуется вычисление проверочных символов в схемах встроенного контроля в один такт работы [9]. В противном случае изменяются принципы тестирования устройств, и требуется использование не тестовых комбинаций, а тестовых последовательностей [10]. Поэтому возникает задача разработки способа реализации кодеров полиномиальных кодов в виде комбинационных схем.

Исследования авторов настоящей работы позволили установить, что функцию, описывающую каждый проверочный символ любого полиномиального кода с произвольным числом информационных символов, можно получить следующим образом [11, 12]:

1 Задаются числом $m$ информационных символов, для которых требуется построить полиномиальный код, а также порождающим полиномом степени $k$ (здесь есть одно ограничение – степень порождающего полинома должна быть меньше числа информационных символов: $k < m$).

2 Формируют полное множество кодовых слов равновесных кодов «1 из $m$» (его мощность равна $C_m^1 = m$), соответствующих информационным векторам, составленным из информационных символов.

3 Для каждого кодового слова кода «1 из $m$» определяются значения проверочных символов путем деления информационного вектора на порождающий полином.

4 Составляются формулы для контрольных функций, описывающих разряды проверочных символов кодовых слов: если значение проверочного символа равно 1, то в формулу включается $i$-й информационный символ, иначе не включается; информационные символы в формулах записываются через знак операции сложения по модулю 2 (*XOR*).

К примеру, получим формулы, описывающие разряды проверочных символов кодовых слов полиномиального кода с $m = 5$ и с порождающим полиномом $y^2 + y + 1$. В таблице 1 приведено множество кодовых слов равновесного кода «1 из 5», а также соответствующие им контрольные векторы, полученные путем деления информационных векторов на порождающий полином. В первой графе приведены указания на информационные символы, которые равны единице в информацион-

ных векторах и которые будут присутствовать в формулах, описывающих проверочные символы кодовых слов полиномиальных кодов. У полиномиального кода, полученного при использовании порождающего полинома $y^2 + y + 1$, будет два проверочных символа $g_1$ и $g_2$, определяемых по формулам:

$$\begin{cases} g_1 = x_1 \oplus x_3 \oplus x_4, \\ g_2 = x_2 \oplus x_3 \oplus x_5. \end{cases}$$

Используя полученные формулы, можно легко синтезировать кодер полиномиального кода в виде комбинационной схемы. В отличие от используемого ранее способа получения контрольных функций, требующего рассмотрения полного множества информационных векторов, расчета значений контрольных функций полиномиальных кодов на каждом из них и формирования по полученным значениям алгебраической формы записи контрольных функций, в предложенном авторами способе требуется рассмотрение всего $m$ информационных векторов и не требуется анализа значений функций на каждом наборе аргументов при составлении алгебраического выражения для контрольных функций. С ростом значения $m$ трудоемкость способа растет линейно.

*Таблица 1* – **Множество кодовых слов для получения контрольных функций полиномиального кода**

| $x_i$ | $<x_5 x_4 x_3 x_2 x_1>$ | $<g_2 g_1>$ | $x_i$ | $<x_5 x_4 x_3 x_2 x_1>$ | $<g_2 g_1>$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $x_1$ | 00001 | 01 | $x_4$ | 01000 | 01 |
| $x_2$ | 00010 | 10 | $x_5$ | 10000 | 10 |
| $x_3$ | 00100 | 11 | | | |

Применение разработанного способа синтеза кодеров полиномиальных кодов в виде комбинационных схем позволяет упростить процедуру синтеза самопроверяемых дискретных устройств, в том числе установить условия обеспечения формирования полного множества тестовых комбинаций для кодеров в процессе их эксплуатации в составах схем встроенного контроля, а также выделить некоторые особые классы полиномиальных кодов, например, обладающих свойством самодвойственности каждой контрольной функции [11, 12]. Это, в свою очередь, открывает пути использования полиномиальных кодов при синтезе самопроверяемых дискретных устройств с контролем вычислений по нескольким диагностическим признакам [13, 14], что может оказаться эффективным при реализации надежных систем управления ответственными технологическими процессами.

**Список литературы**


1 **Sellers, F. F.** Error Detecting Logic for Digital Computers / F. F. Sellers, M.-Y. Hsiao, L.W. Bearnson. – New York : McGraw-Hill, 1968. – XXI + 295 p.

2 **Hamming, R. W.** Coding and information theory / R.W. Hamming. – 2nd ed. Englewood Cliffs. – NJ : Prentice-Hall, 1985. – 259 p.

3 **Fujiwara, E.** Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications / E. Fujiwara. – John Wiley & Sons, 2006. – 720 p.

4 **Сагалович, Ю. Л.** Введение в алгебраические коды / Ю. Л Сагалович ; Ин-т проблем передачи информации им. А. А. Харкевича Российской академии наук. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : ИППИ РАН, 2010 – 302 с.

5 Novel Methods for Synthesizing Self-Checking Combinational Circuits by Means of Boolean Signal Correction and Polynomial Codes / D. V. Efanov, R. B. Abdullaev, D. G. Plotnikov [et al.] // Computation. – 2024. – № 12 (7). – P. 135.

6 Polynomial Code with Detecting the Symmetric and Asymmetric Errors in the Data Vectors / R. B. Abdullaev, D. V. Efanov, V. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov // Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019), Batumi, Georgia, September 13–16, 2019. – P. 157–161. – DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884451.

7 **Abdullaev, R**. Polynomial Codes Properties Application in Concurrent Error-Detection Systems of Combinational Logic Devices / R. Abdullaev, D. Efanov // Proceedings of 19th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2021), Batumi, Georgia, September 10–13, 2021. – P. 40–46. – DOI: 10.1109/EWDTS52692.2021.9580992.

8 **Сапожников, В. В.** Основы технической диагностики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – М. : Маршрут, 2004. – 318 с.

9 **Согомонян, Е. С.** Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомонян, Е. В. Слабаков. – М. : Радио и связь, 1989. – 208 с.

10 **Абдуллаев, Р. Б.** Синтез полностью самопроверяемых схем встроенного контроля на основе полиномиальных кодов для комбинационных логических устройств / Р. Б. Абдуллаев // Автоматика на транспорте. – 2021. – Т. 7, № 3. – С. 452–476. – DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-3-452-476.

11 **Ефанов, Д. В**. Организация контроля вычислений на выходах самодвойственных цифровых устройств с применением циклических избыточных кодов / Д. В. Ефанов, Д. В. Пивоваров // Материалы XIV Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ-2024) ; под общ. ред. акад. РАН Д. А. Новикова, Москва, 17–20 июня 2024 г. – С. 2395–2399.

12 **Ефанов, Д. В.** Синтез самопроверяемых дискретных устройств на основе полиномиальных кодов с контролем вычислений по нескольким диагностическим признакам / Д. В. Ефанов, Д. В. Пивоваров // Автоматика и телемеханика. – 2025. – № 5. – С. 39–60. – DOI: 10.31857/S0005231025050036. – EDN: AXPIOQ.

13 **Ефанов, Д. В.** Особенности реализации самопроверяемых структур на основе метода инвертирования данных и линейных кодов / Д. В. Ефанов // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2023. – № 65. – С. 126–138. – DOI: 10.17223/19988605/65/13.

14 **Ефанов, Д. В.** Особенности использования кодов Хэмминга при синтезе самопроверяемых цифровых устройств на основе метода инвертирования данных / Д. В. Ефанов // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2024. – Т. 29, № 3. – С. 379–392. – DOI: 10.24151/1561-5405-2024-29-3-379-392.

УДК 656.25

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОМЕРНОЙ МАТРИЦЫ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ОТВЕТСТВЕННЫХ КОМАНД В СИСТЕМАХ АВТОМАТИКИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЯХ

*В. В. КАМЕНСКИЙ*

*Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация*

Среди всех видов транспорта железнодорожный транспорт занимает особое место. Автомобильный, авиационный и речной транспорт не может сравниться с железнодорожным транспортом ни по количеству пассажиров, ни по объему перевезенных грузов.

Управление движением поездов на участке железнодорожных линий осуществляет поездной диспетчер [1, 2]. Старший диспетчер осуществляет управление движением в регионе управления на нескольких диспетчерских участках.

Несмотря на достигнутые успехи в повышении надежности технических средств железнодорожной автоматики и телемеханики, иногда происходят отказы, техника выходит из строя, и это приводит к необходимости осуществлять управление движением поездов в режиме наличия неисправности.

В этом режиме работник службы движения – поездной диспетчер, используя все доступные каналы информации (информацию от машинистов, электромонтеров, монтеров пути и других работников, обеспечивающих функционирование инфраструктуры железнодорожного транспорта), собирает картину произошедшего отказа.

При неисправности напольных устройств или систем электрической централизации используется аварийный режим работы. В этом режиме поездной диспетчер всю ответственность за безопасность движения поездов берет на себя и управляет движением с помощью ответственных команд. Ответственные команды реализуются без выполнения каких-либо условий безопасности.

В системе диспетчерской централизации ДЦ-ЮГ с РКП [3] ответственная команда задается двумя агентами службы движения (поездным диспетчером и старшим диспетчером). Затем ответственная команда передается по двум независимым каналам связи на два независимых исполнительных устройства.

Выходы исполнительных устройств подключены к релейной матрице ответственных команд. Каждое исполнительное устройство выдает на матрицу 8 сигналов. Половину сигналов составляют 1, а другую половину – 0. Например, могут быть комбинации 11110000, 10101010. Количество возможных вариантов сигналов с кодовым расстоянием 4, состоящим из 8 бит, составляет 14 (варианты 00000000 и 11111111 исключаются). Поэтому применяется квадратная матрица ответственных команд из 7 строк и 7 столбцов. Общее количество ответственных команд, которое можно реализовать через матрицу 7 на 7, составляет 49. Сигналы с 1 по 7 используются как указатель строки, а сигналы с 8 по 14 – как указатель столбца.

На крупных станциях количество ответственных команд превышает возможности одной матрицы, и приходится устанавливать вторую матрицу ответственных команд.

Задача состоит в том, чтобы, не снижая кодовое расстояние, равное 4, увеличить возможное количество ответственных команд.

Существующая матрица является плоской (двухмерной). Проверим возможность увеличения количества ответственных команд при использовании не плоской, а объемной матрицы с тремя измерениями (3D).

Обозначим размерности матрицы буквами $d$ − строка, $m$ − столбец, $n$ – слой. Нужно найти значения $d$, $m$ и $n$, чтобы сумма $d$, $m$, $n$ была равна 14, а произведение $d$, $m$, $n$ было максимальным:

$$\begin{Bmatrix} d + m + n = 14 \\ dmn = \max \end{Bmatrix}.$$

Путем перебора всех возможных вариантов было выяснено, что максимальное количество элементов матрицы достигается, если размерности матрицы максимально близки друг к другу.

При $d = 5$, $m = 5$, $n = 4$ количество элементов матрицы максимально и составляет 100. При размерности матрицы ($d = 6$, $m = 4$, $n = 4$), ($d = 6$, $m = 5$, $n = 3$) или ($d = 7$, $m = 4$, $n = 3$) количество элементов матрицы составляет соответственно 96, 90 и 84. При дальнейшем изменении размерности матрицы количество ее элементов продолжает снижаться. В матрице с размерностью $d = 5$, $m = 5$, $n = 4$ сигналы с 1 по 5 используются как указатель строки, а сигналы с 6 по 10 – как указатель столбца. Сигналы с 11 по 14 используются как указатель слоя.

Увеличение размерности матрицы ответственных команд с 2 до 3 позволило увеличить количество ответственных команд в 2 раза – с 49 до 100.

Другим вариантом увеличения количества ответственных команд является использование матрицы, содержащей четыре измерения (4D). Для этого следует построить четырехмерную матрицу с максимальным количеством элементов. Обозначим размерности матрицы буквами $d$ − строка, $m$ − столбец, $n$ – слой, $k$ – строение. Нужно найти значения $d$, $m$, $n$ и $k$, чтобы сумма $d$, $m$, $n$, $k$ была равна 14, а произведение $d$, $m$, $n$, $k$ было максимальным.

Выберем матрицу с размерностью $d = 4$, $m = 4$, $n = 3$, $k = 3$. Количество элементов матрицы составляет $4 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 3 = 144$ элемента. При $d = 4$, $m = 5$, $n = 3$, $k = 2$ количество элементов матрицы составляет 120. При $d = 5$, $m = 5$, $n = 2$, $k = 2$ количество элементов матрицы составляет 100. При дальнейшем изменении размерности матрицы количество ее элементов уменьшается.

В матрице с размерностью $d = 4$, $m = 4$, $n = 3$, $k = 3$ (рисунок 1, *а*) сигналы с 1 по 4 используются как указатель строки, а сигналы с 5 по 8 – как указатель столбца. Сигналы с 9 по 11 используются как указатель слоя, а сигналы с 12 по 14 – как указатель строения.

Увеличение размерности матрицы ответственных команд с 2 до 4 позволило увеличить количество ответственных команд с 49 до 144.

В результате были получены следующие оптимальные значения измерений матрицы ответственных команд (рисунок 1, *б*): матрица 2D размерностью 7 · 7 (49 элементов), матрица 3D размерностью 5 · 5 · 4 (100 элементов), матрица 4D размерностью 4 · 4 · 3 · 3 (144 элемента), матрица 5D размерностью 4 · 3 · 3 · 2 · 2 (144 элемента).

*а)* *б)*

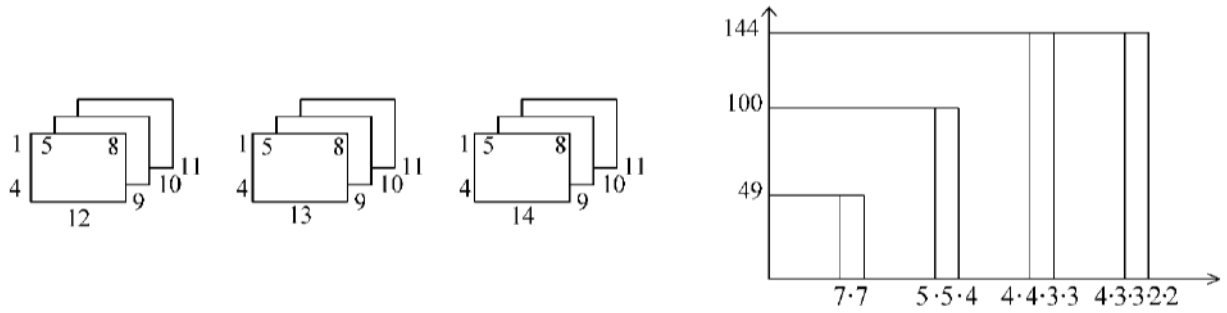



Рисунок 1 – Матрица размерностью 4433 (*а*); количество элементов матриц разной размерности (*б*)

Таким образом, использование многомерных матриц позволяет, не ухудшая кодового расстояния между командами, увеличить количество реализуемых ответственных команд на станции.

**Список литературы**

1 **ГОСТ 33896-2016.** Системы диспетчерской централизации и диспетчерского контроля движения поездов. Требования безопасности и методы контроля. – Введ. 01.11.2017. – М. : Стандартинформ, 2017. – 15 с.

2 **СТО РЖД 1.19.003-2010.** Автоматизированные системы диспетчерского управления движением поездов. – Введ. 01.06.2010. – М. : РЖД, 2010. – 48 с.

3 Система диспетчерского контроля и управления движением поездов «ДЦ-ЮГ с РКП» : монография / И. Д. Долгий, А. Г. Кулькин, Ю. Э. Пономарев [и др.] ; под общ. ред. проф. И. Д. Долгого и канд. техн. наук А. Г. Кулькина. – Ростов н/Д : РГУПС, 2010. – 468 с.

УДК 621.38

# МОДИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНЫХ ПО РАСХОДУ ТОПЛИВА РЕЖИМОВ ВЕДЕНИЯ ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ В САВ

*А. П. КЕЙЗЕР, Т. А. ГОЛДОБИНА, А. Е. КОЗЛОВСКИЙ, С. Н. ДОЛГОМЫСЛОВА*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Система автоведения поездов (САВ) – это будущее железнодорожного транспорта. САВ охватывает три основных подразделения транспортного конвейера:

1) локомотив (рассматривается тепловоз);
2) система автоматики;
3) система связи.

В предлагаемой САВ [1] предусмотрена обратная связь. Если поезд прибыл в контрольную точку чуть раньше или позже заданного времени хода, дальше он должен двигаться по другой оптимальной кривой скорости.

В Московском государственном университете путей сообщения (МГУПС, МИИТ) системами автоведения (метрополитен, электропоезда) занималась и занимается кафедра автоматики. Большой научный вклад в САВ внесли доктора технических наук Е. В. Ерофеев, Л. А. Баранов, Я. М. Головичер.

В БелИИЖТе (ныне БелГУТе) системами автоведения грузовых поездов (тепловозная тяга) под руководством кандидата технических наук А. М. Костромина занимался авторский коллектив в составе А. П. Кейзера, С. Я. Френкеля, С. И. Сухопарова, которые впоследствии стали кандидатами технических наук. Впервые САВ (тепловоз ТЭЗ) в конце семидесятых годов прошлого столетия была апробирована на участках Гомельского отделения Белорусской железной дороги.

Под руководством старшего инженера А. П. Кейзера была написана и отлажена программа расчета оптимальных (по расходу топлива) режимов ведения поездов $NKO_j$ на языке Автокод «Инженер» (АКИ) для ЭВМ Минск-22.

С помощью математического метода принцип максимума Понтрягина (ПМП) с одной ψ-функцией в [1] доказано, что ПМП ($\psi = const$) целесообразно применять на участках большой протяженностью.

Программа состоит из следующих частей:

1 Разгон поезда. Режимы ведения поезда при разгоне $NKR_k$ и временные выдержки $\Delta tR_k$ не оптимизируются, а выбираются из матрицы экспериментальных рецептов, содержащих NK, Δt для различных масс поезда Q. Процесс разгона заканчивается, когда хвостовой вагон поезда проезжает выходную стрелку станции.

2 Оптимальное ведение. Начинается небольшой участок оптимального ведения поезда до пробы тормозов.

3 Торможение. После пробы тормозов компьютер для каждого шага варьирования $\Delta SB_j$ рассчитывает оптимальные рецепты ведения поезда $NKO_j$, $\Delta tO_j$ до тех пор, пока на определенном шаге варьирования $\Delta SB_M$ не произойдёт пересечение оптимальной кривой скорости $VOPT_M$ с кривой торможения VT. Кривая торможение VT строится в обращенном времени от конечной скорости VT = 0 по шагам интегрирования $\Delta SU_L$.

Модификация математического аппарата и программного обеспечения тяговых оптимизационных расчетов.

1 В своей монографии [2] и докторской диссертации А. М. Костромин предлагает тяговые Fk (NK, Re, V) и расходные Gm (NK, Re, V) характеристики описывать полиномом пятой степени. В [1] и последующих публикациях доказано, что тяговые и расходные характеристики тепловоза достаточно описывать тремя уравнениями регрессии:

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2; \quad (1)$$

$$y = a_0 x^{a_1}; \quad (2)$$

$$y = a_0 x^{a_1} e^{a_2 x} \quad (3)$$

основного критерием качества процесса сглаживания KF.

Результаты аппроксимации показали, что даже для уравнения регрессии (2) получается великолепная корреляционная зависимость. Расчетный критерий Фишера получается больше 100, а в некоторых случаях – больше 1000, что значительно превышает KF_ТАБЛ (табличное значения критерия Фишера).

2 При расчете $NKO_j$ в большинстве случаев усредняют тяговые и расходные характеристики тепловоза. Для каждой позиции контроллера NK три кривых (Re = 0 – режим полного поля ПП, Re = 1 – режим ОП1, Re = 2 – режим ослабления поля ОП2 тяговых электродвигателей) аппроксимируют одной математической формулой, что значительно увеличивает средний процент погрешности сглаживания %_СРЕДЛН и уменьшает критерий Фишера.

В докладе приводится алгоритм определения режима ослабления поля Re ТЭД (тяговых электродвигателей) как в начале, так и конце каждого шага варьирования $\Delta SB_j$ при построении оптимальной кривой скорости [1].

3 Предлагается методика математического построения кривой торможения от конца V = 0 (V = 0,1) по шагам интегрирования $\Delta SU_k$ и оригинальный вариант слияния кривых VOPT и VT с использованием двух парабол. Парабола 1 VOPT и парабола 2 VT строятся по трем точкам.

4 Проанализированы численные методы решения системы дифференциальных уравнений движения поезда при расчете VOPT и VT:

1) метод Эйлера;

2) метод линейной аппроксимации производной;

3) метод Рунге Кутта.

Показана эффективность разработанного в БелИИЖТе метода линейной аппроксимации производной [2].

5 Разработана оригинальная методика и эффективный математический аппарат подбора параметра ψ (принцип максимума Понтрягина), чтобы за 3–4 итерации расчетное время хода TR совпало с заданным TZAD.

Для того чтобы апробировать предлагаемую систему автоведения в современных условиях (математические аппарат и программное обеспечение на языке Pascal), необходимо:

1) выбрать участок большой протяженности. При апробации предлагаемой САВ процессы разгона и торможения не оптимизируются;

2) наладить новое сотрудничество с Коломенским тепловозостроительным заводом, получив реальные тяговые и расходные характеристики распространенных на Белорусской железной дороге тепловозов 2ТЭ10М, 2ТЭ10У. При апробации САВ под руководством А. М. Костромина существовало тесное сотрудничество Коломенского тепловозостроительного завода и кафедры «Тепловозы и тепловозное хозяйство» БелИИЖТа.

**Список литературы**

1 **Кейзер, А. П.** Совершенствование режимов вождения поездов и повышение эксплуатационной надежности графика движения (в условиях тепловозной тяги) : дис. … канд. техн. наук : 05.22.08 / А. П. Кейзер. – Гомель : БелГУТ, 1995. – 227 с.

2 **Костромин, А. М.** Оптимизация управления локомотивом / А. М. Костромин. – М. : Транспорт, 1977. – 119 с.

3 **Ерофеев, Е. В.** Исследование оптимальных программ автоматического ведения поезда при вариациях исходных параметров : автореф. дис. … канд. техн. наук / Е. В. Ерофеев. – М. : МИИТ, 1969. – 24 с.

УДК 625.8

# ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА «INNOTECH NETWORK MONITOR» НА ОБЪЕКТАХ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

*Е. Н. КИЛЬЧЕНКО*
*ООО «ИнноТех Солюшнс», г. Минск, Республика Беларусь*

*Ф. Е. САТЫРЕВ, А. А. ПОДДУБНЫЙ, П. А. ПОДДУБНЫЙ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В современном мире для удобства, экономии времени и финансовых средств в транспортные системы внедряются цифровые системы автоматики, телемеханики и связи. А что делать, если цифровое оборудование подвергнется взлому?

Массированные кибератаки становятся настоящим бичом XXI века, глобальным вызовом цивилизации, несущим отнюдь не виртуальные – вполне реальные риски. Вредоносные вмешательства в транспортные информационные системы замедляют транспортные потоки и останавливают работу электронных сервисов и услуг.

В связи с этим, 14 февраля 2023 года Президентом подписан Указ № 40 «О кибербезопасности», направленный на защиту информационных технологий и обеспечение защиты интересов государства [1].

Современные объекты транспортной информационной инфраструктуры состоят из различных информационно-коммуникационных технологий: это и платежные системы, и приложения, ответственные за автоматический сбор средств и управление финансовыми потоками, и централизованные системы контроля дорожного трафика, и системы связи и коммуникации, включающие системы передачи данных между транспортными средствами, между транспортными средствами и информационной инфраструктурой, между элементами инфраструктуры, а также сайтов, приложений и социальных сетей для размещения важной информации и объявлений.

Сетевые атаки представляют собой наибольшую угрозу для информационной инфраструктуры транспортных систем. Эти атаки направлены на дестабилизацию работы устройств и оборудования, утечку данных и кражу ценной информации. Киберпреступники часто используют вредоносное программное обеспечение, которое может полностью парализовать функционирование целых секторов инфраструктуры или предоставить им доступ к незащищенным элементам сети. Такие атаки могут привести к значительным потерям ресурсов, доходов и даже собственности. Вредоносное программное обеспечение (ПО), проникшее в систему, может нарушить работу критически важных компонентов, что приведет к серьезным последствиям, которые могут повлечь за собой причинение ущерба здоровью человека.

Беспроводные системы взаимодействия между транспортными средствами, между транспортными средствами и информационной инфраструктурой, между элементами инфраструктуры становятся ключевыми компонентами, обеспечивая обмен данными между элементами инфраструктуры в реальном времени. Однако их взлом вполне возможен, как неоднократно подтверждалось на практике.

Уязвимости в прошивках транспортных средств и их системах, а также использование сетей с открытым трафиком могут позволить злоумышленникам перехватывать управление. Слабые пароли, незащищенные сайты и уязвимости в приложениях предоставляют хакерам возможность получить доступ к учетным данным пользователей и, например, зашифровать сервера, базы данных и рабочие станции с целью замедлить и нарушить работу предприятия.

Для решения задач по выявлению действий нарушителей в сетевой инфраструктуре, сетевом и серверном оборудовании в основном используются средства защиты иностранной разработки. При всей их эффективности они не исключают ситуации, когда программные средства защиты могут содержать программные закладки. Анализ вероятных последствий применения программных закладок показывает, что в случае систем управления речь может идти о блокировании возможности применения системы защиты. В других случаях – о блокировании передачи, утечке или модифика-

ции (вплоть до уничтожения) информации в информационно-телекоммуникационных системах, утечке или модификации (уничтожении) информации. Фактически это означает, что транспортная отрасль может оказаться беззащитной к кибератакам и будет поставлена на грань катастрофы.

Учитывая тенденцию постоянного роста количества киберугроз, способных нарушить работу IT инфраструктуры и информационных систем предприятий, и дефицит высококвалифицированных специалистов, ООО «ИнноТех Солюшнс» разработан многофункциональный Программно-аппаратный комплекс «Innotech Network Monitor» (далее – ПАК).

В настоящее время ПАК «Innotech Network Monitor» сертифицирован Оперативно-аналитическим центром при Президенте Республики Беларусь на соответствие требованиям технического регламента ТР 2013/027/BY (регистрационный номер сертификата соответствия BY/112 02.02. ТР027 036.01 01834 от 12.02.2025) и может быть применим на различных объектах (предприятиях и организациях) как устройство для защиты информации [2].

ПАК включает в свой состав следующие модули:

1 Модуль «Сетевая активность» анализирует копию сетевого трафика (зеркалирование), что позволяет осуществлять сбор и анализ состояния информационного взаимодействия хостов (узлов) контролируемой сетевой инфраструктуры на предмет выявления аномалий и индикаторов компрометации (IoC).

2 Модуль «Монитор сети» обеспечивает функцию по периодическому сканированию контролируемой сетевой инфраструктуры с целью обнаружения новых устройств, открытых портов, используемых сетевых сервисов и их версий.

3 Модуль «Сканер уязвимостей» выполняет функции сканирования назначенных узлов контролируемой сетевой инфраструктуры с целью обнаружения потенциальных уязвимостей и мисконфигураций в установленных на узлах ОС, базах данных и других программных компонентах.

4 Модуль «Безопасность Wi-Fi» осуществляет функции мониторинга беспроводной сети Wi-Fi на предмет наличия аномалий, индикаторов компрометации, выявление атак на Wi-Fi.

5 Модуль «Целостность инфраструктуры» выполняет функции контроля целостности назначенных файловых ресурсов выбранных узлов контролируемой сетевой инфраструктуры.

6 Модуль «Эмулятор уязвимости» реализует функции преднамеренно сконфигурированного уязвимого сетевого узла (honeypot) для привлечения потенциальных нарушителей с высоким потенциалом атаки с целью затруднения продвижения нарушителя в контролируемой сетевой инфраструктуре и сбора информации об используемых инструментах и тактиках нарушителей.

ПАК поставляется с преднастроенным системным и прикладным программным обеспечением, что позволяет максимально сократить период внедрения ПАК в информационную инфраструктуру предприятия, обеспечить своевременное выявление и классификацию аномалий в контролируемых системах и сократить время реагирования на них со стороны профильных специалистов (рисунок 1).

Рисунок 1 – Общий вид ПАК

В настоящее время, несмотря на все страхи и недоверие, отечественные ИБ-решения получают хорошую репутацию среди потребителя и экспертов. Это связано с высоким уровнем технической экспертизы и контроля качества продукции, а также с усилиями регулятора по ужесточению процедур сертификации и вводу ограничений на использование зарубежных средств защиты.

Конечно, нельзя не сказать и о факторе санкционных ограничений извне, без которого мы могли бы и не увидеть столь стремительного развития. Разумеется, еще остается много векторов для развития и адаптации, ведь киберугрозы также не стоят на месте. Однако в целом отечественные ИБ-решения уже сегодня являются надежным и качественным выбором для киберзащиты любой современной организации.

**Список литературы**

1 О кибербезопасности : Указ Президента Респ. Беларусь, 14 февр. 2023 г., № 40 // Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2023.

2 Сертификат соответствия Комплекс программно-аппаратный «Innotech Network Monitor». Зарегистрирован в реестре № BY/112 02.02. ТР027 036.01 01834. – Дата регистрации 12.02.2025 г.

УДК 621.31

# МОДЕРНИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

*А. Ю. КОВАЛЬЧУК*
*Белорусская железная дорога, г. Минск*

*К. АДИБ МЕНЬКОВА*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Информационная инфраструктура современной крупной или средней организации включает в свой состав сети передачи данных, серверное оборудование, системы виртуализации, разнообразное системное и прикладное и программное обеспечение, средства защиты информации, рабочие места пользователей и другие взаимодействующие друг с другом компоненты.

Современные реалии, процессы всеобщей информатизации и цифровизации неразрывно связаны с рисками нарушения информационной безопасности и возникновения киберинцидентов разных масштабов и разной степени тяжести.

Основным инструментом минимизации количества негативных цифровых воздействий на информационные системы, подключенные к открытым каналам передачи данных и обрабатывающие информацию, распространение и (или) предоставление которой ограничено, являются создание систем защиты информации с последующим прохождением, в случае необходимости, аттестации на соответствие установленным требованиям.

Наиболее ресурсозатратными и требующими специфических высокооплачиваемых компетенций мероприятиями, которые необходимо реализовать при создании систем защиты информации являются сегментация сети передачи данных и виртуальной среды, внедрение специализированных средств защиты информации (межсетевые экраны, системы обнаружения и предотвращения вторжений, антивирусное программное обеспечение и т. п.), обеспечение сбора и хранения журналов событий информационной безопасности (логов) всех элементов информационной системы и выстраивание процессов реагирования на события информационной безопасности, построение систем мониторинга и т. п.

Накопленный Белорусской железной дорогой опыт построения систем защиты информации информационных систем созданных (создаваемых) для автоматизации технологических и бизнес-процессов показывает, что принципы и подходы, заложенные в основу созданной более 10 лет назад информационной инфраструктуры, являются серьезным препятствием в реализации действенных мер по обеспечению кибербезопасности. На практике для создания эффективной (соответствующей требованиям регулятора) системы защиты информации приходится реализовывать масштабные и дорогостоящие мероприятия по изменению параметров, а в части случаев и архитектуры информационной инфраструктуры, которые в том числе включают в себя ее дооснащение или замену отдельных ее элементов.

Для экономии финансовых, трудовых и временных ресурсов на этапах создания систем защиты информации информационных систем целесообразно проработать возможность внедрения следующих подходов на этапах создания, модернизации и развития информационной инфраструктуры в составе которой будут функционировать информационные системы, подключенные к открытым каналам передачи данных и обрабатывающие информацию, распространение и (или) предоставление которой ограничено.

Меры, которые изолируют сегменты сети и сервисы, предотвращая горизонтальные перемещения злоумышленника и снижая риски кибератак. Разделение на пользовательские и технологические контуры дополнительно защищает критичные системы, минимизируя поверхность атак:

– физическая сегментация с использованием средств межсетевого экранирования между физическими сегментами (разделение сети на контуры) и внешними сетями;

– логическая сегментация (разделение сети на сервисы);

– разделение информационной инфраструктуры на пользовательские и технологические сегменты, минимизация количества внешних взаимодействий с технологическими сегментами.

Нижеперечисленные меры позволяют создать многоуровневую защиту, блокируя любые несанкционированные соединения между сегментами сети. Это предотвращает распространение атак даже в случае компрометации одного из элементов инфраструктуры, изолируя угрозу и минимизируя ущерб:

– использование принципа «запрещено всё, что не разрешено» при организации сетевых взаимодействий между контурами и сегментами сети;

– регламентация порядка использования IP-адресации с учетом исключения возможности взаимодействия между контурами и сегментами по умолчанию даже в случае их умышленного или неумышленного физического соединения;

– минимизация случаев прямого взаимодействия между рабочими станциями находящимся в разных сегментах посредством использования шлюзов в виде прокси-серверов, почтовых серверов, терминальных серверов и т. п.

Меры, которые создают автономный контур безопасности, который обеспечивает контроль над критичными сервисами, непрерывный мониторинг и восстановление системы даже в случае масштабной кибератаки:

– разделение распределенной системы доменных имен на внутренний и внешний контуры;

– обеспечение функционирования систем мониторинга средств вычислительной техники (включая серверы, системы хранения данных и т. п.), телекоммуникационного оборудования, системного программного обеспечения (включая программное обеспечения систем виртуализации и систем бэкпапирования) и средств защиты информации;

– создание автономных инструментов для хранения резервных копий наиболее критичных элементов информационной инфраструктуры с использованием принципа «воздушной прослойки» (физическая изоляция от других устройств и сетей).

Данный комплекс мер минимизирует зависимость от внешних поставщиков и снижает риск утечек, обеспечивая при этом многоуровневый контроль над всеми потенциально уязвимыми точками:

– минимизация использования проприетарных решений;

– минимизация участия в технологических и бизнес-процессах сторонних организаций, организация их опосредованного участия в случае необходимости;

– использование систем обнаружения и предотвращения вторжений;

– обеспечение контроля за внешними подключениями;

– обеспечение контроля за привилегированными пользователями;

– использование систем обеспечения обнаружения и предотвращения утечек информации;

– использование централизованной системы сбора информации и управления агентами защиты от воздействия вредоносных программ;

– использование систем автоматизированного анализа основных потоков информации;

– использование централизованной системы сбора, корреляции и хранения сведений о событиях информационной безопасности;

– обеспечение наличия и поддержания в актуальном состоянии структурных и логических схем объектов информационной инфраструктуры и другой документации.

На рисунке 1 представлена схема модернизации информационной безопасности на Белорусской железной дороге. Данная схема представляет собой сеть на основе межсетевых экранов, обеспечивающих защиту сети железной дороги от несанкционированного доступа из сети интернет. Сплошной линией отмечены уже существующие контуры и устройства, а пунктиром – запланированные. Планируется организация кластера межсетевых экранов для защиты от угроз из сетей сопредельных стран.

Использование перечисленных подходов позволит существенно повысить уровень кибербезопасности информационной инфраструктуры организации и, как следствие, избежать финансовых и репутационных потерь за счет сокращения количества и (или) уменьшения масштабов негативных цифровых воздействий (кибератак). Перечисленные выше подходы нашли практическое применение в реализуемом в настоящее время проекте по приведению одного из вычислительных комплек-

сов Белорусской железной дороги в соответствие с требованиями законодательства в сфере информационной безопасности.

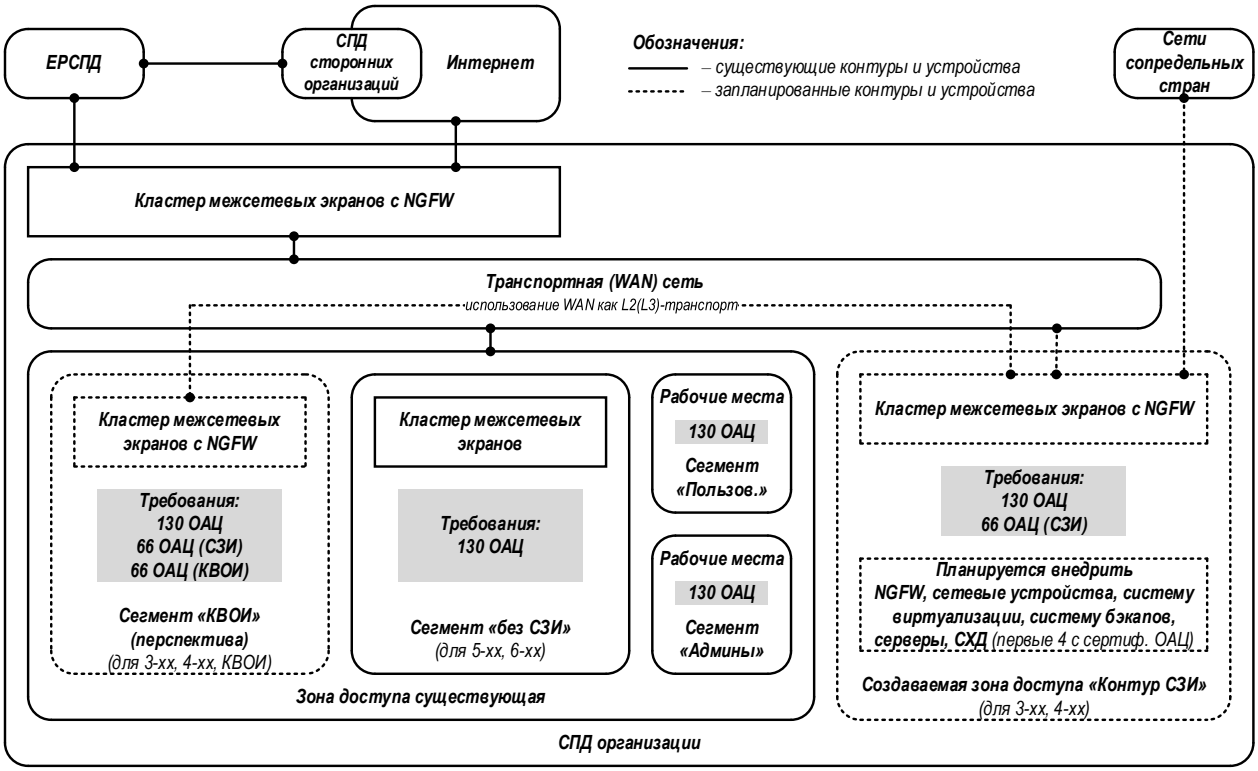



Рисунок 1

УДК 621.391.825

## МОДЕЛЬ АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СЖАТ К ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИМПУЛЬСАМ ПРЕДНАМЕРЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

*Д. В. КОМНАТНЫЙ*

*Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Республика Беларусь*

На современном этапе развития научного направления «электромагнитная совместимость» внимание специалистов привлечено к проблеме защиты критически важных объектов от электромагнитных импульсов преднамеренного воздействия (ЭИПВ). Эта проблема начала обсуждаться в первые годы XXI века и с того времени приобретает все большую актуальность по причине обострения международной обстановки, возросшей террористической активности, появления доступных злоумышленникам низкого и среднего технического уровня малогабаритных генераторов ЭИПВ.

Современные микропроцессорные и компьютерные системы железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ), призванные обеспечивать безопасность движения поездов, также требуют защиты от ЭИПВ. Подтверждением этому является реализация в Евросоюзе проекта SECRET (**SE**-**C**urity of **R**ailways against **E**lectromagnetic a**T**tacks). Но в ограниченно опубликованных результатах работы по проекту описаны только исследования воздействия ЭИПВ на штатные антенны радиоэлектронных СЖАТ. Кроме этого пути, воздействие ЭИПВ может осуществляться непосредственно на аппаратуру СЖАТ внутри технических зданий по свободному пространству, по цепям питания и по интерфейсным линиям. Анализ нормативно-технической документации по проблеме защиты от ЭИПВ позволяет заключить, что воздействие по свободному пространству более доступно для злоумышленников низкого и среднего технического уровня. Генераторы ЭИПВ этого типа могут быть

скрытно доставлены к поражаемому объекту на малое расстояние. Их воздействие может привести к сбоям и отказам, нарушающим условия безопасности движения поездов. Поэтому необходимы модели анализа и прогнозирования устойчивости СЖАТ к ЭИПВ при воздействии по свободному пространству.

В докладе рассматривается такая модель, использование которой обеспечивает сокращение сроков расчетного анализа и натурных испытаний, исключение использования дорогостоящего испытательного оборудования и применения разрушающих воздействий.

Модель основана на сопоставлении импульса электростатического разряда (ЭСР) и импульса преднамеренного воздействия. Возможность сопоставления обосновывается тем, что оба импульса имеют совпадающую полосу частот спектра и сходные пути проникновения в аппаратуру через неоднородности корпуса. Базовые положения модели предложены автором в 2012 г, а в 2020 году о возможности такого сопоставления упоминается в нормативной документации о защите от ЭИПВ, разработанной в Евросоюзе.

Исходными данными модели являются параметры импульса ЭСР, устойчивость к которому установлена путем расчетных оценок и натурных испытаний по известной методике.

Принимается, что при воздействии части фронта электромагнитной волны ЭИПВ на паразитную антенну она излучает внутрь корпуса аппаратуры СЖАТ импульс напряженности электромагнитного поля той же формы и длительности, которые имеет импульс, поступивший от генератора. Излучаемому импульсу соответствует импульс напряжения в антенне. Аналогичный импульс напряжения создается при прямом ЭСР от генератора на паразитную антенну.

Тогда первый шаг моделирования – сопоставление импульса напряжения от воздействия ЭИПВ известной формы и импульса ЭСР по спектрально-энергетическому условию эквивалентности импульсов. Находится амплитуда и временные параметры импульса напряжения, эквивалентного ЭСР по энергии, активной полосе частот, следовательно, по последствиям воздействия.

Второй шаг – анализ воздействия, принимаемого ЭИПВ на неоднородности корпуса аппаратуры: отверстия, щели, соединения. Эти неоднородности являются паразитными антеннами, которые под действием импульсных помех возбуждают помеховое электромагнитное поле внутри корпуса.

Для апертурной антенны (в виде круглого или прямоугольного отверстия) путем анализа передачи энергии через антенну показано, что амплитуда импульса напряжения и амплитуда принимаемого ЭИПВ связаны коэффициентом использования антенны и ее характерным размером. При этом учитывается соотношение, связывающее напряжения электрической составляющей излучаемой внутрь электромагнитной волны и напряжение в раскрыве антенны. Для щелевой антенны (с длиной много большей ширины и шириной до миллиметра), а также для штыревой антенны в виде винтового соединения амплитуды импульса напряжения и напряженности электрического поля принимаемого импульса связаны эффективной длиной антенны.

Тогда имеется возможность на втором этапе моделирования найти амплитуду напряженности электрической составляющей электромагнитной волны принимаемого ЭИПВ по амплитуде эквивалентного импульсу ЭСР импульса напряжения, который возникает в паразитной антенне при переизлучении ЭИПВ.

Амплитуда напряженности электрической составляющей поля принимаемого ЭИПВ, расстояние от генератора ЭИПВ до рецептора помехи и параметры генератора ЭИПВ связаны уравнением – аналогом уравнения силового подавления радиоэлектронных средств. Допустимо задавать различные параметры генератора, в частности FOM, напряженность на антенне и др., так как эти параметры связаны известными соотношениями теории антенн.

Тогда на третьем этапе моделирования могут быть решены две основные задачи защиты микроэлектронных СЖАТ от ЭИПВ:

1) найти параметры генератора, который, будучи размещен на известном расстоянии от аппаратуры СЖАТ, создаст опасное для нее излучение;

2) найти расстояние от аппаратуры СЖАТ до генератора ЭИПВ с известными параметрами, на котором воздействие генератора представляет опасность, следовательно, установить радиус защиты.

По результатам анализа разрабатывается план защитных мероприятий: организация радиуса защиты, изменение размещения оборудования в помещениях, дополнительное экранирование оборудования, повышение электромагнитной защиты здания.

При разработке новых СЖАТ описанная модель дает возможность прогноза устойчивости аппаратуры СЖАТ к ЭИПВ, оценки достигнутого уровня защиты. Также возможно выработать требования к размещению оборудования, к конструкции технологических зданий и к организации радиуса защиты.

По результатам доклада можно сделать вывод, что представленная математическая модель анализа и прогнозирования устойчивости СЖАТ к ЭИПВ позволяет решить актуальную проблему защиты микропроцессорных и компьютерных СЖАТ от ЭИПВ. Эта проблема обостряется с введением многоуровневых компьютерных СЖАТ управления движением поездов на высокоскоростных магистралях, которые проектируются в Союзном государстве Беларуси и России. Причем сложность проблемы увеличивается в связи с необходимостью обеспечения требований импортозамещения и независимости железных дорог Союзного государства от внешних производителей из стран, проводящих недружественную политику.

К достоинствам модели можно отнести использование хорошо отработанных процедур испытаний СЖАТ на устойчивость к ЭСР, при которых применяется доступное оборудование. При этом не требуются экранированные камеры или открытые тест-площадки. Организация последних затруднена в городской и пригородной застройке. Так как модель реализует сопоставление ЭСР и ЭИПВ аналитическими методами, то она обладает новизной и может найти применение в практике работы организаций, разрабатывающих и эксплуатирующих СЖАТ.

УДК 656.25

## РАСЧЕТ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ ЭЛЕКТРОННЫХ УЗЛОВ ОПЕРАТОРНЫМ МЕТОДОМ

*Д. В. КОМНАТНЫЙ*

*Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Республика Беларусь*

Одной из задач, возникающих при анализе электромагнитной совместимости (ЭМС) микроэлектронной аппаратуры систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ), является расчет распространения коротких помеховых импульсов в линиях передачи сигналов узлов этой аппаратуры.

В настоящее время электронные узлы изготавливаются в виде печатных плат. Линии передачи сигналов таких узлов моделируются цепями с распределенными параметрами, омические потери в которых отсутствуют. Нагрузка на приемном конце линии может быть представлена в виде последовательной, параллельной или смешанной цепи из омических сопротивлений и емкостей (*RC*-цепь).

Для анализа распространения импульсных помех в линии передачи сигнала требуется решить уравнение Даламбера относительно напряжения. Начальные условия принимаются нулевыми. В начало линии подается импульс напряжения. Конец линии нагружен на *RC*-цепь. Для решения задачи математической физики в замкнутом виде целесообразно применить операторный метод. Однако такая постановка задачи о расчете переходных процессов в идеальной длинной линии не представлена в монографиях по расчету переходных процессов.

Поэтому необходимо рассмотреть решение задачи о расчете переходных процессов в идеальной длинной линии операторным методом, если постановка задачи приближена к практике анализа ЭМС узлов электронной аппаратуры.

Для определенности принимается, что в линию поступает экспоненциальный импульс, который имеет изображение по Лапласу

$$U_{\text{вх}}(p) = \frac{U}{p + \alpha}, \tag{1}$$

где $U$ – амплитуда импульса, В; $\alpha$ – параметр затухания импульса, 1/с.

Линия нагружена на цепь в виде параллельного соединения резистора с сопротивлением $R$ и конденсатора с емкостью $C$. Операторное сопротивление нагрузки

$$Z(p)=\frac{R\dfrac{1}{Cp}}{R+\dfrac{1}{Cp}}=\frac{R}{RCp+1}. \qquad (2)$$

На основании известного решения для изображения по Лапласу напряжения в идеальной длинной линии имеем

$$U(p)=\frac{U\left[(RCp+1)\mathrm{sh}\left(p\sqrt{L_0C_0}(l-x)\right)+\dfrac{R}{\rho}\mathrm{ch}\left(p\sqrt{L_0C_0}(l-x)\right)\right]}{(p+\alpha)\left[(RCp+1)\mathrm{sh}\left(pl\sqrt{L_0C_0}\right)+\dfrac{R}{\rho}\mathrm{ch}\left(pl\sqrt{L_0C_0}\right)\right]}, \qquad (3)$$

где $L_0$ – погонная индуктивность линии, Гн/м; $C_0$ – погонная емкость линии, Ф/м; $l$ – длина линии, м; $x$ – координата точки на линии, м; $\rho=\sqrt{\dfrac{L_0}{C_0}}$ – волновое сопротивление линии, Ом.

В задачах ЭМС, как правило, представляет интерес электрические процессы в нагрузке при $x = l$. Тогда из (3) следует

$$U(p)=\frac{U\dfrac{R}{\rho}}{(p+\alpha)\left[(RCp+1)\mathrm{sh}\left(pl\sqrt{L_0C_0}\right)+\dfrac{R}{\rho}\mathrm{ch}\left(pl\sqrt{L_0C_0}\right)\right]}=U\frac{G(p)}{H(p)}. \qquad (4)$$

Для получения оригинала операторного выражения (4) используется теорема Хэвисайда.

Характеристическое уравнение $H(p) = 0$ имеет один корень $p = -\alpha$ и множество корней вида $p_k=-\sigma_k\pm j\omega_k$, где $k=0,\pm1,\pm2\ldots$, которые обращают в нуль выражение в квадратных скобках из (4)

$$(RCp_k+1)\mathrm{sh}\left(p_kl\sqrt{L_0C_0}\right)+\frac{R}{\rho}\mathrm{ch}\left(p_kl\sqrt{L_0C_0}\right)=0. \qquad (5)$$

Корни $p_k$ должны быть комплексными, так как переходные процессы должны затухать, а затухание определяется действительной частью комплексного корня. Уравнение (5) является трансцендентным. В настоящее время его корни могут быть найдены методами компьютерной математики. В частности, предложен итерационный метод отыскания корней. Полученные таким образом решения (5) справедливы как для слабого, так и для значительного затухания переходных процессов. Однако практически возможно получить ограниченное число корней с погрешностью, вносимой используемым численным методом.

Для корня $p = -\alpha$ оригинал (4) имеет вид

$$u_{\text{Л}}(t)=\frac{U\dfrac{R}{\rho}e^{-\alpha t}}{(1-RC\alpha)\mathrm{sh}\left(-\alpha l\sqrt{L_0C_0}\right)+\dfrac{R}{\rho}\mathrm{ch}\left(-\alpha l\sqrt{L_0C_0}\right)}. \qquad (6)$$

Для корня вида $p_k=-\sigma_k\pm j\omega_k$ оригинал (4) имеет вид

$$u_k(t)=2\,\mathrm{Re}\frac{G(p_k)}{H'(p_k)}e^{pk^t}=2A_ke^{-\sigma_{k^t})}\cos(\omega_kt+\upsilon_k) \qquad (7)$$

с учетом представления $\dfrac{G(p_k)}{H'(p_k)}=A_ke^{j\upsilon_k}$.

Указанное представление в виде замкнутой общей формулы имеет крайне громоздкую и неудобную на практике форму. Поэтому следует вести расчет путем подстановки численного значения соответствующего корня $p_k$ в (7).

Результирующее напряжение в конце линии представляется в виде ряда Фурье с затухающими членами

$$u(t) = u_{Л}(t) + \sum_{k=1}^{N} u_k(t), \tag{8}$$

где $N$ – число корней.

Это соответствует физическому смыслу задачи: переходные процессы в линии должны затухать как по причине потерь в нагрузке, так и по причине затухания импульса входного напряжения.

Тогда допустимо сделать вывод по докладу, что операторный метод позволяет осуществить расчет помеховых импульсных напряжений в нагрузках линий передачи сигналов электронных узлов. Основную погрешность в расчет вносит численный метод определения корней характеристического уравнения. Как показывает практика, это ограничение не является определяющим. Поэтому рассмотренный метод может использоваться при предиктивном проектировании аппаратуры современных СЖАТ.

УДК 656.25

## РАСЧЕТ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ В АКТИВНО-ЕМКОСТНЫХ ЦЕПЯХ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

*Д. В. КОМНАТНЫЙ*

*Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Республика Беларусь*

В различных областях цифровой электронной техники наличествуют объекты, расчетные модели которых представляют собой линейные цепи с распределенными *RC*-параметрами. Первой группой таких объектов являются микросхемы, структуры которых образованы чередующимися слоями проводящих и диэлектрических материалов. Второй – кабели цифровых систем передачи информации. Для анализа передачи цифровых сигналов, особенно для оценки искажения передачи импульсов по кабелю, находят широкое применение импульсные характеристики и глаз-диаграммы. Расчет этих характеристик осуществляется по математической модели кабеля как цепи с распределенными *RC*-параметрами.

Широкое распространение микропроцессорных систем автоматики и цифровых систем оперативно-технологической связи на железнодорожном транспорте делает востребованным анализ функционирования указанных выше объектов техники для разработчиков систем автоматики, телемеханики и связи железных дорог. Это объясняется тем, что в микроэлектронных и микропроцессорных системах автоматики и телемеханики должна применяться высококачественная элементная база, разработанная на высоком техническом уровне. От работы оперативно-технологической связи во многом зависит бесперебойное осуществление перевозочного процесса. Следовательно, представляют практический и теоретический интерес методы анализа передачи импульсных сигналов в *RC*-цепях с распределенными параметрами.

В связи с этим, в докладе рассматривается метод анализа распространения импульсных сигналов в линейной цепи с распределенными *RC*-параметрами, отличающийся выбором тестового сигнала. Удачный выбор этого сигнала позволяет рассчитать электромагнитные процессы при распространении реального сигнала с высокой точностью и, вместе с тем, получить расчетные соотношения в замкнутой форме. По таким соотношениям расчеты реальных устройств осуществляются со сравнительно меньшими затратами времени.

В докладе рассматривается цепь с распределенными параметрами: погонным омическим сопротивлением $R$ и погонной емкостью $C$. На ее входе подключен источник ЭДС с внутренним омическим сопротивлением $R_0$, на выходе подключена нагрузка с омическим сопротивлением $R_l$. Операторное волновое сопротивление такой цепи $Z(p) = \sqrt{\frac{R}{pC}} = \frac{1}{\sqrt{p}}\sqrt{\frac{R}{C}} = \frac{K}{\sqrt{p}}$, операторный коэффициент распространения – $\gamma = RC\sqrt{p}$ .

Для анализа работы указанных выше объектов техники достаточен расчет напряжения на нагрузке цепи, для чего применяется коэффициент передачи. На основании известного выражения

коэффициента передачи цепи с распределенными параметрами и активными нагрузками коэффициент передачи для *RC*-цепи имеет вид

$$K(p)=\frac{R_0^2 K\sqrt{p}}{(\sqrt{p}R_0+K)(\sqrt{p}R_l+K)}e^{-lRC\sqrt{p}}, \qquad (1)$$

где $l$ – длина линии, м.

В качестве тестового импульса в литературных источниках предлагается использовать аппроксимацию прямоугольного импульса и импульса с искаженным фронтом в виде разности дополнительных интегралов вероятности

$$u(t)=U_{\text{вх}}\left[\operatorname{erfc}\frac{\delta}{2\sqrt{t}}-\operatorname{erfc}\frac{\delta}{2\sqrt{t-t_{\text{и}}}}\right], \qquad (2)$$

где $U_{\text{вх}}$ – амплитуда импульса, В; $t$ – время, с; δ – параметр искажения фронта импульса, с; $t_{\text{и}}$ – длительность импульса, с. Также $\operatorname{erfc}(t)=1-\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^t e^{-y^2}dy$.

Тогда изображение по Лапласу выражения (2) по теореме запаздывания операционного исчисления имеет вид

$$U(p)=U_{\text{вх}}\left[\frac{1}{p}e^{-\delta\sqrt{p}}-\frac{1}{p}e^{-\delta\sqrt{p}}e^{-pt_{\text{и}}}\right]. \qquad (3)$$

Изображение напряжения на нагрузке получается, как произведение выражений (1) и (3). Тогда для получения оригинала напряжения на нагрузке требуется найти оригиналы следующих операторных выражений

$$\frac{R_0^2 K\sqrt{p}}{(\sqrt{p}R_0+K)(\sqrt{p}R_l+K)}e^{-lRC\sqrt{p}}\frac{1}{p}e^{-\delta\sqrt{p}}; \qquad (4)$$

$$\frac{R_0^2 K\sqrt{p}}{(\sqrt{p}R_0+K)(\sqrt{p}R_l+K)}e^{-lRC\sqrt{p}}\frac{1}{p}e^{-\delta\sqrt{p}}e^{-pt_{\text{и}}}. \qquad (5)$$

По теореме свертывания операционного исчисления оригинал выражения (4) имеет вид

$$\frac{R_0^2}{R_0+R_l}\int_0^t\frac{\exp-\frac{(RCl+\delta)^2}{4\tau}}{\sqrt{\pi\tau}}\left(e^{-\frac{K}{R_0}(t-\tau)}-e^{-\frac{K}{R_l}(t-\tau)}\right)dt. \qquad (6)$$

Так как выражение (5) отличается от (4) только множителем $e^{-pt_{\text{и}}}$, то по теореме запаздывания операционного исчисления оригинал (5) получается по выражению (6), в котором вместо τ записано $\tau-\tau_{\text{и}}$ и $d\tau=d(\tau-\tau_{\text{и}})$.

Таким образом, использование тестового импульса в виде (2) позволяет легко получить выражения для мгновенного напряжения на нагрузке цепи с распределенными *RC*-параметрами. При этом применяются только известные теоремы операционного исчисления и таблицы оригиналов и изображений. Однако интеграл в (6) не может быть взят в аналитической форме. Поэтому расчеты требуют значительной работы по численному интегрированию.

Несмотря на это обстоятельство, полученные выражения полностью решают задачу определения электрического режима в омической нагрузке цепи с распределенными *RC*-параметрами и могут найти применение при проектировании узлов железнодорожной автоматики и линий связи.

Следует отметить, что в литературных источниках описано применение тестового импульса (2) для анализа перекрестных помех в проводных линиях связи. Параметры этих линий существенно отличаются от параметров линий, рассматриваемых в докладе. Использование тестового импульса (2) для анализа функционирования элементной базы современных систем железнодорожной автоматики и телемеханики и для анализа линий современной связи не рассматривалось. Поэтому результаты доклада имеют существенную новизну и актуальность для обеспечения безопасности движения поездов на железных дорогах.

УДК 656.257

# ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

*К. И. КОРНИЕНКО*
*Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте, г. Москва, Российская Федерация*

Искусственный интеллект находит все большее применение в различных областях жизнедеятельности человека. Не исключением является и железнодорожный транспорт. За последние годы холдинг «Российские железные дороги» активно внедряет системы с искусственным интеллектом [1–15].

Сегодня основная задача АО «НИИАС» в цифровизации инфраструктурного комплекса с использованием технологий искусственного интеллекта – довести существующие технологии до их промышленной применимости. В отличии от применения искусственного интеллекта в других отраслях применение искусственного интеллекта в железнодорожном транспорте сопряжено с рядом значительных проблем.

Наиболее проработанными являются системы диагностики подвижного состава и инфраструктуры. Необходимо отметить, что системы диагностики строятся на основании лазерного сканирования, машинного зрения, достаточно большой перечень параметров выявляется с помощью бортовых датчиков, акустического контроля и тензометрия.

Здесь можно выделить первый акцент развития систем искусственного интеллекта – **достоверность**. Сегодня в большинстве приложений достоверность составляет более 99 %. Однако для железнодорожного транспорта данный показатель надо увеличивать, вплоть до возможности проведения метрологической поверки для систем с искусственным интеллектом.

На сети железных дорог широкое внедрение получил диагностический комплекс Пост автоматизированного приема и диагностики подвижного состава на сортировочных станциях (далее – ППСС) – первый масштабный проект, позволяющий получать достоверную и объективную информацию о состоянии вагонного парка практически в режиме реального времени.

Сейчас АО «НИИАС» работает над автоматизированной системой контроля состояния локомотивов (далее – АСКОЛ). АСКОЛ автоматизирует контроль более 100 различных параметров, обнаруживает дефекты поверхности катания колесных пар, осуществляет лазерный контроль, автоматически контролирует параметры токоприемников, состояние рессор, колесных пар и колодок.

Съем данных – это только первый этап. Если вагон или локомотив находится в опасной зоне, то его отцепляют и направляют на ремонт. Второй важный аспект внедрения искусственного интеллекта – **предиктовность**. Системы предиктивной аналитики опираются на большие объемы данных, полученные в разное время и от разных источников информации.

Для ППСС и АСКОЛ ведутся разработки, связанные с реализацией нового организационно-технологического подхода на основе полученных цифровых данных. Он позволит итерационно улучшить состояние вагонного парка, курсирующего на сети.

Для крупных сортировочных станций создаются целые цифровые двойники, которые используя методы предиктивной аналитики, позволяют предсказывать поведение станции при изменении технологии или технических средств.

Внедрение предиктивной аналитики является одним из логичных шагов развития систем на основе искусственного интеллекта. Примером этого является комплекс компьютерного зрения в сортировочном парке (далее – КЗСП). КЗСП разрабатывался для контроля заполнения путей в сортировочном парке: местоположения отцепов в сортировочном парке и расчета окон между вагонами.

Уже в процессе эксплуатации был выявлен целый ряд точек дальнейшего развития КЗСП. Важнейшей является инновационная функция диагностики состояния профиля сортировочных путей в реальном времени.

Сегодня в условиях массового несоответствия профилей путей сортировочных парков проектным значениям на основе данных КЗСП мы можем, во-первых, повысить адаптивность алгоритмов роспуска, это сегодня можно сказать, глаза системы автоматического роспуска. С другой стороны,

мы можем перейти к адресному обслуживанию путей сортировочного парка по состоянию. Необходимо отметить, что КЗСП собирает информацию в процессе эксплуатации, т. е. никто не прерывает работу сортировочной горки для съемки профиля. Сотрудники в любое время могут открыть съемку профиля и увидеть места, которые могут представлять угрозу для роспуска.

Предиктивность должна в первую очередь заключаться в объединении данных от большого количества датчиков. Далее необходимо вести цифровую модель. Здесь можно отметить третий аспект применения искусственного интеллекта – **применяемость**. Применение искусственного интеллекта требует значительных аппаратных платформ для обработки данных. На сегодняшний день некоторые производители уже предлагают устройства технического зрения, которые сами могут обрабатывать изображения с помощью интегрированных чипов искусственного интеллекта.

Также необходимо учитывать промышленный конструктив изделий для обеспечения решений вопросов соблюдения требований устойчивости к механическим и климатическим воздействиям, электромагнитной совместимости. К примеру, в ППСС разработано специальное напольное оборудование, устанавливаемое в колею. Оно состоит из 6 камер, которые производят съемку подвижного состава снизу. Защита камер осуществляется двумя способами. Первый это механическая защита с помощью кожуха. В нормальном состоянии кожух закрыт, открывается он только при необходимости съемки. Второй способ – это воздушная защита: с помощью специальной системы воздуходувки на камеры не попадает грязь, снег или мелкие камни.

Железнодорожный транспорт также характеризуется повышенными требованиями к уровню безопасности перевозочного процесса. Сегодня вопросами функциональной безопасности занимается целая наука. И сейчас отсутствуют методы доказательства безопасности искусственного интеллекта. Последним аспектом внедрения искусственного интеллекта является – **безопасность**.

Любая система, связанная с обеспечением безопасности движения, должна проходить доказательство функциональной безопасности. Сложность доказательства безопасности искусственного интеллекта связана с тем, что система представляет собой черный ящик, в котором нет строго заданных алгоритмов работы. Поэтому связь между входом и выходом системы невозможно проследить.

В качестве одного из решений проблемы сейчас предлагается построение многоуровневых систем. Базовые функции безопасности возлагаются на искусственном интеллекте с уровнем полноты безопасности (УПБ1). Основные функции безопасности должны решаться на уровне программно-аппаратных подсистем с заданной жесткой логикой. Этим программно-аппаратным подсистемам необходимо задавать УПБ4.

**Список литературы**

1 Компьютерное зрение для контроля сортировочных процессов / А. Е. Хатламаджиян, И. А. Ольгейзер, А. В. Суханов, В. В. Борисов // Автоматика, связь, информатика. – 2021. – № 3. – С. 8–11. – DOI: 10.34649/AT.2021.3.3.002.

2 Компьютерное зрение как способ интеллектуализации систем горочной автоматизации / И. А. Ольгейзер, А. В. Суханов, А. М. Лященко, Д. В. Глазунов // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2022. – № 1. – С. 46–53. – DOI: 10.52261/02346206_2022_1_46.

3 Цифровая железнодорожная станция - от концепции к реальному внедрению / В. Е. Андреев, А. И. Долгий, В. В. Кудюкин [и др.] // Автоматика, связь, информатика. – 2023. – № 9. – С. 2–6. – DOI: 10.34649/AT.2023.9.9.001.

4 **Шабельников, А. Н.** Концепция цифровой платформы на сортировочных станциях / А. Н. Шабельников, И. А. Ольгейзер, А. В. Суханов // Мир транспорта. – 2021. – Т. 19, № 1 (92). – С. 60–73. – DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-1-60-73.

5 **Шабельников, А. Н.** Цифровизация сортировочного комплекса / А. Н. Шабельников, В. В. Дмитриев, И. А. Ольгейзер // Автоматика, связь, информатика. – 2019. – № 1. – С. 19–22.

6 **Шабельников, А. Н.** Горочный тренажер на базе цифрового двойника / А. Н. Шабельников, В. И. Хабаров, И. А. Ольгейзер // Автоматика, связь, информатика. – 2020. – № 10. – С. 8–10. – DOI: 10.34649/AT.2020.10.10.002.

7 Роль цифровых технологий в развитии сортировочных станций / А. Н. Шабельников, И. А. Ольгейзер, В. В. Борисов, А. В. Суханов // Автоматика, связь, информатика. – 2020. – № 7. – С. 2–5. – DOI: 10.34649/AT.2020.7.7.001.

8 Safety Control of the Use of Technical Vision Systems on Hump Humps / K. I. Kornienko, P. Borovlev, K. Maksimov [et al.] // Proceedings of the Eighth International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IIT-I'24), Harbin, 1–7 нояб./ 2024 г. – Vol. 1209-1. – Springer: Springer, 2024. – P. 62–69. – DOI: 10.1007/978-3-031-77688-5_7.

9 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023669632 Российская Федерация. Программный комплекс устройства счета и контроля расцепа вагонов на горбе сортировочной горки (УСКР) : № 2023669059 : заявл. 18.09.2023 : опубл. 18.09.2023 / К. И. Корниенко, К. Ю. Максимов, И. А. Ольгейзер [и др.] ; заявитель АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте».

10 Identification of Critical States of Technological Processes Based on Predictive Analytics Methods / S. M. Kovalev, I. A. Olgeizer, A. V. Sukhanov, K. I. Kornienko // Automation and Remote Control. – 2023. – Vol. 84, № 4. – P. 424–433. – DOI: 10.1134/S0005117923040100.

11 Инновационные алгоритмы машинного зрения для диагностики продольного профиля сортировочных путей / А. И. Долгий, А. Е. Хатламаджиян, И. А. Ольгейзер [и др.] // Автоматика, связь, информатика. – 2022. – № 8. – С. 7–9. – DOI: 10.34649/AT.2022.8.8.002.

12 **Ольгейзер, И. А.** Применение систем технического зрения для повышения уровня полноты безопасности / И. А. Ольгейзер, К. И. Корниенко, С. Ю. Гришаев // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Году качества. Гомель, 21–22 нояб. 2024 г. В 2 ч. Ч. 1. – Гомель : БелГУТ, 2024. – С. 227–229.

13 Устройство счета и контроля расцепа вагонов / И. А. Ольгейзер, А. В. Суханов, К. И. Корниенко, П. В. Боровлев // Автоматика, связь, информатика. – 2024. – № 5. – С. 9–11. – DOI: 10.62994/AT.2024.5.5.001.

14 Патент № 2836946 C1 Российская Федерация, МПК B61K 9/08, B61J 3/02, G01P 3/68. Способ содержания путей железнодорожного сортировочного парка на основе данных видеоаналитики : заявл. 24.09.2024: опубл. 24.03.2025 / К. И. Корниенко, И. А. Ольгейзер, Д. А. Рыжов [и др.] ; заявитель Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте».

15 Метод оптической идентификации железнодорожных подвижных единиц на основе интегральных устойчивых признаков / А. В. Суханов, И. С. Артемьев, А. И. Долгий, А. Е. Хатламаджиян // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 4 (27). – С. 118.

УДК 621-192:519.816

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОПАСНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

*Н. Г. ПЕНЬКОВА, С. В. ИПАТОВ*

*Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте, г. Москва, Российская Федерация*

В современных аппаратно-программных комплексах систем железнодорожной автоматики и телемеханики отказы носят внезапный характер и обеспечение их безопасности и надежности базируется на основах теории дискретных устройств. Тогда как для механических элементов подвижного состава характерна постепенная деградация показателей прочностных характеристик, влияющих на надежность и безопасность перевозочного процесса.

Обеспечение безопасности механических изделий (таких как элементы ходовой части, тормозные системы, сцепные устройства) является критически важной задачей в железнодорожном транспорте. Традиционные подходы к оценке надежности, основанные на моделях потоков внезапных отказов (например, марковские модели для систем автоматики), неприменимы для механических объектов, чьи отказы носят постепенный, износовый характер.

Механическое изделие обладает некоторыми контролируемыми параметрами $S$, по значениям которых можно судить о его состоянии исправности. Существует номинальное (эталонное) значение $\mu$, при котором изделие функционирует оптимально. На этапе производства основной целью является достижение такого значения параметра $S$, которое будет максимально приближено к значению $\mu$, т. е. однозначно отвечает диапазону «исправное состояние». Однако по естественным причинам реализация процесса производства приводит к возникновению случайной величины, характеризующей отклонение фактического значения параметра от требуемого ($\Delta$). Таким образом, фактическое значение параметра также является случайной величиной, которая подчиняется закону нормального распределения.

На рисунке 1 представлена графическая интерпретация нормального распределения, характерного для данного явления, в котором:

– имеется сильная тенденция данных группироваться вокруг центра (все производимые образцы изделия потенциально имеют одно и то же значение параметра $S_{испр}$);

– положительные и отрицательные отклонения от центра равновероятны (недостаточно качественное производство с одинаковой вероятностью может привести к изменению значения параметра как в положительную, так и в отрицательную сторону [$S_{испр} - \Delta$; $S_{испр} + \Delta$]);

– частота отклонений резко падает, когда отклонения от центра становятся большими (образцы изделия, у которых Δ достигает значения, переводящего образец в состояние опасного отказа, крайне маловероятны).

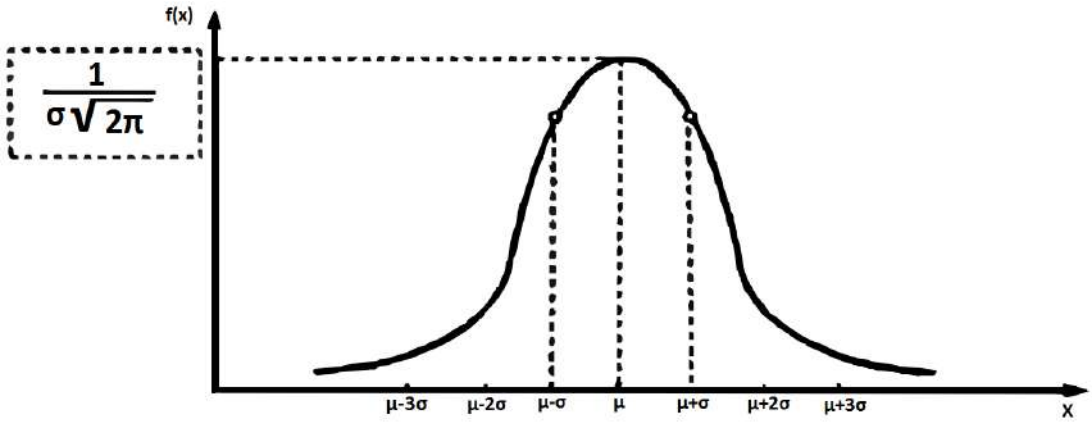



Рисунок 1 – График нормального распределения случайной величины

На рисунке 1 следует обратить внимание на следующие элементы:

μ – эталонное значение параметра, при котором механическое изделие находится в исправном состоянии;

Δ = 3σ – отклонение фактического значения параметра от эталонного, при котором с высокой вероятностью механическое изделие находится в исправном состоянии. При больших, чем Δ, отклонениях изделие переходит в состояние опасного отказа (красная зона на рисунке 2).

Здесь следует акцентировать внимание на термин «опасный отказ» в отношении механического изделия. Опасным отказом считается событие, при котором параметр $S$ достигает предельного значения $S_{\text{ghtl}}$, после которого может произойти нежелательное событие (от нарушений графика движения до аварийных ситуаций в виде схода, столкновений и т. п.) при реализации функций перевозочного процесса. Таким образом, граница между исправным и неисправным состоянием определяется не статистикой, а физикой процесса.

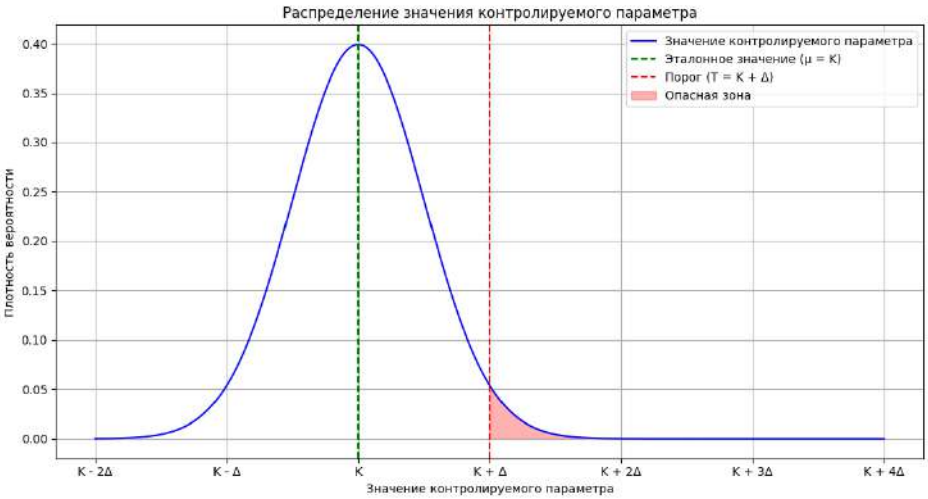



Рисунок 2 – Распределение фактического значения параметра при эталонном значении, равном К

Теперь рассмотрим этап эксплуатации. Аналогично в процессе эксплуатации механического изделия из-за нагрузок, износа и условий окружающей среды накапливается дополнительный разброс, обусловленный случайной величиной – отклонением фактического значения параметра от требуемого. При условии независимости этих факторов результирующим отклонением фактического значения параметра от эталонного является

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\text{производство}} + \sigma_{\text{эксплуатация}}}. \quad (1)$$

Для своевременного выявления постепенной деградации параметра в процессе эксплуатации используется диагностическое устройство (далее – ДУ). Поскольку отклонение фактического параметра от эталонного параметра и переход в опасную зону являются постепенным процессом, регулярный контроль позволяет обнаружить критическое отклонение и вовремя вывести изделие из эксплуатации. Наличие исправно функционирующего диагностического оборудования «преобразует» зону потенциально опасного состояния в зону «компенсации», где риск реализации отказа снижается за счет его раннего обнаружения (рисунок 3). При этом собственные неисправности ДУ не формируют самостоятельного дополнительного риска, так как они проявляются в области крайне маловероятных значений параметра (в «хвостах» распределения), где плотность вероятности возникновения отказа мала.

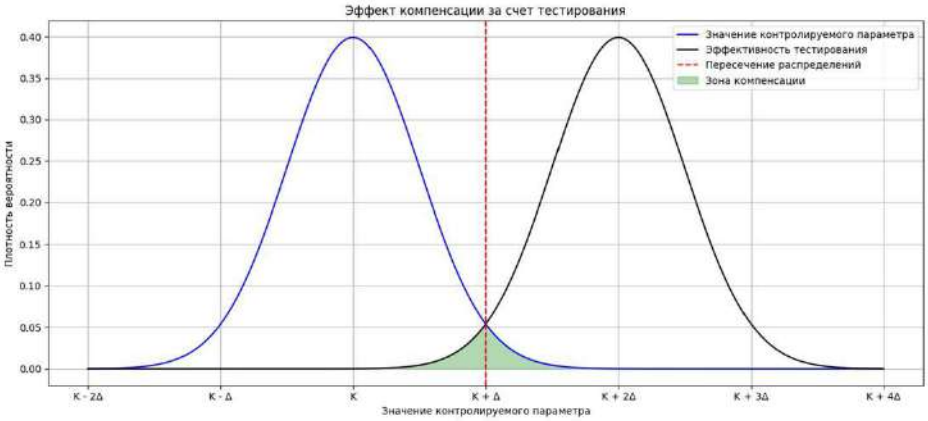



Рисунок 3 – Влияние диагностики на уменьшение последствий опасного отклонения фактического значения параметра от эталонного

Выводы:

1 Системы автоматики подвержены случайным отказам, которые можно моделировать с помощью простейших потоков отказов и вероятностных моделей (например, модели Маркова). Механические элементы также подвержены отказам, но они носят постепенный характер и зависят от качества производства и условий эксплуатации и технического обслуживания.

2 Отказом механического изделия считается такое отклонение значения его параметра от эталонного, которое приводит к нежелательным последствиям при организации перевозочного процесса. Эти аспекты приводят к тому, что отказы механических изделий имеют вероятностную природу, поэтому требуют расчета вероятностей возникновения опасных ситуаций и критериев оценки рисков.

3 Методы контроля. Контроль состояния механического изделия может осуществляться двумя методами: абсолютным – визуальный осмотр, вероятностным – автоматический контроль с учетом метрологических характеристик.

4 Текущие задачи:

– унификация критериев оценки – номинальные параметры; допустимые отклонения; критические изменения; аварийные состояния;

– разработка прогнозных моделей;

– внедрение автоматизированных систем мониторинга;

– адаптация международного опыта.

УДК 625.8

## ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ

*Н. В. РЯЗАНЦЕВА, В. Е. МИНИН, И. С. КУХАРЕНКО*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В современных условиях разработка программного обеспечения становится все более сложной и затратной. Растут требования к функциональности и масштабированию, увеличивается число интеграций с внешними сервисами, и ужесточаются критерии соответствия нормативам. В универси-

тете ведется активная работа над созданием и внедрением системы дистанционного обучения (СДО) и защита информации является одной из основных задач. Для такой системы необходим сбалансированный подход: избыточная защита ведет к удорожанию и усложнению эксплуатации, в то время как пренебрежение базовыми мерами создает неприемлемые риски компрометации.

К числу критически важных уязвимостей относятся недостатки в механизмах аутентификации и управления сессиями. Основными проявлениями их являются использование слабых паролей и отсутствие многофакторной аутентификации для пользователей с повышенными привилегиями. В качестве мер по снижению рисков предлагается ввести минимальные требования к сложности паролей, хранить пароли с помощью современных адаптивных алгоритмов хеширования, внедрить многофакторную аутентификацию для администраторов и ответственных ролей, а также обеспечить корректные настройки cookie (HttpOnly, Secure) и политики истечения сессий.

Серьезные риски связаны с проблемами управления доступом, когда пользователи получают права, не соответствующие их роли. Решением являются внедрение централизованной авторизации по принципу наименьших привилегий, обязательная серверная проверка прав для критичных запросов и регулярный аудит системы доступа.

Высокую критичность имеют SQL-инъекции, последствия которых является выполнение произвольного кода и полный компрометацию данных. Надежная защита от этого вектора атак строится на трех китах: повсеместное применение параметризованных запросов (или ORM), строгая валидация входных данных и их корректное экранирование.

Утечка чувствительных данных – еще одна значимая категория рисков. Были замечены случаи передачи данных без шифрования, хранение резервных копий без защиты и избыточное хранение персональной информации. В качестве контрмер рекомендовано применять TLS для всех каналов передачи, шифровать важные данные, маскировать и минимизировать хранение персональных данных, а также внедрить политики управления логами и резервными копиями с учетом сроков хранения и процедур безопасного удаления.

Использование устаревших или уязвимых компонентов также отмечено как типичная проблема. Библиотеки и плагины со старыми версиями легко становятся вектором атак. Для этого необходимо вести учет зависимостей, регулярно сканировать проект на известные уязвимости и оперативно обновлять компоненты с проверкой совместимости.

К числу важнейших практик обеспечения безопасности относится регистрация действий и мониторинг. При их отсутствии инциденты могут оставаться незамеченными длительное время. Рекомендуется настроить централизованный сбор логов, внедрить мониторинг аномалий и оповещений, а также разработать регламент реагирования на инциденты.

Авторами было отмечено, что для СДО в университете оптимальным является набор мер, предоставляющий наилучшее соотношение риска к стоимости:

– обязательное шифрование каналов связи (TLS);
– безопасное хранение паролей и управление сессиями;
– проверка прав доступа на сервере;
– регулярное сканирование зависимостей и базовый механизм логирования с оповещениями.

В дополнение к техническим мерам рекомендуется интегрировать процессы тестирования безопасности (статический и динамический анализ, периодическое тестирование безопасности и анализ конфигураций) в цикл разработки, ведь безопасность должна быть непрерывным и эволюционным процессом, а не разовой задачей.

УДК 656.257.073

## ОПОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ СТАНЦИЕЙ НА БАЗЕ ТИПОВЫХ РЕШЕНИЙ ДЦ «НЕМАН»

*Ф. Е. САТЫРЕВ, В. Н. ЛИТВИН*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В рамках работ по оптимизации структуры оперативного управления перевозочным процессом, внедрению на железной дороге современных информационных технологий, эффективному исполь-

зованию энергетических ресурсов, снижению себестоимости перевозок, а также рациональному использованию кадрового потенциала дороги Конструкторско-технический центр на протяжении нескольких лет внедряет на полигоне дороги диспетчерскую централизацию «Неман» (ДЦ «Неман»).

Система ДЦ «Неман» – это комплекс технических и программных средств, обеспечивающих удалённый контроль и управление устройствами СЦБ (станционной централизации и автоблокировки).

Удаленный контроль состояния устройств СЦБ в реальном времени позволяет оперативному персоналу, участвующему в организации перевозочного процесса, оценивать объективную поездную обстановку, а удаленное управление устройствами СЦБ обеспечивает централизованное управление станциями полигона ДЦ (управление стрелками, сигналами, вспомогательными объектами).

В рамках полигона ДЦ контроль и управление может осуществляться с любого оборудованного рабочего места, заданного станциями полигона.

ДЦ «Неман» – это единый полигон, где любой оперативный персонал может просматривать заданное подмножество станций, а также управлять ими при конфигурировании соответствующих полномочий.

На Белорусской железной дороге развивается технология «опорных станций», то есть с какой-либо станции в дневное время осуществляется управление ближайшими станциями, а в ночное время эти станции передаются поездному диспетчеру. Комплекс технических средств «Неман», на базе которого создана микропроцессорная система ДЦ «Неман», позволяет реализовать данную технологию, которая наиболее эффективна при замене устаревшей системы СКЦ (станционной кодовой централизации) на ДЦ «Неман».

Для реализации проекта замены СКЦ на ДЦ «Неман» опорная станция включается в диспетчерский круг. В данной конфигурации управление исполнительной станцией первоначально осуществляется по системе СКЦ. Технические изменения на опорной станции включают полный демонтаж устройств СКЦ, удаление органов управления и отображения информации, относящихся к исполнительной станции, и монтаж специализированного АРМ. На исполнительной станции проводится более радикальная модернизация: демонтируются не только устройства СКЦ, но и традиционные органы управления (пульт-табло дежурного по станции), которые заменяются автоматизированным рабочим местом ДСП, выполненным на базе стандартных решений ДЦ «Неман».

В состав оборудования опорной и исполнительной станций включены следующие функциональные узлы (рисунок 1): по 2 комплекта компьютеров ДЦ (используются системные блоки в промышленном исполнении), которые включены в локальную сеть передачи данных; система автоматического резервирования оборудования линейного пункта; автоматизированные рабочие места ДСП; автоматизированные рабочие места дежурного электромеханика; блоки телеуправления и телесигнализации ДЦ «Неман» на стативах в помещении релейной; блоки телеуправления и телесигнализации ДЦ «Неман» в ТШ для собственных нужд; пульт ответственных команд; релейные схемы увязки ЭЦ станции с ДЦ «Неман» по альбому ГТСС № 419997-00.

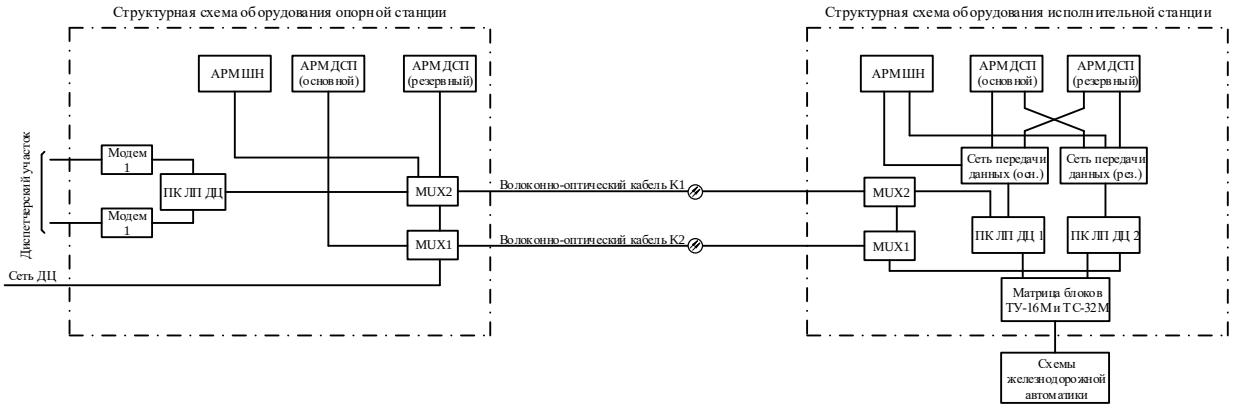



Рисунок 1 – Структурная схема оборудования опорной и исполнительной станций

Оборудование передачи данных, основное компьютерное и серверное оборудование ДЦ «Неман» размещается в проектируемых телекоммуникационных шкафах ТШ ЛП, которые устанавливаются в релейных помещениях станций. Телекоммуникационный шкаф ТШ ЛП предназначен для централизованного размещения и электропитания (в случае отсутствия на станции бесперебойного напряжения) оборудования линейного пункта, а также является коммутационным узлом локальной вычислительной сети линейного пункта ДЦ «Неман». Емкость шкафа рассчитана таким образом, что позволяет разместить как коммутационные устройства, так и активное оборудование. Конфигурация шкафа подобрана так, что обеспечивает удобства монтажа и обслуживания в процессе эксплуатации оборудования передачи данных. Контроль микроклимата внутри шкафа осуществляется с помощью вентилятора с терморегулятором. Необходимость кондиционирования помещения определяется проектом.

Для обеспечения отказоустойчивости линейного комплекта оборудования системы ДЦ «Неман» при выходе из строя одного из компонентов системы, а также для автоматического переключения с активного комплекта оборудования на пассивный в случаях отказа устройства сопряжения Ц32М, отказа источника бесперебойного питания; неработоспособности одного из компьютеров комплекта предусматривается автоматическое горячее резервирование устройств оборудования линейного пункта ДЦ «Неман» (АРОЛП), основанное на дублировании компьютера, ИБП, Ц32М. Также в системе предусмотрено переключение комплектов по команде ДНЦ с центрального поста ДЦ и непосредственное переключение на линейном пункте по нажатию кнопки.

**Список литературы**

1 Технические решения по проектированию ИШДЖ.420000-01-01 Автоматизированное рабочее место дежурного по станции на базе типовых решений диспетчерской централизации «Неман» : изменение 1. – Минск : КТЦ Бел. ж. д., 2023. – 35 с.

2 Технические решения по замене СКЦ на систему ДЦ «Неман» для управления ЭЦ ст. Гришаны и Лучеса 070439-ПЗ. – Минск : УП «Белжелдорпроект» Бел. ж. д., 2005.

УДК 625.1:004.942

## АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ВХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЛЬСОВОЙ ЦЕПИ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ

*М. М. СОКОЛОВ, А. Г. ХОДКЕВИЧ, К. В. ПЕТРАКОВА*
*Омский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация*

Классический подход к проектированию рельсовых цепей предполагает расчет параметров источника питания, направленный на обеспечение корректной работы путевого приемника во всех эксплуатационных режимах работы РЦ. Основная задача таких расчетов – определить значения напряжения и мощности источника питания, которые будут гарантировать, что в нормальном режиме ток, доходящий до реле, будет достаточным для его срабатывания и удержания даже при минимальном сопротивлении изоляции, в шунтовом – снизится ниже порога отпускания якоря, а в контрольном – исключит ложное срабатывание при аварийных состояниях. При решении данной задачи анализируются значения входных сопротивлений питающего и релейного концов, для получения которых учитывались характеристики типовой аппаратуры, применяемой как на питающем конце, так и на релейном, а также сопротивление рельсов, длина участка и сопротивление изоляции. Несмотря на то, что в расчете берут во внимание возможные изменения в процессе эксплуатации влияющих факторов, таких как колебания напряжения сети или постепенное ухудшение изоляции, он ориентирован на путевой приемник с дискретным выходным сигналом «свободно/занято», что не позволяет установить точные причины в случае выдачи информации о занятом путевом участке: было ли это наложение шунта, обрыв рельсовой нити или критическое снижение сопротивления изоляции. Если же измерять значение входного сопротивления питающего конца и сравнивать с расчетными значениями, то можно получать актуальные данные о текущем состоянии цепи и состоянии изоляции.

В рамках студенческой научной работы на кафедре «Автоматика и телемеханика» ОмГУПСА была разработана Программа расчета входного сопротивления рельсовой цепи [2], позволяющая проанализировать поведение входного сопротивления при различных значениях влияющих параметров. В качестве аналитических выражений использовались выражения из классической теории работы рельсовых цепей [1]. Программа была реализована с помощью Smath Studio – российского программного обеспечения для выполнения инженерных расчетов. Данная платформа предполагает широкий функционал, в том числе средства визуализации через построение графиков.

В качестве примера приведем результаты, полученные в ходе моделирования для схемы рельсовой цепи рисунка 1.

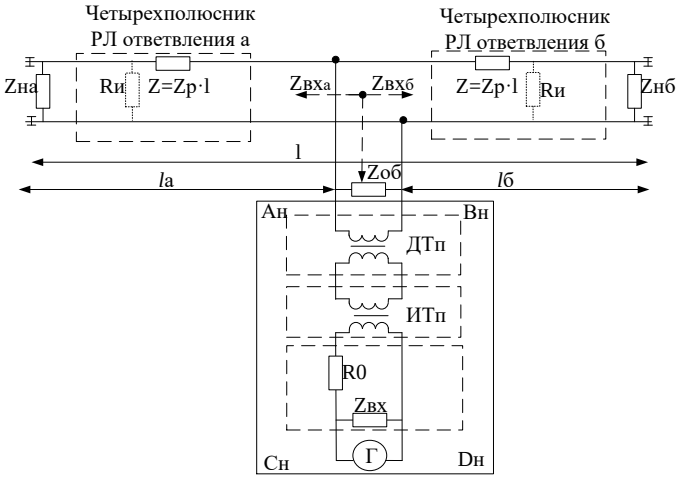



Рисунок 1 – Схема замещения рельсовой цепи

В результате моделирования для случая *l*а = *l*б = 500 м было выявлено, что при данной длине и любых значениях нагрузки значения $Z_{BX}$ в нормальном режиме вполне различимы для разных сопротивлений изоляции.

На рисунке 2 представлен пример результата моделирования для шунтового режима работы РЦ, где в виде сплошных линий отображено изменение $Z_{BX}$ по всей длине ответвления б, точками отмечены места контроля нахождения шунта, отсчет места нахождения шунта начинается с конца ответвления б, за последнюю координату места нахождения шунта принят питающий конец ($X_Ш$ = 500 м).

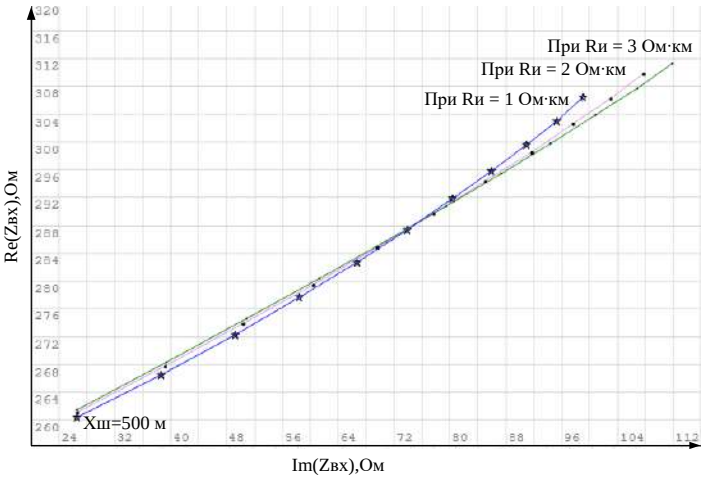



Рисунок 2 – Графики изменения активной и реактивной составляющих входного сопротивления в шунтовом режиме ($Z_Н$ = 0,1 Ом)

По графикам на рисунке 2 видно, что значения входного сопротивления при разных значениях сопротивления изоляции при данной длине и любых значениях нагрузки в нормальном режиме вполне различимы для разных сопротивлений изоляции и различных координат местоположения шунта.

Аналогичные зависимости были получены и для всех режимов работы рельсовых цепей в широком диапазоне изменения характеристик сопротивления изоляции и длины ответвлений.

Результаты, полученные при помощи Программы расчета входного сопротивления рельсовой цепи [2], говорят о возможности применения комплексного значения входного сопротивления рельсовой цепи в качестве диагностического признака в задачах определения местоположения подвижного постава или возникновения неисправностей в рельсовой линии.

**Список литературы**

1 Рельсовые цепи магистральных железных дорог : справ. / В. С. Аркатов, Ю. В. Аркатов, С .В. Казеев, Ю .В. Ободовский. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Миссия-М, 2006. – 496 с.

2 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025668393 Российская Федерация. Программа расчета входного сопротивления рельсовой цепи : заявл. 09.06.2025 : опубл. 15.07.2025 / М. М. Соколов, К. В. Петракова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения».

УДК 656.259

## РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА ПЕРЕЕЗДНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ АПС-04

*Л. Н. СТАЖАРОВА, А. П. ВЫЛУПКО*
*Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация*

Лабораторный макет – это сконструированное устройство или модель, предназначенные для изучения, демонстрации логики и принципов работы определенных систем. Такие макеты являются неотъемлемой частью системы образования, поскольку они позволяют обучающимся на практических занятиях применять теоретические знания и моделировать разные ситуации на лабораторных стендах.

Они способствуют более глубокому пониманию предмета. Работа с макетом позволяет наглядно, за короткий промежуток времени, неограниченное количество раз, безопасно, в режиме реального времени упростить усвоение сложных принципов и концепций.

Работа с лабораторными макетами развивает практические навыки, позволяя решать вопросы анализа данных, решения проблем и неисправностей, работы с инструментами, что тоже является очень важной частью системы образования.

Практическая составляющая железнодорожных систем имеет высокую актуальность для процесса обучения студентов по специальности «Системы обеспечения движения поездов», поэтому разработка лабораторного макета переездной сигнализации АПС-04, позволяющей моделировать различные случаи, связанные с работой устройств и возможными неисправностями, является актуальной задачей.

1 Технические характеристики макета

1.1 Аппаратные модули:

– контроллер АПС-04: микропроцессор на базе ARM Cortex-M, 8 каналов дискретных входов, 8 каналов дискретных выходов, встроенный Watchdog;

– релейные блоки: двухуровневые релейные модули с электромагнитными реле на 24 V DC, нагрузка до 5 А;

– платы расширения;

– аналоговые входы (4×0–10 V, 4×4–20 mA) для подключения фоторезисторов и токовых трансдьюсеров;

– RS-485/Modbus-порт для интеграции с АСДК;

– Ethernet-коммуникатор для подключения к локальной сети.

1.2 Имитируемые датчики и исполнительные механизмы (таблица 1).

*Таблица 1*

| Тип устройства | Параметры | Назначение |
|---|---|---|
| Концевые выключатели | Герконовые, 24 V DC | Детектирование положения шлагбаума |
| Фоторезисторы | 0–10 kΩ, время отклика 20 ms | Симуляция наличия состава |
| Шлагбаум с электроприводом | Скорость 1 м/с, момент 15 Nm | Моделирование подъёма/опускания |
| Светофорные головки | LED, 3 цвета, потребление 0,5W | Индикация разрешающего/ запрещающего сигналов |

1.3 Питание и защита:

– основное питание: 24 V DC, 5 A; резервное – 12 V Li-ION аккумулятор, 2 Ah;

– гальваническая развязка: опторазвязка входных каналов, разделение силовой и логической части;

– защита: автоматические выключатели 2 A по каждому модулю, предохранители на шине питания, TVS-диоды на входах концевиков.

2 Программное обеспечение и интерфейсы

2.1 ПО для настройки и управления:

*Графический интерфейс* на базе Windows/Linux:

– конфигуратор логики АПС-04: блок-схемы алгоритма, таймеры, условия переходов;

– монитор параметров в реальном времени: состояние входов/выходов, логи ошибок.

*Встроенное ПО контроллера:*

– реализовано на C/C++ с модульными драйверами для каждого датчика и реле;

– алгоритм «fail-safe»: при потере связи или отказе датчика – встаёт в безопасное состояние (шлагбаум опущен, красный свет).

2.2 Коммуникационные протоколы:

– RS-485 с Modbus RTU: настройка скорости 9600–115200 бит/с, адресация до 31 устройства;

– Ethernet (TCP/IP): поддержка MQTT для передачи телеметрии в АСДК;

– USB-порт для прямого подключения к ПК (с функциями резервного копирования, прошивки).

2.3 Функции регистрации и удалённого доступа:

– логирование: кольцевой буфер на 10000 записей (входы, выходы, ошибки, время);

– SCADA-интеграция: OPC UA-сервер для передачи состояний в учебный SCADA-пакет;

– удалённый доступ: через веб-интерфейс (HTTPS, аутентификация по сертификату), просмотр текущего состояния и загрузка отчетов.

3 Типовые практические задания

3.1 Штатный проход поезда:

– инициация входного сигнала от имитатора состава;

– проверка последовательности включения светофоров и опускания шлагбаума;

– фиксация временных задержек.

3.2 Отказ датчика наличия состава:

– моделирование «залипания» путевого реле;

– анализ реакции системы: аварийное закрытие/блокировка.

3.3 Сбой в алгоритме «сквозного хода»:

– создание ситуации, когда второй поезд въезжает до подъёма шлагбаума;

– диагностика причин и корректировка параметров логики.

3.4 Аварийное отключение питания:

– имитация короткого замыкания в цепи питания;

– проверка сохранения логов, восстановление работоспособности.

3.5 Документация и отчетность:

– форма отчета: цель, схема подключения, результаты, выводы;

– таблица замеров: время реакции, состояние входов/выходов;

– фото/скриншоты интерфейса диагностики АСДК.

Функции лабораторного макета АПС-04 позволяют наглядно изучить принципы работы устройств с возможностью моделирования любых ситуаций на переезде для однопутных и многопутных участков железных дорог. Для повышения качества изучаемого материала в макете необходимо предусмотреть заведомо нештатные ситуации с нарушениями алгоритма работы переезда и разработать индивидуальные задания для обучающихся.

В целях углубленного изучения смежных дисциплин предлагается дополнить макет схемами согласования с устройствами диспетчерского контроля, позволяющими отслеживать вносимые неисправности на АРМ. Предлагаем использовать Систему технической диагностики и мониторинга на базе технических средств АСДК (автоматизированную систему диспетчерского контроля «ГТСС-СЕКТОР»).

Макет АПС-04 с системой АСДК позволит обучать не только студентов, но и специалистов на курсах повышения квалификации в максимально приближенных к реальности условиям без абсолютных рисков при эксплуатации настоящих поездов.

**Список литературы**

1 **Аверкиев, С. А.** Системы технической диагностики и мониторинга на базе технических средств АСДК (СТДМ АСДК) : типовые материалы для проектирования 410422-ТМП / С. А. Аверкин. – 2007.

2 **Воронцов, В. Н.** Схемы переездной сигнализации для переездов, расположенных на перегонах при любых средствах сигнализации и связи АПС-04 : типовые материалы для проектирования 410407-ТМП / В. Н. Воронцов. – 2004.

3 **Калинин, В. С.** Инновации в железнодорожном транспорте : техническая документация / В. С. Калинин, А. И. Михайлов. – 2018.

**4 Ефанов, Д. В.** Микропроцессорная система диспетчерского контроля устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : учеб. пособие / Д. В. Ефанов, Г. В. Осадчий. – 3-е изд. стер. – СПб. : Лань, 2023. – 180 с.

УДК 656.25

# МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОВЕДЕНИЯ FMECA-АНАЛИЗА СИСТЕМ ЖАТ

*С. Н. ХАРЛАП, Е. П. ЛИТВИНОВ*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Современные микроэлектронные системы железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) являются ключевыми элементами обеспечения безопасности движения поездов. Их проектирование и внедрение требуют обязательного подтверждения функциональной безопасности в соответствии с действующими нормативными документами и международными стандартами.

Одним из основных методов доказательства безопасности является анализ видов, последствий и критичности отказов (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis – FMECA) [1], включающий определение критериев и видов отказов, их имитацию, анализ последствий и расчет интенсивности возникновения опасных отказов [2] для всей анализируемой системы.

Высокая сложность современных устройств и большое количество моделируемых отказов делают проведение FMECA-анализа трудоемкой задачей, подверженной риску систематических ошибок, связанных с человеческим фактором. Однако четкая последовательность этапов анализа позволяет эффективно автоматизировать данный процесс, что особенно актуально для систем ЖАТ, где необходимы высокая точность и воспроизводимость результатов.

С этой целью в 2025 году был разработан программный комплекс (ПК) для автоматизации проведения FMECA-анализа систем ЖАТ [3–5], включающий три модуля: CircuitAnalyzer, FailureAnalyzer и FailureTreeBuilder.

В ходе апробации программного комплекса были выявлены направления, требующие модернизации для повышения производительности и точности анализа. В первую очередь, это оптимизация вычислительных процессов моделирования отказов в модуле CircuitAnalyzer и расширение возможностей учета диагностируемости отказов сложных микросхем при расчете интенсивностей отказов в модуле FailureTreeBuilder комплекса.

Модуль CircuitAnalyzer выполняет автоматизированное моделирование отказов электронных компонентов исследуемых схем с использованием ядра схемотехнического симулятора SPICE. В исходной версии моделирование производилось последовательно, что при большом количестве элементов (до нескольких тысяч) приводило к значительным временным затратам.

Для устранения данного недостатка реализован механизм многопоточного моделирования отказов. Каждая модель отказа теперь может выполняться в отдельном потоке с параллельным использованием ядер центрального процессора. Такой подход позволил значительно увеличить производительность и сократить время выполнения анализа.

Однако использование всех ядер процессора без ограничений может приводить к снижению производительности из-за повышенной нагрузки на систему и конкуренции потоков за ресурсы процессора. Для обеспечения стабильности работы и возможности адаптации под вычислительные ресурсы конкретного компьютера реализован механизм семафора, позволяющий ограничивать количество одновременно выполняемых потоков.

Количество активных потоков

$$N_{\text{потоков}} = N_{\text{ядер процессора}} - 1. \quad (1)$$

Это решение обеспечивает рациональное распределение вычислительной нагрузки и предотвращает конфликт потоков при обращении к памяти и дисковым ресурсам. Таким образом, в зависимости от архитектуры вычислительной системы и числа ядер процессора, время выполнения полного цикла моделирования может сокращаться в несколько раз, при этом сохраняется возможность гибкой настройки параметров параллельности.

Реализация многопоточного моделирования позволила существенно повысить эффективность работы модуля CircuitAnalyzer, сохранив корректность и воспроизводимость получаемых результатов.

Модуль FailureTreeBuilder выполняет построение дерева опасных отказов и расчет интенсивности опасного отказа всей исследуемой системы. В ходе модернизации была доработана методика учета результатов экспертной оценки диагностируемости сложных микросхем.

В предыдущей версии комплекса интенсивность опасного отказа сложных элементов, например, микроконтроллеров, для которых невозможно выполнить поэлементное моделирование, рассчитывалась по справочным данным без учета диагностических возможностей аппаратного обеспечения:

$$\lambda_{оо} = \lambda_{справ}, \tag{2}$$

где $\lambda_{оо}$ – интенсивность опасного отказа, 1/ч; $\lambda_{справ}$ – справочная интенсивность отказов, 1/ч.

В модуль FailureTreeBuilder добавлена возможность задания коэффициентов диагностируемости – как общего для всей микросхемы, так и отдельных для каждого типа отказа, например, короткое замыкание на «плюс питания», короткое замыкание на «минус питания», короткое замыкание на соседний вывод, обрыв контакта. Эти коэффициенты указываются в таблице данных объекта исследования. Если значения не заданы, по умолчанию принимается коэффициент равный 1. Пример задания данных коэффициентов приведен на рисунке 1.

| | K | L | M | N | O | P |
|---|---|---|---|---|---|---|
| след пин | Замыкание на след пин (Класс отказа) | Kd_Common | Kd_KzPlus | Kd_KzGnd | Kd_Break | Kd_KzNextPin |
| | защитный | 0.9 | 0.7 | 0.8 | 0.6 | 0.5 |
| | защитный | | | | | |
| | защитный | | | | | |
| | маскируемый | | | | | |
| | маскируемый | | | | | |
| | маскируемый | | | | | |

Рисунок 1 – Пример задания коэффициентов диагностируемости

Модернизированная формула расчета интенсивности опасных отказов имеет вид

$$\lambda_{оо} = \lambda_{справ}\,(1 - K_{диаг}), \tag{3}$$

где $K_{диаг}$ – коэффициент диагностируемости для анализируемой микросхемы.

Таким образом, если устройство обладает средствами диагностирования отказов, то их влияние может быть учтено с помощью коэффициента диагностируемости. В этом случае интенсивность опасного отказа определяется по формуле (3).

Такой подход позволяет повысить точность оценки риска: при высокой диагностируемости значение коэффициента $K_{диаг}$ близко к единице, что приводит к уменьшению расчетной интенсивности опасных отказов, а при низкой диагностируемости, напротив, увеличивает её, отражая рост вероятности невыявленных опасных отказов.

Проведенные модернизации существенно расширили функциональные возможности и повысили эффективность работы программного комплекса для проведения FMECA-анализа. Основные результаты модернизации заключаются в следующем:

– реализация многопоточного моделирования отказов позволила ускорить вычисления в 2–8 раз в зависимости от числа ядер процессора;

– использование принципа семафора обеспечило гибкость настройки и стабильность работы при больших объемах моделирования;

– внедрение коэффициентов диагностируемости повысило точность оценки интенсивности отказов сложных микросхем и микроконтроллеров;

– модернизированный расчетный алгоритм позволил более корректно учитывать влияние диагностических систем на общую интенсивность опасных отказов.

Результаты апробации обновленного комплекса показали сокращение времени анализа и повышение достоверности расчетов, что подтверждает эффективность предложенных решений.

Модернизированный программный комплекс может применяться в лабораторных и проектных исследованиях при проведении FMECA-анализа систем ЖАТ, а также в составе методик доказательства функциональной безопасности микропроцессорных систем управления.

**Список литературы**


1 **Харлап, С. Н.** Обзор существующих средств автоматизации FMECA-анализа / С. Н. Харлап, В. Л. Катков, Е. П. Литвинов // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию БелИИЖТа – БелГУТа, Гомель, 16–17 нояб. 2023 г. : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т. трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2023. – С. 234–236.

2 Особенности методов анализа видов и последствий отказов устройств ЖАТ / С. Н. Харлап, Д. Д. Медведев, С. И. Хоменко [и др.] // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 160-летию Белорусской железной дороги, Гомель, 24–25 нояб. 2022 г. : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т. трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2022. – С. 227–230.

3 **Харлап, С. Н.** Программное обеспечение для проведения анализа FMECA микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / С. Н. Харлап, В. Л. Катков // Проблемы безопасности на транспорте : материалы X Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 26–27 нояб. 2020 г. : в 5 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т. трансп.; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2020. – С.43–44.

4 **Харлап, С. Н.** Программное обеспечение для автоматической классификации последствий отказов при проведении FMECA-анализа устройств СЖАТ / С. Н. Харлап, В. Л. Катков, Е. П. Литвинов // Научно-технические аспекты комплексного развития железнодорожного транспорта : материалы X Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. Ч. 1 – Донецк: ДИЖТ, 2024. – С. 140–145.

5 **Харлап, С. Н.** Программный комплекс для автоматического построения дерева отказов по результатам выполнения FMECA-анализа устройств СЖАТ / С. Н. Харлап, Е. П. Литвинов // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Году качества : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т. трансп.; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2024. – С. 233–235.


УДК 656.25

## МЕТОД КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ДОСТИЖИМОГО УРОВНЯ ПОЛНОТЫ БЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМ ЖАТ НА ОСНОВЕ АРХИТЕКТУРНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

*С. Н. ХАРЛАП, О. И. ЯКОВЦЕВА*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Развитие высокоскоростного железнодорожного движения предъявляет повышенные требования к надёжности и функциональной безопасности систем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ). Критически важной задачей становится оценка рисков отказов, способных привести к авариям, человеческим жертвам и значительным финансовым потерям. В этой связи ключевой задачей разработчиков является обеспечение соответствия систем строгим требованиям международных стандартов функциональной безопасности, таких как МЭК 61508 [1], которые предписывают достижение высоких уровней полноты безопасности.

Разработка систем ЖАТ традиционно ведётся по V-образной модели жизненного цикла [2]. Данная модель предполагает последовательное прохождение этапов: анализ требований, проектирование архитектуры, детальное проектирование, кодирование (реализация), затем интеграция компонентов и, наконец, этапы верификации (проверка соответствия проекту) и валидации (проверка соответствия исходным требованиям заказчика и реальным условиям эксплуатации).

Существенным недостатком этого подхода является то, что проектные решения, принятые на ранних этапах, могут быть полноценно проверены лишь на стадии валидации, когда опытный образец уже создан. Это создаёт высокие риски того, что выявленные на финальной стадии несоответствия требованиям безопасности потребуют дорогостоящего пересмотра проекта и возврата к предыдущим этапам разработки.

**Сложность прогнозирования уровня полноты безопасности**

Функциональная безопасность – комплексный показатель, включающий:

1 **Защиту от систематических отказов** (ошибки проектирования): обеспечивается строгим соблюдением регламентированных стандартами процедур на всех этапах разработки. Риски здесь минимальны при корректном выполнении всех предписанных мероприятий.

2 **Защиту от случайных аппаратных отказов:** характеризуется **интенсивностью опасных отказов** и **долей безопасных отказов**. Именно количественная оценка этих показателей на ранних стадиях проектирования представляет наибольшую сложность.

До завершения разработки системы точно спрогнозировать достигаемый УПБ затруднительно. Это зачастую приводит разработчиков к одной из двух неоптимальных стратегий:

1 Слепое следование прошлому опыту без точной количественной оценки.

2 Применение избыточного набора методов защиты «на всякий случай», что ведёт к удорожанию и снижению конкурентоспособности продукта.

Для решения этой проблемы предлагается использовать на ранних этапах проектирования концепцию **архитектурных ограничений**, изложенную в стандарте МЭК 61508 [3]. Данный подход позволяет формализовать требования к структуре системы и дать первоначальную количественную оценку её потенциала по обеспечению безопасности.

Ключевая идея метода заключается в том, что максимально достижимый уровень полноты безопасности для программируемого электронного компонента (отнесённого по стандарту к Типу B – сложные компоненты, такие как микроконтроллеры и ПЛИС) не является произвольным. Он определяется двумя фундаментальными параметрами, закладываемыми на этапе архитектурного проектирования:

1 **Уровень отказобезопасности *N*** – этот параметр определяется аппаратной архитектурой системы и обозначает количество отказов, которые система может выдержать без перехода в опасное состояние:

1) ***N* = 0.** Одноканальная архитектура (1oo1 – «one out of one»). Одиночный отказ элемента может привести к опасному отказу системы. Это архитектура без избыточности;

2) ***N* = 1.** Двухканальная архитектура. Сюда относятся как дублированные системы (1oo2 – система обеспечивает безопасность, если функционирует хотя бы один канал из двух), так и мажоритарные системы (2oo3 – система обеспечивает безопасность, если функционируют хотя бы два канала из трёх). Один опасный отказ может быть перекрыт избыточным каналом;

3) ***N* = 2.** Троированная архитектура (3oo3 – система обеспечивает безопасность, если функционирует хотя бы один канал из трех). Система может парировать опасные отказы в двух каналах.

2 **Доля безопасных отказов (ДБО)** – это расчётный показатель, выражаемый в процентах. Он характеризует эффективность всех применяемых в системе диагностических механизмов. ДБО показывает, какая часть всех возможных отказов компонента будет обнаружена и обработана таким образом, что система перейдёт в безопасное состояние. Формула для расчёта ДБО выглядит следующим образом:

$$\text{ДБО} = \frac{\sum \lambda_S + \sum \lambda_{DD}}{\sum \lambda_S + \sum \lambda_{DD} + \sum \lambda_{DU}},$$

где $\lambda_S$ – интенсивность безопасных отказов (отказы, которые не приводят к потере функции безопасности или сразу же её обнаруживают); $\lambda_{DD}$ – интенсивность опасных отказов, которые обнаруживаются встроенными диагностическими средствами; $\lambda_{DU}$ – интенсивность опасных отказов, которые не обнаруживаются диагностикой (самая критичная категория).

Поскольку уровень отказобезопасности *N* выбирается на этапе разработки концепции и является фиксированным, ключевой переменной величиной становится доля безопасных отказов. Её сложно оценить экспертным путём.

Для решения этой задачи предлагается метод количественного расчёта ДБО на основе выбранных аппаратных средств и программных механизмов контроля и диагностики. Это позволит ещё на стадии проектирования спрогнозировать максимально достижимый УПБ для выбранной архитектуры системы, а также решить обратную задачу – подобрать оптимальный набор аппаратных и программных мер для достижения целевого УПБ.

Для практической реализации данного метода предлагается разработать специализированное программное обеспечение, которое автоматизирует расчёты и минимизирует риски недостижения требуемых показателей безопасности на поздних стадиях разработки.

**Алгоритм оценки достижимого УПБ [4]:**

1 *Выбор архитектуры* – разработчик в интерфейсе программы выбирает целевую аппаратную архитектуру системы (1oo1, 1oo2, 2oo3, 3oo3), что определяет параметр *N*.

2 *Выбор компонентов* – пользователь выбирает из встроенной базы данных конкретные аппаратные компоненты, планируемые к применению в оцениваемом проекте. Для каждого компонента в базе данных хранятся данные по интенсивности отказов (λ), разбитые на категории ($\lambda_S$, $\lambda_D$ и т. д.).

3 *Выбор методов диагностики* – для каждого компонента пользователь активирует методы диагностики и самоконтроля, которые планируется использовать в проекте. Программа обладает обширным каталогом таких методов с предрасчитанной эффективностью (коэффициентом покрытия диагностики – DC), регламентированной стандартами (МЭК 61508-2 [3], МЭК 61508-6 [4]).

4 *Расчёт ДБО* – программа на основе выбранных компонентов и активированных для них диагностических методов вычисляет совокупную долю безопасных отказов для всей системы.

5 *Определение УПБ* – по соответствующей таблице стандарта МЭК 61508-2 программа определяет итоговый, максимально достижимый УПБ для выбранной конфигурации.

Разработчик может проверить, как повлияет на итоговый УПБ добавление других методов диагностики или переход к другой архитектуре, например от дублированной к троированной. Это позволяет найти экономически оптимальное решение, гарантированно удовлетворяющее требованиям по безопасности.

**Ключевые особенности работы программы:**

*Интерактивность:* пользователь может настраивать параметры устройства и выбирать методы диагностики (рисунок 1).

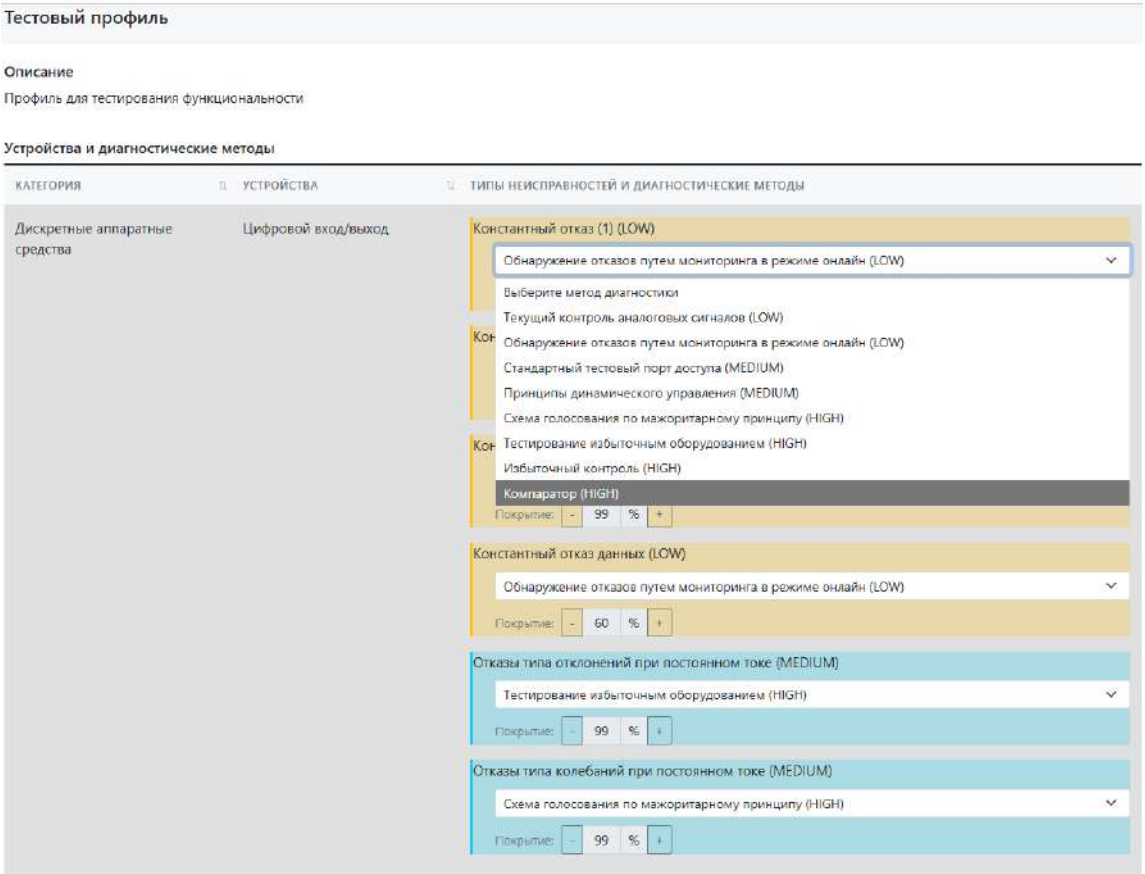



Рисунок 1 – Пример конфигурации системы и выбора диагностик

*Автоматизация:* расчёты выполняются автоматически на основе выбранных данных.

*Соответствие стандартам:* программа использует данные из ГОСТ Р МЭК 61508-2 [3] и МЭК 61508-6 [4] для обеспечения точности анализа.

**Таблица расчета неисправностей**

| УСТРОЙСТВА | S | D | $DC_{COMP}$ | Λ | $Λ_S$ | $Λ_D$ | $Λ_{DD}+Λ_{DU}$ | $Λ_S+Λ_{DD}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Цифровой вход/выход | 0.5 | 0.5 | 84.5 | 10 | 5.00 | 5.00 | - | - |
| Электромеханическое устройство | 0.5 | 0.5 | 0 | 10 | 5.0000 | 5.0000 | - | - |
| Аналоговый вход/выход | 0.5 | 0.5 | 0 | 10 | 5.0000 | 5.0000 | - | - |

Возможность редактирования. В сумме S+D=1 | Возможность редактирования | Возможность редактирования

**Таблица определения УПБ (Уровня полноты безопасности)** Тип архитектуры: 1oo2

| ДОЛЯ БЕЗОПАСНЫХ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТА | ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТЬ АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ | | |
|---|---|---|---|
| | N = 0 | N = 1 | N = 2 |
| менее 60% | - | УПБ 1 | УПБ 2 |
| от 60% до менее 90% | УПБ 1 | УПБ 2 | УПБ 3 |
| от 90% до менее 99% | УПБ 2 | УПБ 3 | УПБ 4 |
| более и равно 99% | УПБ 2 | УПБ 4 | УПБ 4 |

Рисунок 2 – Пример расчета неисправностей и УПБ

Данное программное обеспечение может стать эффективным инструментом для проектирования и анализа устройств с учетом требований функциональной безопасности. Оно поможет не только оценить текущее состояние проекта, но и принять обоснованные решения для его улучшения. Это особенно важно в контексте стандартов, таких как ГОСТ Р МЭК 61508-2-2012 [3], которые требуют строгого соблюдения норм безопасности для критически важных систем (рисунок 2).

Предлагаемое решение на основе метода архитектурных ограничений и специализированного ПО позволит реализовать комплексный подход к обеспечению функциональной безопасности систем ЖАТ на ранних этапах проектирования, минимизировать риски, оптимизировать затраты и гарантировать достижение требуемых уровней полноты безопасности.

**Список литературы**


1 ГОСТ Р МЭК 61508-1-2012. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Ч. 1. Общие требования. – Введ. 01.08.2023. – М. : Стандартинформ, 2014. – 51 с.

2 ГОСТ 33432-2015. Политика, программа обеспечения безопасности. доказательство безопасности объектов железнодорожного транспорта. – Введ. 01.0.2016. – М. : Стандартинформ, 2019. – 24 с.

3 ГОСТ Р МЭК 61508-2-2012. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Ч. 2. Требования к электрическим, электронным, программируемым электронным системам, относящимся к безопасности. – Введ. 01.08.2023. – М. : Стандартинформ, 2014. – 80 с.

4 ГОСТ Р МЭК 61508-6-2012. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Ч. 6. Руководство по применению ГОСТ Р МЭК 61508-2, ГОСТ Р МЭК 61508-3. – Введ. 01.08.2023. – М. : Стандартинформ, 2014. – 102 с.


УДК 656.259.12

## МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ ВЫЯВЛЕНИЯ ОБРЫВА СТРЕЛОЧНЫХ СОЕДИНИТЕЛЕЙ, НЕ ОБТЕКАЕМЫХ СИГНАЛЬНЫМ ТОКОМ


*Д. В. ШВАЛОВ, Е. С. РЕВЕНКО*

*Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация*


Стрелочные соединители, не обтекаемые сигнальным током в нормальном режиме, устанавливаются на стрелочных переводах, входящих в состав разветвленных рельсовых цепей с неконтролируемыми ответвлениями. Такие соединители всегда дублируются в соответствии с действующи-

ми нормами и типовыми материалами для проектирования. Обрыв таких соединителей не приводит к нарушению нормального режима рельсовой цепи, но может привести к невыполнению шунтового режима при вступлении колесной пары на неконтролируемое ответвление. Периодические проверки соединителей, не обтекаемых сигнальным током, согласно установленному регламенту должны проводиться один раз в квартал. Поэтому практический интерес представляет исследование возможности выявления полного или частичного обрыва соединителей в автоматическом режиме на основе использования результатов измерения значений параметров рельсовых цепей системами технического диагностирования и мониторинга (СТДМ).

Рассмотрим обобщенную схему замещения разветвленной рельсовой цепи с одним неконтролируемым ответвлением (рисунок 1), где использованы следующие обозначения:

– $U$, $I$ – напряжение, ток источника питания рельсовой цепи;

– Н и К – четырехполюсники, замещающие аппаратуру соответственно питающего и релейного конца рельсовой цепи, с коэффициентами соответственно $A_н$, $B_н$, $C_н$, $D_н$ и $A_к$, $B_к$, $C_к$, $D_к$;

– $A_{рла}$, $B_{рла}$, $C_{рла}$, $D_{рла}$ – коэффициенты четырехполюсника, замещающего рельсовую линию в общей части рельсовой цепи;

– $A_{рл1}$, $B_{рл1}$, $C_{рл1}$, $D_{рл1}$ – коэффициенты четырехполюсника, замещающего рельсовую линию контролируемого ответвления рельсовой цепи;

– $A_{рл2}$, $B_{рл2}$, $C_{рл2}$, $D_{рл2}$ – коэффициенты четырехполюсника, замещающего рельсовую линию неконтролируемого ответвления рельсовой цепи;

– $U_р$, $I_р$ – напряжение, ток на входе путевого приемника $Z_р$.

– $R_{сс}$ – эквивалентное сопротивление стрелочных соединителей;

– $R_ш$ – сопротивление поездного шунта.

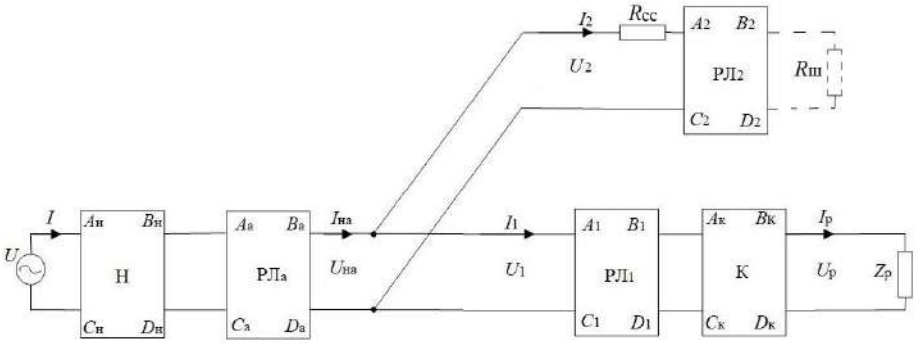



Рисунок 1 – Обобщенная схема замещения рельсовой цепи

В шунтовом режиме (при наложении поездного шунта на неконтролируемом ответвлении) сигнальный ток протекает по обоим ответвлениям, поэтому можно записать [1]

$$I_{на} = I_1 + I_2.$$

Ток $I_2$ определяется как $I_2 = \dfrac{U_{на}}{Z_{вх2}}$

где $Z_{вх2}$ – входное сопротивление четырехполюсника ответвления 2, которое определяется по выражению

$$Z_{вх2} = \frac{A_{02}R_ш + B_{02}}{C_{02}R_ш + D_{02}},$$

$A_{02} = A_2 + R_{сс}\,C_2$, $B_{02} = B_2 + R_{сс}\,D_2$, $C_{02} = C_2$, $D_{02} = D_2$ – коэффициенты общего четырехполюсника неконтролируемого ответвления.

Получим выражение зависимости входного сопротивления $Z_{вх2}$ от сопротивления стрелочных соединителей

$$Z_{вх2} = \frac{К_1}{К_2} + R_{сс}\,(К_1 = A_2R_ш + B_2,\ К_2 = C_2R_ш + D_2),$$

по которому можно вычислить значение *320*

Значение $I_2$ находим как $I_2 = I_{на} + I_1$.

Значения $I_{на}$ и $U_{на}$ можно найти из выражений

$$U = A_{на}U_{на} + B_{на}I_{на};\ I = C_{на}U_{на} + D_{на}I_{на};$$

$$U_{на} = \frac{UD_{на} - IB_{на}}{A_{на}D_{на} - B_{на}C_{на}};\quad I_{на} = \frac{UA_{на} - IC_{на}}{A_{на}D_{на} - B_{на}C_{на}},$$

где коэффициенты общего четырехполюсника ответвления «а» рассчитываются путем перемножения матриц коэффициентов входящих в его состав четырехполюсников аппаратуры питающего конца ($A_н$, $B_н$, $C_н$, $D_н$) и рельсовой линии ($A_а$, $B_а$, $C_а$, $D_а$).

Значение $I_1$ можно найти из выражения

$$I_1 = C_{01}U_р + D_{01}I_р,$$

где коэффициенты общего четырехполюсника ответвления 1 рассчитываются путем перемножения матриц коэффициентов входящих в его состав четырехполюсников аппаратуры релейного конца ($A_к$, $B_к$, $C_к$, $D_к$) и рельсовой линии ($A_1$, $B_1$, $C_1$, $D_1$).

Таким образом, приняв значение сопротивления поездного шунта равным нормативному, а также приняв значения других параметров рельсовой цепи (сопротивление балласта, сопротивление рельсовой линии, сопротивление монтажных и соединительных проводов и др.) квазистационарными для момента вычислений, на основании измеренных значений напряжения и тока источника питания, тока на путевом приемнике можно определить значение сопротивления стрелочных соединителей, не обтекаемых сигнальным током в нормальном режиме. Например, увеличение значения сопротивления $R_{сс}$ в два раза указывает на полный обрыв одного из двух соединителей. Анализ динамики изменения значений $R_{сс}$ дает возможность выявить постепенную деградацию нормального (исправного) состояния соединителей (частичный обрыв, повышение переходного сопротивления в местах крепления к рельсам), что может быть использовано для организации технического обслуживания рельсовых цепей «по фактическому состоянию». Автоматизация процессов принятия решений наряду с интеграцией различных источников информации в единое информационное пространство [2] является важным фактором для решения задачи сокращения непроизводительных затрат ресурсов и времени в процессе технической эксплуатации рельсовых цепей.

**Список литературы**

1 Рельсовые цепи магистральных железных дорог: справочник / В. С. Аркатов, Н. Ф. Котляренко, А. И. Баженов, Т. Л. Лебедева ; под ред. В. С. Аркатова. – М. : Транспорт, 1982. – 360 с.

2 **Пультяков, А. В.** Пути повышения эффективности технической эксплуатации устройств железнодорожной автоматики и телемеханики при внедрении мобильных рабочих мест / А. В. Пультяков, В. А. Аношин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2024. – № 1 (81). – С. 138–149. – DOI: 10.26731/1813-9108.2024.1(81).138-149.

УДК 004.9:616.831-073

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ И ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ДОСТОВЕРНОСТИ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ АНАЛИЗА ГЛАЗОДВИГАТЕЛЬНЫХ НАРУШЕНИЙ

*А. В. ШКРАБОВ*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск*

Современная неврология сталкивается с возрастающей распространенностью нейродегенеративных заболеваний, что актуализирует проблему совершенствования методов их диагностики. В контексте развития медицинской кибернетики особый интерес представляют автоматизированные системы анализа глазодвигательных нарушений как индикаторов функционального состояния

ЦНС. Обеспечение информационной надежности и диагностической достоверности таких систем представляет собой актуальную важную задачу на стыке медицины и информационных технологий.

Анализ глазодвигательной активности основан на концепции зрительной системы как «окна в мозг», поскольку окуломоторная функция находится под строгим контролем сложных нейронных сетей, включающих корковые и подкорковые структуры. Нарушения глазодвигательной функции, проявляющиеся в виде патологических нистагмоидных движений, отклонений траекторий саккад и плавного слежения, представляют собой важные неврологические маркеры поражения различных отделов ЦНС. Современные исследования демонстрируют, что анализ параметров глазодвигательной активности позволяет неинвазивно оценивать функциональное состояние когнитивных и моторных систем мозга. В частности, нарушения саккадического контроля ассоциированы с патологией лобных долей и базальных ганглиев, тогда как изменения плавного слежения отражают дисфункцию теменно-затылочных областей и мозжечка. Технической основой автоматизированных систем регистрации выступают специализированные видеоочки Френзеля, обеспечивающие высокоточный захват окуломоторной активности. Конструктивные особенности современных моделей, таких как VF 405, предусматривают использование от одной до двух камер, однако для обеспечения надежности данных при различных анатомических особенностях пациентов оптимальным является применение систем с 4–6 камерами. Такая конфигурация позволяет минимизировать влияние факторов, связанных с наплывающими веками и изменением направления взора, что существенно повышает достоверность регистрируемых параметров. Критически важным аспектом информационной надежности является обеспечение стандартизованных условий освещения, поскольку вариабельность светового потока может приводить к значительным погрешностям в определении позиции зрачка. Для решения этой проблемы применяются специализированные осветительные системы со стабилизированными параметрами и алгоритмы компенсации бликов на основе нейросетевых технологий. Алгоритмическое обеспечение системы базируется на современных методах обработки изображений, где основное значение имеет процедура адаптивной пороговой бинаризации. Данная процедура включает построение гистограмм яркости для начальных кадров видеоряда с последующим сглаживанием методом скользящего среднего и определением первого локального минимума, который служит порогом бинаризации.

Математическая основа алгоритма описывается системой уравнений, где выделение области зрачка осуществляется через определение наибольшего кластера связанных черных пикселей по принципу 4-связности. Вычисление координат центра зрачка производится через взвешенное усреднение позиций кластера с учетом пространственного распределения пикселей. Сравнительный анализ с традиционными подходами, основанными на преобразовании Хафа, демонстрирует преимущества предлагаемого метода в условиях реального времени, поскольку классические алгоритмы требуют значительных вычислительных ресурсов и демонстрируют низкую устойчивость при работе с видеопотоком. Обеспечение диагностической достоверности достигается за счет комплексного анализа множества параметров глазодвигательной активности, включая задержку, скорость, продолжительность, амплитуду и частоту саккад. Каждый из этих параметров имеет строгую нейрофизиологическую интерпретацию и коррелирует с функциональным состоянием конкретных мозговых структур. Например, анализ саккадических путей показывает, что произвольные саккады возникают в лобных областях и направляются к базальным ганглиям, тогда как рефлекторные саккады имеют прямой путь от зрительной коры к задней теменной коре. Верификация диагностической значимости системы осуществляется через сопоставление результатов видеоокулографии с данными традиционных методов диагностики, включая МРТ, ПЭТ, ОФЭКТ и генетические исследования. Магнитно-резонансная томография обеспечивает выявление характерных паттернов атрофии серого вещества, при этом современные протоколы включают T1-взвешенные изображения для точной вольюметрии, T2-взвешенные и FLAIR-последовательности для оценки состояния белого вещества. Позитронно-эмиссионная томография позволяет оценивать церебральный метаболизм глюкозы и изучать паттерны накопления патологических белков с помощью специфических лигандов. Генетические исследования, включающие полногеномное и экзомное секвенирование, направлены на выявление наследственных мутаций, ассоциированных с развитием нейродегенеративных патологий.

Особое значение для обеспечения диагностической достоверности имеет стандартизация диагностического протокола, который включает последовательную оценку положения головы и глаз-

ных яблок, медленных плавных следящих движений, саккад, фиксации взгляда, функции конвергенции и дивергенции, а также вестибулярных реакций. Каждый этап протокола имеет строгие критерии оценки и временные параметры, что минимизирует субъективность интерпретации результатов. Интеграция технологий машинного обучения позволяет автоматизировать процесс выявления патологических паттернов и повысить точность диагностики. Алгоритмы глубокого обучения анализируют комплекс параметров глазодвигательной активности и формируют интегральные биомаркеры для обнаружения множественных расстройств.

Важным аспектом информационной надежности является обеспечение кибербезопасности системы, включая защиту передаваемых данных, аутентификацию пользователей и контроль целостности информации. При работе с персональными медицинскими данными необходимо применение криптографических методов защиты и систем мониторинга несанкционированного доступа. Валидация системы проводится на репрезентативных выборках пациентов с различными нейродегенеративными заболеваниями, включая болезнь Альцгеймера, болезнь Паркинсона, прогрессирующий надъядерный паралич и другие формы деменций. Статистический анализ результатов валидации включает оценку чувствительности, специфичности и прогностической ценности метода в сравнении с клиническими стандартами диагностики. Перспективы развития системы связаны с интеграцией мультимодальных данных, когда результаты видеоокулографии дополняются информацией от других диагностических методов, что позволяет создавать комплексные диагностические профили пациентов. Дальнейшее совершенствование алгоритмов компьютерного зрения направлено на повышение устойчивости к артефактам, связанным с индивидуальными анатомическими особенностями пациентов, такими как птоз, анизокория и нарушения прозрачности оптических сред.

Разработка облачных платформ для распределенного анализа данных открывает возможности для создания масштабируемых систем скрининга населения. Особое внимание уделяется вопросам стандартизации и метрологического обеспечения измерительного тракта системы, включая калибровку видеоустройств и верификацию алгоритмов обработки на стандартизованных тестовых последовательностях. Опыт применения автоматизированных систем анализа глазодвигательных нарушений в клинической практике демонстрирует их высокую эффективность для доклинической диагностики и мониторинга течения нейродегенеративных заболеваний. Внедрение таких систем в рутинную клиническую практику требует решения организационных вопросов, связанных с обучением медицинского персонала и интеграцией в существующие диагностические процессы.

Экономическая эффективность метода определяется его неинвазивностью, возможностью массового скрининга и раннего выявления заболеваний, когда терапевтические вмешательства наиболее эффективны. Сравнительный анализ с традиционными методами нейровизуализации показывает преимущества видеоокулографии по критериям доступности, стоимости и возможности динамического наблюдения.

Обеспечение информационной надежности и диагностической достоверности в автоматизированных системах анализа глазодвигательных нарушений достигается за счет комплексного подхода, включающего совершенствование аппаратных средств, алгоритмов обработки данных и диагностических протоколов. Дальнейшее развитие этого направления открывает новые возможности для ранней диагностики и мониторинга нейродегенеративных заболеваний.

**Список литературы**

1 **Непрокин, А. В.** Алгоритм нахождения центра зрачка для систем видеонистагмографии / А. В. Непрокин, А. В. Горбунов, А. В. Солопахо, Е. Н. Туголуков // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – № 5 (ч. 2). – С. 214–218.

2 **Клюшников, С. А**. Глазодвигательные нарушения в диагностике и дифференциальной диагностике нейродегенеративных заболеваний / С. А. Клюшников // Вестник Российской военно-медицинской академии. – 2018. – № S3. – С. 57–59.

# 4 ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 628.16:519.876.5:004.89

## МНОГОФАКТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ СХЕМЫ ОЧИСТКИ ВОДЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

*Е. С. ВЕЛЮГО*
*Полоцкий государственный университет им. Евфросинии Полоцкой, г. Новополоцк, Республика Беларусь*

**Введение.** Повышение эффективности и снижение энергоёмкости процессов водоподготовки является актуальной задачей, особенно для малых систем [1–4]. Присутствие в воде соединений железа и аммонийного азота требует применения комбинированных технологических схем, управление которыми затрудняется наличием сложных, нередко нелинейных взаимосвязей между технологическими параметрами. Классические методы расчёта не всегда позволяют адекватно прогнозировать поведение системы при колебаниях состава исходной воды. В связи с этим применение методов математического моделирования, в частности машинного обучения, открывает новые возможности для построения адаптивных систем управления.

**Материалы и методы.** Исследования проводились на действующей станции обезжелезивания в Витебской области. Первая ступень включала два напорных производственных фильтра диаметром 0,5 м с загрузкой из сорбента *АС* (высота слоя – 1,0 м, скорость фильтрации – 6,25 м/ч). Вторая ступень представляла собой пилотный фильтр диаметром 0,25 м, загруженный цеолитом «*Цеол*» (объём – 25 л, скорость фильтрации – 10 м/ч). Перед каждой ступенью вода насыщалась кислородом в аэрационной колонне.

Многофакторный эксперимент проводился с варьированием ключевых технологических параметров: исходных концентраций загрязнителей (общее железо – $X_1$, аммонийный азот – $X_2$) и интенсивности аэрации на I ($X_7$) и II ($X_8$) ступенях. Целевыми откликами служили остаточные концентрации после второй ступени ($Y_{11}$ – железо, $Y_{12}$ – аммонийный азот). Для комплексного анализа дополнительно контролировались 16 выходных параметров, отражающих физико-химическое состояние воды после каждой ступени: содержание основных загрязнителей (Fe, $NH_4^+$), окислительно-восстановительный потенциал (*Eh*), кислотность (pH), концентрация растворённого кислорода, перманганатная окисляемость, а также кинетические характеристики процессов.

Отбор проб выполнялся после выхода системы на стационарный режим; все измерения проводились в трёхкратной повторности. Общий объём собранного датасета составил 29 экспериментов.

Для построения моделей использовались методы полиномиальной регрессии второго порядка, регуляризованные алгоритмы (*ElasticNet, Lasso*) и современные методы машинного обучения (*CatBoost, XGBoost, Gaussian Process Regression – GPR, Support Vector Regression – SVR*). Точность оценивалась по коэффициенту детерминации ($R^2$). Обработка данных и моделирование выполнялись в среде Python с использованием библиотек *scikit-learn, CatBoost* и *GPy*.

**Результаты и их обсуждение.**

Основной задачей моделирования было выявление зависимости остаточных концентраций общего железа ($Y_{11}$) и аммонийного азота ($Y_{12}$) на выходе из установки от исходных показателей воды ($X_1$, $X_2$) и параметров аэрации на ступенях I (V1) и II (V2). Сравнительный анализ точности апробированных моделей позволил сделать следующие выводы.

Наивысшую прогностическую точность ($R^2 \approx 1{,}000$) продемонстрировали алгоритмы машинного обучения, такие как *CatBoost* и регрессия гауссовских процессов (*GPR*). Это свидетельствует об их исключительной способности улавливать сложные нелинейные взаимосвязи в данных, что делает их предпочтительными для прогнозирования в условиях резких колебаний состава исходной воды.

Наиболее сбалансированным соотношением прогностической способности и интерпретируемости обладали модели полиномиальной регрессии второго порядка и *ElasticNet* с полиномиальными признаками (*ElasticNet-poly*). Несмотря на несколько меньшую точность ($R^2$ = 0,758…0,967) по сравнению с алгоритмами машинного обучения, их ключевое преимущество заключается в возможности содержательной интерпретации коэффициентов, что критически важно для анализа механизмов процесса и принятия оперативных технологических решений.

Были получены итоговые уравнения регрессии, связывающие остаточные концентрации загрязнителей с исходными параметрами и режимными факторами.

Для железа общего $Y_{11}$ ($R^2$ = 0,9407):

$$Fe_2 = 0{,}2859 - 0{,}0639\cdot Fe_0 - 0{,}0416\cdot (NH_4^+)_0 - 0{,}0325\cdot V1 + 0{,}0207\cdot V2 + 0{,}0067 \times \quad (1)$$
$$\times Fe_0^2 + 0{,}0104 Fe_0\cdot (NH_4^+)_0 - 0{,}0007 Fe_0\cdot V1 + 0{,}0013 Fe_0\cdot V2 + 0{,}0012\cdot (NH_4^+)_0^2 +$$
$$+ 0{,}0044\cdot (NH_4^+)_0\cdot V1 - 0{,}0126\cdot (NH_4^+)_0\cdot V2 + 0{,}0025\cdot V1^2 + 0{,}0040\cdot V1\cdot V2 - 0{,}0028\cdot V2^2.$$

Для азота аммонийного общего $Y_{12}$ ($R^2$ = 0,9258):

$$(NH_4^+)_2 = 1{,}9488 + 0{,}0071\cdot Fe_0 + 0{,}1762\cdot (NH_4^+)_0 - 0{,}4579\cdot V1 - 1{,}8941\cdot V2 - 0{,}0154 \times \quad (2)$$
$$\times Fe_0^2 + 0{,}0153\cdot Fe_0\cdot (NH_4^+)_0 + 0{,}0177\cdot Fe_0\cdot V1 + 0{,}0146\cdot Fe_0\cdot V2 + 0{,}0029\cdot (NH_4^+)_0^2 -$$
$$- 0{,}0074\cdot (NH_4^+)_0\cdot V1 + 0{,}0042\cdot (NH_4^+)_0\cdot V2 + 0{,}0591\cdot V1^2 + 0{,}0020\cdot V1\cdot V2 + 0{,}6982\cdot V2^2.$$

Критическая важность учета нелинейности была подтверждена низкой эффективностью простых линейных моделей. *ElasticNe*t (без полиномиальных признаков) и *eLasso* показали неудовлетворительные результаты для моделирования железа ($R^2$ = 0,432 и 0,417 соответственно), что однозначно указывает на невозможность адекватного описания сложных окислительно-сорбционных процессов линейными зависимостями. Таким образом, для решения различных практических задач целесообразно применение разных моделей: для задач оперативного управления, где важна интерпретируемость – полиномиальных уравнений и *ElasticNet-poly*; а для прогнозирования в условиях нестабильного состава воды и разработки стратегий оптимизации – алгоритмов *CatBoost* и *GPR*.

Апробация методики на действующем объекте в течение трех лет подтвердила ее эффективность: снижение концентрации остаточного железа на 35–45 % по сравнению с одноступенчатой схемой; сокращение энергозатрат на 15–20 % за счет оптимизированного дозирования аэрации; обеспечение стабильного качества очищенной воды при колебаниях состава исходной воды. Разработанный программный оптимизатор позволяет оперативно рассчитывать рациональные режимы аэрации по текущим показателям качества исходной воды, обеспечивая остаточные концентрации в пределах ПДК (Fe ≤ 0,3 мг/л, $N\text{-}NH_4$ ≤ 1,5 мг/л). Полученные модели могут быть интегрированы в систему онлайн-мониторинга и автоматизированного управления (*SCADA*) станции.

**Заключение.** Проведенное исследование доказало высокую эффективность применения методов машинного обучения (*CatBoost, GPR*) для прогнозирования работы двухступенчатой схемы очистки воды. Сравнительный анализ показал, что для задач оперативного технологического управления, требующих интерпретации, рекомендованы полиномиальные модели и *ElasticNet-poly*, в то время как для прогнозирования в условиях резких колебаний нагрузки целесообразно применение алгоритмов *CatBoost* и *GPR*. Разработанная на основе верифицированных моделей методика адаптивного управления позволяет существенно повысить эффективность и ресурсосбережение процесса, что является основой для создания автоматизированных систем управления водоочистными сооружениями малой и средней производительности. Апробация подтвердила возможность снижения концентрации остаточного железа на 35–45 % и сокращение энергозатрат на 15–20 %.

**Список литературы**


1 **Propolski, D.** Resent advances in underground water deironing and demanganization: Comprehensive review / D. Propolski, V. Romanovski // Journal of Water Process Engineering. – 2025. – Vol. 70. – P. 107089.

2 **Клебеко, П. А.** Обезжелезивание подземных вод модифицированным огнеупорным шамотом / П. А. Клебеко, В. И. Романовский // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2021. – №. 4. – С. 135–146.

3 **Propolski, D.** Iron and Manganese Removal from Groundwater: Comprehensive Review of Filter Media Performance and Pathways to Polyfunctional Applications / D. Propolski, V. Romanovski // Environmental Science: Water Research & Technology. – 2025. – Iss. 11 – P. 2499 – 2515.

4 **Propolski, D. E.** Multifunctional Modified carbon for purification of groundwater / D. E. Propolski, V. I. Romanovski // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2020. – № 4. – С. 103–111.

УДК 699.844

# ШУМОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ: БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

*П. С. ВЕРБИЦКИЙ, Н. А. ПОДВОЙСКИЙ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Энергетическая безопасность является составляющей национальной безопасности, а экологическая безопасность – важнейшим фактором развития устойчивой жизнедеятельности. Энергетическая и экологическая безопасность приобрели первостепенное значение для Беларуси в связи с нестабильными климатическими условиями, длительным отопительным сезоном и значительным диапазоном колебаний температур, что напрямую отражается на энергопотреблении в зданиях. Более 35 % всех энергоресурсов потребляется жилым сектором Беларуси; доля тепловой энергии, потребляемой населением, достигает 41 % [1]. Одним из перспективных направлений, сочетающих экономические факторы, энергосбережение и экологию, является производство эффективных звукоизоляционных материалов и панелей. Это решает не только проблему шумового загрязнения, но и государственную проблему значительного увеличения энергопотребления зданиями и сооружениями, приводя ее в соответствие со стратегическими целями.

Принцип синергии заключается в том, что шум и тепло распространяются похожим образом. Материал, эффективно поглощающий звуковые волны (имеющий пористую волокнистую структуру), препятствует передаче тепла [2]. Применение таких материалов вносит прямой вклад в энергобезопасность через снижение теплопотерь зданий и сооружений. Применение акустических панелей в составе фасадов, внутренних перегородок и кровель снижает потребность зданий в отоплении зимой и кондиционировании летом. Шумоизоляционные материалы также используются для обшивки трубопроводов и промышленного оборудования, сокращая потери тепла на производстве.

Помимо снижения теплопотерь, применение шумоизоляции напрямую снижает пиковую нагрузку на энергосистему страны. Меньшая потребность в мощности для отопления и охлаждения позволяет оптимизировать работу ТЭЦ и, что особенно важно при вводе в строй БелАЭС, эффективнее использовать генерацию атомной станции, снижая необходимость в изменении мощности.

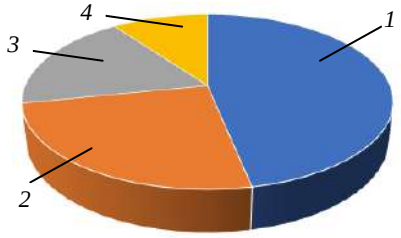



Рисунок 1 – Наиболее эффективные шумо- и теплоизоляционные материалы
*1* – каменная вата; *2* – пенополистерол; *3* – стекловата; *4* – другие материалы

С точки зрения экологической безопасности производство тепло- и шумоизоляционных материалов (рисунок 1) решает две основные задачи. Во-первых, это снижение шумового загрязнения, которое является одним из главных загрязнителей городов, ведущим к повышению уровня стресса и риску сердечно-сосудистых заболеваний у населения. Такие материалы устанавливают в жилых и офисных зданиях, вдоль автомобильных и железных дорог в качестве шумозащитных экранов и в производственных цехах для защиты работников. Во-вторых, экологичность производства. Перспективным направлением является использование панелей из древесных отходов, вторичного текстиля и др. [3]. Перспективной разработкой Республики Беларуси являются льняные утеплители и шумоизоляторы. Они полностью биоразлагаемы и безопасны. Использование местных материалов также сокращает логистические расходы и выбросы $CO_2$ от транспорта.

Помимо использования древесных отходов и вторичного текстиля, белорусские предприятия внедряют технологии переработки отходов полимеров в звукопоглощающие материалы, а также используют отходы сельского хозяйства (солому, лён и др.). Это не только решает проблему утилизации, но и создает добавленную стоимость [4].

Ряд предприятий Беларуси выпускает продукцию, соответствующую требованиям энерго- и экобезопасности (ОАО «Гомельстройматериалы», ОАО «БелЗТИ», ООО «Акотерм Флакс» и др.). Предприятие «Гомельстройматериалы» выпускает широкий спектр продукции, включая плиты теплоизоляционные из минеральной ваты под торговой маркой «БЕЛТЕП», а также блоки из ячеистого бетона, силикатные камни и керамические кирпичи [5].

Государственная поддержка отрасли проявляется через программы энергосбережения, требования зеленого строительства и стимулирование производства с использованием местных возобновляемых ресурсов [6].

В последнее время всё большую популярность набирает напыляемый пенополиуретан (ППУ). Его главное преимущество – технология нанесения. Материал напыляется на поверхность из раствора, вспенивается и застывает, образуя сплошной бесшовный слой. ППУ обладает очень низкой теплопроводностью (0,019–0,035 Вт/(м·К)), высокой адгезией к большинству материалов и хорошими гидроизоляционными свойствами. Он также обеспечивает хорошую звукоизоляцию. Из недостатков можно отметить необходимость специального оборудования для нанесения покрытия и уязвимость к ультрафиолетовому излучению.

В таблице 1 приведено сравнение наиболее эффективных применяемых материалов.

*Таблица 1* – **Сравнительные характеристики перспективных изоляционных материалов**

| Материал | Принцип действия | Преимущества | Недостатки |
|---|---|---|---|
| Минеральная вата | Удержание воздуха в пористой структуре волокон | Хорошая тепло- и звукоизоляция, негорючесть, доступность | Энергоемкое производство, требует защиты от влаги |
| Льняные утеплители | Натуральные волокна образуют пористую структуру | Полная биоразлагаемость, безопасность для здоровья, использование местного сырья | Ограниченная влагостойкость, может быть дороже синтетических аналогов |
| Напыляемый ППУ | Создание бесшовного герметичного слоя при напылении | Отличная адгезия, гидроизоляция, низкая теплопроводность, бесшовность | Требует спецоборудования, дорогой, разрушается под УФ-излучением |
| Материалы на основе вторичных ресурсов | Переработка вторичных ресурсов в волокнистые плиты | Решение проблемы утилизации отходов, создание добавленной стоимости | Технологическая сложность, необходимость сортировки и подготовки сырья |
| Аэрогели | 99 % воздуха | Сверхнизкая теплопроводность, малая толщина (высокая эффективность) | Очень высокая стоимость |

Перспективными новыми разработками являются аэрогели и вакуумные изоляционные панели. Аэрогель содержит 99 % воздуха и обладает низкой теплопроводностью. Вакуумные панели работают по принципу термоса, где вакуум препятствует передаче тепла. Эти материалы имеют высокую стоимость и применяются в основном там, где критически важен каждый сантиметр пространства, но их потенциал огромен.

Таким образом, производство шумоизоляционных материалов и панелей вносит вклад в решение макроэкономических и государственных задач. В контексте энергетической безопасности оно является важным элементом программы по энергосбережению, снижая потребление импортируемых энергоносителей через повышение эффективности зданий и сооружений. Решением проблемы шумового загрязнения может быть разработка материалов на основе возобновляемого сырья и переработки отходов, что значительно уменьшает нагрузку на окружающую среду. Дальнейшее развитие данного направления, ориентация на инновационные и зеленые технологии позволят Беларуси не только укреплять собственную безопасность, но и занимать устойчивые позиции на международном рынке экологически чистой строительной продукции.

**Список литературы**

1 Комплексный подход к повышению энергоэффективности домов в районах Беларуси // UNDP Беларусь. – URL: https://www.undp.org/ru/belarus/press-releases/kompleksnyy-podkhod-k-povysheniyu-energoeffektivnosti-domov-v-rayonakh-belarusi (дата обращения: 22.08.2025).

2. Пористые звукопоглощающие материалы // Труды ВИАМ. – URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=970 (дата обращения: 22.08.2025).

3 **Ефимчик, К. В.** Рециклинг полимерных композиционных материалов: современное состояние и перспективы развития (обзор) / К. В. Ефимчик, Е. Ф. Кудина // Горная механика и машиностроение. – 2023. – № 2. – С. 75–86.

4 Льняная теплоизоляция Акотерм Флакс // Акотерм. – URL: https://akoterm.com/ru/products/plity-akoterm-flaks/ (дата обращения: 22.08.2025).

5 Гомельстройматериалы // Гомельстройматериалы – производственная компания. – URL: https://oaogsm.by/ (дата обращения 22.08.2025).

6 Государственная программа «Энергосбережение» на 2021–2025 годы (в редакции постановления Совета Министров Респ. Беларусь от 28.12.2023 г. № 959) // Департамент по энергоэффективности. – URL: https://energoeffect.gov.by/programs/20210302_program/program-2021-2025-687-2 (дата обращения: 22.08.2025).

УДК 631.879.2:712.423

# ВЫРАЩИВАНИЕ РУЛОННЫХ ГАЗОНОВ С УДОБРЕНИЯМИ НА ОСНОВЕ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД

*Р. Н. ВОСТРОВА*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

*А. Н. ПЕХОТА*
*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

*В. А. МАЛОФЕЙ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Быстрое озеленения любых территорий можно удобно и эффективно осуществить, используя рулонный газон. Так как создание посевного газона довольно трудоёмкое мероприятие, не всегда дающее ожидаемый результат, использование рулонного газона – гарантированное долговечное покрытие, которое можно использовать в зеленом строительстве города [1].

Один квадратный метр газона за сезон может выделить в 2–3 раза больше кислорода, чем такое же пространство, покрытое взрослыми деревьями, задерживает столько же пыли, как такая же площадь, покрытая смолой. Трава задерживает пыли в 3–6 раз больше, чем голая земля. Травяной покров поглощает пыль, выхлопные газы и тяжёлые металлы.

Гектар травы в год поглощает тонну углерода от разложения 2400 м$^3$ углекислого газа. Зелёные зоны в виде парков и скверов очень хороши в борьбе с шумом, хороший газон может задержать около 6 дБ шума.

В жару поверхность газона остаётся прохладной (на 5–8 °С ниже асфальта), поглощает солнечное излучение, снижая эффект «городского теплового острова». Почва под газоном удерживает влагу и замедляет испарение, газон снижает риск эрозии и размывания почвы, способствует естественному увлажнению воздуха.

Газоны являются наиболее простым, легким, экономичным и общедоступным способом озеленения, устройство и содержание единицы их площади значительно дешевле устройства и содержания такой же единицы площади любого вида мощения улиц и внутриквартальных территорий. Стоимость ухода за газоном в течение круглого года, включая внесение удобрений, поливку и подсев семян, обходится населенному пункту в 8–10 раз дешевле, чем ручная уборка такой же площади любого вида покрытия [1].

Первыми стали использовать этот метод озеленения канадцы. Технологии выращивания газонов в настоящее время претерпели изменения. Для получения качественного газона необходимы абсолютно ровные, обширные территории плодородных земель с легкой водопроницаемой структурой. Для обработки и ухода за газоном, нужна специализированная техника: косилки, полевые и рулонные катки, подрезчики дёрна, широкозахватные дождевальные машины, погрузчики, а также удобрения, система орошения и штат квалифицированных специалистов и рабочих. Газонные травы не любят сильно- и среднекислые почвы (pH = 3,5…5,0).

До посева газонной травы почву необходимо вспахать на небольшую глубину и удалить сорняки, далее выполняется дискование, слой почвы рыхлится и перемешивается. Затем производится культивация: почва рыхлится и выравнивается, в подготовленную почву вносятся минеральные удобрения, для ускорения всходов используются фосфорные удобрения. Если почва бедна, необходимо внести органические удобрения. В этом случае осадок сточных вод (ОСВ) может быть использован вместо традиционного навоза или торфа.

В подготовленную почву до посева семян вносят минеральные удобрения. Чтобы ускорить появление всходов, используют фосфорные удобрения. Азотные составы применяют, чтобы обеспечить правильное развитие растений. При бедном составе почвы дополнительно используют органические удобрения. Также возможно внесение песка, торфа, коррекция состава почвы другими способами.

Для посева газонной травы требуется выбрать теплый день. Погода должна быть безветренной, не дождливой. Семена следует высевать равномерно, распределяя и строго дозируя их, что обеспечит одинаковую плотность всходов и поможет сформировать плотный дерн с равномерным по густоте травостоем. После посева семян грунт прикатывают специальными катками по всей площади газона, что помогает заделать семена в почву и охраняет их от птиц и ветра. Кроме того, семена прорастут быстрее.

Для обеспечения свойств рулонного газона можно использовать смеси семян, например, сорта мятлика лугового и овсяницы красной или смесь нескольких сортов лугового мятлика. Дерн должен быть нетребователен в уходе с красивым и густым травостоем, стойким к динамическим нагрузкам.

Выращивание рулонного газона продолжается 2–3 года. В этот период необходимо регулярно совершать полив, внесение удобрений, при этом учитывается состав почвы, ее влажность и возраст газона. Для газона очень важно равномерное орошение. В отсутствие естественных осадков поливать приходится ежедневно, чтобы поддерживать необходимый растениям уровень влажности почвы.

Появившимся всходам нужно дать окрепнуть, затем приступать к стрижке каждые 3 дня, чтобы стимулировать ветвление корневой системы, образующей дернину. Высоту травостоя следует поддерживать на уровне 5 см. Связность дернины газонных покрытий должна иметь прочностью от 2,5 и более Н/см$^2$, тогда при срезке трехсантиметрового слоя дёрна он не рвётся и не распадется на части, а газон в рулоне становится изумрудным ковром.

Перед срезкой дерн прикатывается для уплотнения верхнего слоя грунта. Срезку рулонных полос производят с помощью машины-подрезчика, снабженной двумя острыми ножами. Дерн срезается вместе с корневой системой и верхним слоем плодородной почвы, толщина дернины каждой полосы составляет до 2,5 см, а высота травы – до 5 см. Как правило, размер полос выдерживают по стандарту: длина 2 м, ширина 40 см, площадь рулона 0,8 м$^2$.

Отрезки аккуратно сворачивают в рулоны травой внутрь, размещают на специальных поддонах и обтягивают полимерной пленкой для устранения пересыхания корней. Жесткие временные рамки установлены с момента срезки газона до его укладки на новое место – это временной интервал не более 4 дней.

Казахские ученые провели исследования влияния различных доз иловых осадков на химический состав почвы, биологическую активность и зеленую массу газонных растений [2]. В ходе исследований установлено, что показатели нитратного азота и подвижного фосфора в почве находились в прямой зависимости от доз иловых осадков в разные периоды роста газона. При внесении 10 и 15 т/га иловых осадков микробиологическая активность почвы повышалась, наблюдалось увеличение содержания азота и фосфора в почве в 2–2,5 раза.

Целлюлозная активность также возрастала с увеличением дозы иловых осадков. Микробиологическая активность почвы достигла 80 % в варианте с внесением 15 т/га органического удобрения, в то время как показатель контрольного варианта без осадка составил всего 5 %. Среднее значение зеленой массы газонов для варианта 10 т/га было выше контроля в 2 раза, а 15 т/га – в 2,5 раза. По итогам анализа полученных результатов исследований установлено, что 10 и 15 т/га являются наиболее оптимальными для роста газонных растений.

В настоящее время ОСВ в Республике Беларусь вывозятся на захоронение, при этом бесцельно пропадают содержащиеся в них полезные природные компоненты, а также загрязняются дополнительные площади, что оказывает неблагоприятное воздействие на окружающую среду. Однако одним из наиболее перспективных методов использования ОСВ в нашей стране и за рубежом остается изготовление на его основе органического удобрения.

Компостирование отличается простотой, доступностью и достаточно низкой себестоимостью, что позволит сэкономить средства предприятий ЖКХ, затрачиваемые на транспортировку, размещение и захоронение отхода, а также получать высококачественный материал для удобрения и восстановления почв в зеленом строительстве населенных пунктов и городов.

**Список литературы**

1 **Ерема, И. А.** Газоноведение / И. А. Ерема, О. В. Созинов. – Гродно : ЮрСаПрінт, 2015. – 56 с.

2 **Бостубаева, М. Б.** Влияние различных доз иловых осадков на надземную массу газонных растений и качество почвы / М. Б. Бостубаева // Маусым: 3i: intellect, idea, innovation – интеллект, идея, инновация. – 2023. – № 2. – С. 87–95.

УДК 628.381.1:625

# ОСАДКИ СТОЧНЫХ ВОД В ЗЕЛЕНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРАСС

*Р. Н. ВОСТРОВА*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

*А. Н. ПЕХОТА*
*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

*В. А. МАЛОФЕЙ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

На иловых картах очистных сооружений крупных городов складируется огромное количество осадков сточных вод, что требует поиска эффективных направлений их экологически безопасного размещения в окружающей среде.

В настоящее время такой же актуальной проблемой является укрепление откосов автомобильных и железных дорог для предотвращения их разрушения под воздействием таких факторов, как ветровая эрозия, атмосферные осадки, воздействие грунтовых вод, а также вибрации от движения транспорта.

Одним из способов стабилизации откосов является экологически чистый, устойчивый и эффективный способ – это биотехническое укрепление, включающее использование растительности для защиты от размывов и эрозии. Используя корневую систему растений, можно создать естественную армирующую сетку, способную стабилизировать частицы почвы, увеличить ее водопроницаемость, улучшить ее дренаж, снизить давление влажной почвы на откосы. Риск поверхностной эрозии откосов также снижается, так как растения защищают откос от прямого воздействия осадков и ветра.

Решить поставленную задачу можно, используя создание растительного покрова из растений с разветвленной корневой системой, применяя гидропосев – распыление смеси семян, удобрений и эмульсии на откосы, что позволяет более эффективно и быстро создать растительный покров. Предлагаемый метод обладает экологичностью, создавая благоприятный экологический баланс. Травяной покров откосов самовосстанавливается, улучшает внешний вид дорог и является, возможно, более экономичным по сравнению с традиционными инженерными методами укрепления откосов.

В течение трех лет научным коллективом кафедры «Экология и рациональное использование водных ресурсов» Белорусского государственного университета транспорта проводились исследования по выращиванию растений с применением осадка сточных вод (ОСВ) в качестве удобрений на гомельских очистных сооружениях, результаты которых указывают на то, что почва, удобренная ОСВ, дает возможность выращивать растения с более положительными характеристиками.

Анализ проведенных исследований для определения качественных характеристик ОСВ, хранящихся на иловых картах г. Гомеля, позволил сделать вывод, что содержание тяжелых металлов в возвратном иле на гомельских очистных сооружениях не превышает ПДК в Директиве 86/278/ЕС по охране окружающей среды, что подтверждает возможность их использования на территории Евросоюза.

Результаты исследований проб осадков сточных вод и проб сельскохозяйственных культур, выращенных на основе удобрения с применением ОСВ, свидетельствуют о том, что исследованные осадки соответствуют 2 группе по концентрации в них тяжелых металлов, что предусматривает возможность их использования в качестве удобрения под технические сельскохозяйственные культуры. Ни один из анализов не показал наличия тяжелых металлов, превышающего предельно допустимые концентрации в выращенных сельхозкультурах.

В состав ОСВ входит значительная доля органики, углеводы, жироподобные и белковые вещества сложного состава, на основании чего ОСВ можно использовать в качестве компонента при компостировании и создании удобрительных композиций в зеленом строительстве железных и автомобильных дорог.

Содержание элементов питания растений в ОСВ колеблется в широких пределах и определяется в основном составом и соотношением коммунально-бытовых и промышленных стоков, поступающих на очистные сооружения, и вида и степени обработки ОСВ.

*Таблица 1* – **Агрохимические показатели ОСВ [1]**

| Проба | Агрохимические показатели | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $K_2O$, мг/кг | $P_2O_5$, мг/кг | Ca, мг/кг | Mg, мг/кг | pH | Органическое вещество, % |
| Б-№ 6 | 705 | 8600 | 6073 | 608 | 7,58 | 51,5 |
| Б-№ 7 | 1581 | 8440 | 9239 | 919 | 7,09 | 26,7 |
| Б-с/х | 489 | 8400 | 15000 | 417 | 7,18 | 26,5 |

Основными его компонентами (80–85 %) являются углеводы, жироподобные и белковые вещества сложного состава. Углеводы в ОСВ представлены полисахаридами. Соединения органического происхождения в свежих осадках составляют 70–90 % общей массы сухого вещества. ОСВ содержат также значительное количество элементов питания растений, таких как азот, фосфор, калий, кальций. ОСВ после обезвоживания на иловых площадках не уступают по содержанию органического вещества некоторым видам органических удобрений (таблица 1) [1].

Содержание общего азота в различных видах ОСВ варьируется от 0,6 до 7,3 % от сухого вещества. Содержание валового фосфора в ОСВ в зависимости от вида и места их происхождения колеблется от 0,3 до 8,0 % от сухого вещества. Эти показатели несколько выше его содержания в навозе и в значительной степени определяет удобрительную ценность ОСВ. Калия в ОСВ содержится в среднем 0,2–0,6 % от сухого вещества, т. е. в несколько раз меньше, чем в традиционных органических удобрениях. Сравнительно высокое содержание калия имеется в активном иле (0,3–0,8 %). Содержание кальция в ОСВ обычно высокое. Средние показатели колеблются в пределах 2,4–3,0 % от сухого вещества, максимальные значения наблюдаются при обработке ОСВ известью. Магния в ОСВ содержится в среднем 0,1–1,7 %. На содержание кальция и магния способ очистки стоков сильного влияния не оказывает, но оно связано с содержанием сухого вещества в ОСВ.

При компостировании происходит обеззараживание осадка от патогенной микрофлоры и яиц гельминтов, снижение его влажности.

Кроме удобрительных свойств, ОСВ содержат долю тяжелых металлов, но на откосах автомобильных и железных дорог в плане содержания тяжелых металлов экологическая ситуация далека от идеальной (таблица 2).

*Таблица 2* – **Концентрация тяжелых металлов в ОСВ [1]**

| Проба | Концентрация тяжелых металлов, мг/кг | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Fe | Cd | Cu | Zn | Pb | Cr |
| Б-№ 6 | 0,013 | 5,47 | 585,77 | 704,75 | 80,64 | 172,84 |
| Б-№ 7 | 0,018 | 6,80 | 1064,53 | 798,93 | 457,74 | 259,87 |
| Б-с/х | 0,029 | 0,08 | 1260,28 | 924,66 | 357,32 | 270,80 |

Если судить о степени техногенного воздействия транспорта на окружающую среду в сравнении с вредом, наносимым при использовании ОСВ в качестве почвоулучшающих композиций для укрепления откосов травяным покровом, то положительных доводов будет больше в защиту газонного покрытия, продуцирующего кислород и препятствующего попаданию загрязненного грунта откосов в атмосферу и почву. Актуальной задачей в настоящее время является также разработка нормативной базы по использованию ОСВ в качестве почвоулучшающих композиций.

На основании анализа проведенных исследований можно сделать следующие выводы: органоминеральные удобрения на основе ОСВ могут быть применимы для выращивания травяного покрова на откосах автомобильных и железных дорог, что позволит восстановить почвы с необратимо нарушенным плодородным слоем в плодородную основу.

**Список литературы**

1 Анализ требований к составу и свойствам осадков сточных вод и разработка Технологического Регламента для использования осадков сточных вод очистных сооружений г. Гомеля в качестве удобрений : отчет о НИР / Белорус. гос. ун-т трансп. ; исполн.: Р. Н. Вострова, С. П. Мохарева. – Гомель, 2002. – 95 с.

УДК 543.3:628.35

# МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МАГНИТНОГО СОРБЕНТА ИЗ ОСАДКОВ ПРОМЫВНЫХ ВОД СТАНЦИЙ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ

*О. Н. ГОРЕЛАЯ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Отходы производства в настоящее время выступают одним из ключевых факторов, оказывающих значительное влияние на качество жизни в современном обществе. Важным положительным направлением является их включение в хозяйственный оборот, что позволяет не только снизить общий объем образующихся отходов и минимизировать их негативное воздействие на окружающую среду, но и рационально использовать неиспользуемое сырье, в том числе ценные полезные ископаемые.

Отходы, образующиеся на станциях водоподготовки в процессе промывки фильтров станций обезжелезивания, представляют перспективное сырьё наряду с ионообменными смолами и осадками коагуляции. Интерес к этому направлению обусловлен стабильным элементным составом данных отходов и отсутствием в них высокотоксичных веществ [1–3].

В данной работе в качестве железосодержащих прекурсоров для синтеза (методом экзотермического горения из растворов [5, 6]) использовались растворы кислотного (азотная кислота) выщелачивания железосодержащих осадков станций обезжелезивания. В качестве восстановителя использовались лимонная кислота, мочевина, глицин, гексаметилентетраамин с мольным соотношением «окислитель – восстановитель» равным 1. Смесь выпаривали и нагревали при 300, 400, 500, 600 и 700 °С для инициирования экзотермической реакции.

Электронный микроскоп является мощным аналитическим инструментом, в котором для получения изображений используют пучок электронов с высокой энергией вместо светового потока как в случае с оптическим микроскопом. Для получения максимального представления о морфологии новых образцов и их свойствах на сегодняшний день наиболее продуктивно используются сканирующий электронный микроскоп (СЭМ), энергодисперсионный рентгеновский спектрометр (ЭДС) и просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ). Сканирующий электронный микроскоп используется для получения увеличенного в миллионы раз изображения поверхности твердого тела.

Морфологию синтезированных магнитоадсорбционных материалов на основе FexOy исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM 7600F (JEOL, Япония) с полевой эмиссией (FESEM) с пространственным разрешением ~1 нм. Морфологические исследования FexOy-NPS проводились с увеличением до 25000 раз как минимум в 3 различных местах.

Морфологический анализ показал, что в процессе синтеза в основном образуются агрегаты первичных наночастиц (рисунок 1). При использовании глицина в качестве восстановителя структура приобретает четко выраженную пористость, характеризующуюся сочетанием микро- и нанопор, что потенциально повышает доступность активных центров для сорбции.

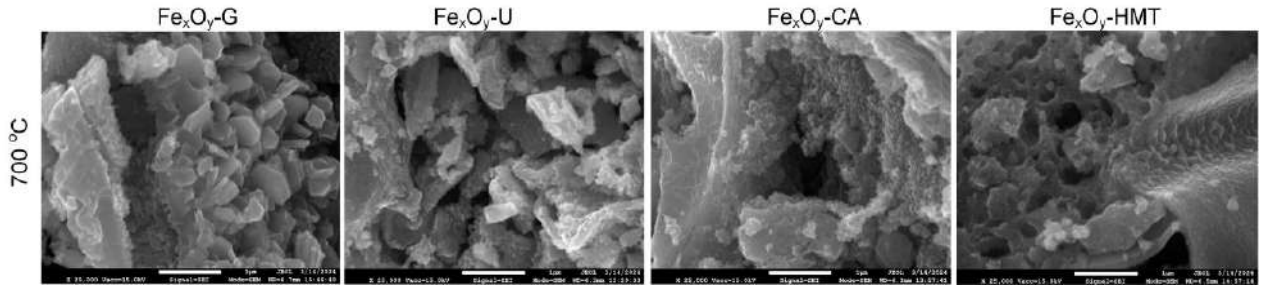



Рисунок 1 – Морфология полученных образцов магнитных сорбентов

Морфологический анализ магнитного сорбента, полученного из осадков промывных вод станций обезжелезивания, показал структуру с развитой поверхностью и однородным распределением

частиц. Исследования с помощью микроскопии выявили наличие агломератов и пористую текстуру, что способствует высокой сорбционной активности. Фазовый состав обеспечивает стабильность и магнитные свойства, важные для эффективного применения сорбента в процессах очистки воды. Результаты подтверждают перспективность использования данных осадков для создания эффективных магнитных сорбентов с заданными характеристиками.

**Список литературы**


1 Железосодержащие фотокатализаторы из осадков очистки промывных вод фильтров обезжелезивания / В. И. Романовский, Д. М. Куличик, М. В. Пилипенко, Е. В. Романовская // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2019. – № 4. – С. 18–22.

2 **Романовский, В. И.** Магнитные сорбенты для удаления нефтепродуктов из водных сред / В. И. Романовский, О. Н. Горелая, А. А. Хорт // Актуальные вопросы и перспективы развития транспортного и строительного комплексов : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2018. – С. 215–216.

3 **Горелая, О. Н.** Синтез наноструктурированных сорбентов нефтепродуктов из осадков очистки промывных вод фильтров обезжелезивания / О. Н. Горелая, Е. В. Романовская // Проблемы безопасности на транспорте : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2019. – С. 277–279.

4 **Горелая, О. Н.** Влияние условий синтеза на фазовый состав магнитных сорбентов из осадков станций обезжелезивания / О. Н. Горелая, Е. В. Романовская // Инновационные материалы и технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Минск : БГТУ, 2020. – С. 258–260.

5 Получение каталитических материалов для водоподготовки и очистки сточных вод из отходов станций обезжелезивания / В. И. Романовский, Д. М. Куличик, П. А. Клебеко, Е. В. Крышилович // Вода magazine. – 2017. – № 6 (118). – С. 12–15.

6 **Горелая, О. Н.** Магнитный сорбент из отходов водоподготовки для очистки нефтесодержащих сточных вод / О. Н. Горелая, В. И. Романовский // Вестник БрГТУ. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – 2020. – № 2. – С. 61–64.


УДК 628.355.5

## МЕРОПРИЯТИЯ ПО БОРЬБЕ С ПЕНООБРАЗОВАНИЕМ И ВСПУХАНИЕМ АКТИВНОГО ИЛА В АЭРОТЕНКАХ

*А. А. ГРИБ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Актуальной проблемой на многих очистных сооружениях является вспухание и пенообразование активного ила в сооружениях биологической очистки. Они могут значительно ухудшать эффективность очистки, приводить к дополнительным затратам и увеличению времени обработки. Процессы вспухания и пенообразования активного ила создают серьезную проблему при эксплуатации канализационных очистных сооружений и приводят к ухудшению качества очистки сточных вод по таким показателям, как взвешенные вещества и $БПК_5$, а также к выносу активного ила, в водные объекты. Несмотря на распространенность явления пенообразования и вспухания активного ила большинство очистных сооружений как России, так и Беларуси конструктивно не приспособлены к эффективной борьбе с этим явлением, а используемая технология зачастую не предусматривает проведения соответствующих мероприятий по предотвращению и ликвидации последствий пенообразования.

В данной работе рассмотрены причины и способы борьбы с такими явлениями как вспухание и пенообразование.

Вспухание активного ила представляет процесс изменения состояния биоценоза активного ила, при котором увеличивается значение илового индекса и ухудшаются его седиментационные свойства. Пенообразование активного ила представляет процесс развития всплывающей части активного ила в виде пены, отделяющейся от основной массы ила, которая находится в объеме сооружений.

Разработка мероприятий, позволяющих остановить развитие процессов пенообразования и вспухания и активного ила в аэротенках, напрямую зависит от причин возникновения (таблица 1) [4].

*Таблица 1* – **Причины и мероприятия для устранения процессов пенообразования и вспухания активного ила в аэротенках**

| Причины | Рекомендуемые мероприятия |
|---|---|
| Высокое значение илового индекса, развитие нитчатых бактерий и грибов, повышенная концентрация поверхностно-активных веществ (ПАВ), наличие токсинов в сточных водах | Обеспечение концентрации растворенного кислорода в аэробных зонах аэротенков:<br>1) при реализации только аэробных процессов не ниже 1,0 мг/л;<br>2) при реализации нитри-денитрификации (дополнительно химическое удаление фосфора) – 1,5–2 мг/л;<br>3) при реализации нитри-денитрификации с биологическим удалением фосфора – не ниже 2,0 мг/л |
| | Увеличить расход избыточного активного ила до максимально возможного значения, обязательный аэробный контроль возраста ила, чтобы он не был ниже необходимого для реализации процесса нитрификации |
| | Выполнить анализ динамики количественных и качественных характеристик сточных вод, поступающих на биологическую очистку; микроскопический анализ активного ила |
| | Определить причину развития процессов пенообразования и вспухания, провести дополнительные мероприятия в зависимости от причины развития данных процессов |

Для предотвращения вспухания и пенообразования активного ила также можно рекомендовать применение дополнительных методов:

– использование селекторов, которые позволяют регулировать состав активного ила, благоприятствуя росту «полезных» бактерий и уменьшая количество нежелательных нитчатых микроорганизмов, что улучшает процесс очистки и предотвращает вспухание активного ила. Данный метод является экологичным и перспективным, однако требует глубокого изучения, поиска и способов разведения культур [1];

– для борьбы с чрезмерным развитием нитчатых микроорганизмов на очистных сооружениях могут быть использованы сильные окислители (хлор и перекись водорода). Раствор с активным хлором вводится в иловую смесь либо разбрызгивается по поверхности сооружений, покрытых пеной [2]. Исследования [3] показали, что введение хлора в иловую смесь улучшает седиментационные свойства активного ила, но убивает его биоценоз;

– устройство носителей прикрепленных микроорганизмов в аэротенках для задержания нитей бактерий, которое позволяет снизить удельные нагрузки на активный ил, поддерживать стабильную дозу активного ила и повышает его устойчивость к залповому поступлению токсических веществ;

– использование специальных пеногасителей, обеспечивающих снижение илового индекса и пенообразования [2];

– использование синтетических высокомолекулярных анионных полимеров и их смеси с катионными полимерами, позволяющее улучшить осаждение ила. Вводятся они в иловую смесь после аэротенка или в центр вторичного отстойника. Данный метод является дорогостоящим.

Учитывая распространенность явления пенообразования на сооружениях биологической очистки сточных вод, следует учитывать технические и технологические средства для борьбы с пеной уже на стадии проектирования очистных сооружений.

Эффективное подавление процессов пенообразования и вспухания активного ила в аэротенках требует комплексного подхода, основанного на идентификации конкретных причин их возникновения и реализации соответствующего набора технологических и оперативных мероприятий. Основным условием для долгосрочной стабильной работы аэротенков является заблаговременное внедрение проектных решений, направленных на предотвращение развития данных негативных явлений.

**Список литературы**

1 **Жмур, Н. С.** Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками / Н. С. Жмур. – М. : АКВАРОС, 2003. – 512 с.

2 Причины развития и методы контроля пенообразования в аэротенках / А. Г. Дорофеев, М. Н. Козлов, В. Г. Асеева, М. В. Кевбрина // Водоснабжение и санитарная техника. – 2014. – № 5. – С. 63–69.

3 **Jenkins, D.** Manual on the causes and control of activated sludge bulking, foaming, and other solids separation problems / D. Jenkins, M. G Richard, G. T. Daigger. – Boca Raton : Lewis Publishers, 2004. – 236 c.

4 **Харькин, С. В.** Вспухание и пенообразование активного ила. Причины развития процессови мероприятия по снижению негативного результата / С. В. Харькин // Наилучшие доступные технологии. – 2021. – № 5. – С. 59–63.

УДК 621.541

# ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА В АВТОМОБИЛЯХ

*Р. М. ДАДАБОЕВ*
*Андижанский государственный технический институт, Республика Узбекистан*

К настоящему времени использование альтернативных источников энергии, заменяющих топливо, получаемое из нефтепродуктов, становится требованием времени. Основными причинами этого явля-ется сокращение запасов нефти и растущая потребность в энергетике в мире. В связи с этим целе-сообразно использовать широко распространенный в природе химический источник.

Применение водородного топлива создает условия для поддержания чистоты окружающей среды, так как в результате сгорания водорода из него выделяются только пары дистиллированной воды. Также налаживаются работы по безопасной транспортировке и хранению водорода. На большие рас-стояния его можно передавать по трубами. Передача водорода по трубам во много раз дешевле, чем передача электроэнергии в огромных электрических сетях [1].

Энергетические ресурсы для получения водородного топлива, как мы помним, также широко распространены в природе. Например, при получении углеводородного топлива жидкий углеводород и его газы могут быть использованы в качестве твердого топлива – нефти, воды и других энергетических ресурсов. Процесс получения водорода путем преобразования природного газа метана осуществляется следующим образом. Этот процесс в основном состоит из двух этапов получения чистого водорода.

На первом этапе происходит преобразование метана в трубчатую печь:

CH + HO = CO + 3H – 2064 кДж/моль

или

CH + CO = 2CO + 2H – 2483 кДж/моль.

На втором этапе угарный газ превращается в водяной пар:

CO + HO = CO + H + 41 кДж/моль.

Но основной упор делается на извлечение водорода из обычной воды [2].

Одним из наиболее технологически удобных способов получения водородного топлива из воды является разложение воды термокислотными способами. Удобство использования этих методов заключается в том, что для разложения воды можно использовать различную тепловую энергию. Например, солнечное тепло от тепла атомных реакторов, геотермальное тепло воды и т. д. Кроме того, для получения чистого водорода из воды разрабатываются комбинированные термоэлектро-химические сол-нечные лучи и фото-термохимические процессы. Положительные стороны разложения воды этими методами заключаются еще и в том, что в результате протекающих сложных реакций в окружающую среду выделяются только вода и кислород. Все химические процессы разложения воды протекают в замкнутом циркуляционном контуре, в этот контур вводят только воду и тепло высокого потенциала, из которого водород выделяет кислород и тепло.

Водород, обладая высокой температурой сгорания ( 120 МДж/кг), выделяет в 2,5–3 раза больше тепла, чем бензин (42 МДж/кг). Кроме того, когда водород используется в автомобильных двигателях, в составе горючих газов присутствуют только водяные пары. Это означает, что если бы транспортные средства полностью перешли на использование водорода, экологические проблемы крупных городов были бы решены положительно, но перед массовым применением в транспорте необходимо будет найти решение следующих проблем.

Необходимость очень больших затрат энергии для получения водорода электролизом из воды обусловлена необходимостью создания сверхмощных резервуаров для транспортировки и хранения водорода, организацией системы автозаправочных станций и т. д. Именно поэтому с начала XXI века США, Китай и ряд европейских стран вложили значительные средства в налаживание производства водородного топлива. Только для одного проекта водородной электростанции «FutureGen» правительство США выделило 1,2 млрд дол. США. Доллары были вложены, китайское государство вложило еще больше, чтобы построить аналогичную электростанцию. В настоящее время интенсивно работают над развитием водородной энергетики компании Sharp, Sanyo, Hitachi, Toyota, Panasonic.

В настоящее время огромное количество компаний-производителей легковых автомобилей в мире наладили производство автомобилей, работающих как на водородном топливе, так и на гибридном (бензин + водород) топливе. По оценкам немецких ученых, в середине XXI века автомобили, работающие на водородном топливе, составят 75 %, в то время как остальные 25 % будут использовать органическое топливо [2].

В этой сфере лидирующие позиции занимают компании Daimler и Honda из США, Shanghai из Китая и BMW из Германии. Например, автомобиль Honda FCX, работающий на полностью водородном топливе, способен развивать скорость до 160 км / ч и преодолевать 500 км с заполненным топливным баком. В его топливный бак помещается 5 кг сжатого водородного топлива. Двигатель может легко воспламениться даже при охлаждении до температуры –30 °С (рисунок 1).

*а*) *б*)

Рисунок 1 – Легковой автомобиль Honda FCX, работающий на водородном топливе, и бензозаправочная станция (*а*), а также автобус Citaro (*б*)

Автомобиль Honda FCX приводится в движение тремя электродвигателями. Когда один из них поворачивает передние колеса, остальные 2 соединяются со следующими колесами. Мощность переднего электродвигателя равна 80 кВт/ч, тогда как мощность остальных электродвигателей равна 25 кВт/ч (см. рисунок 1, *а*). Проект концерна Mercedes-Benz Mercedes Citaro заключается в производстве общественного транспорта, работающего на водородном топливе, для крупных городов. В настоящее время в мире функционирует 40 таких автобусов. Мощность электродвигателей автобуса составляет 250 кВт/ч. Он способен передвигаться с пассажирами до 40 человек и их грузом со скоростью до 80 км/ч. На каждые 100 км расходуется 25 кг водородного топлива. В топливный бак автобуса помещается 42 кг водородного топлива, и на этом топливе автобус проезжает 167 км (см. рисунок 1, *б*).

В настоящее время во всем мире производится 55–60 млн т водорода. В производственных районах водород в основном используется для изготовления азотных удобрений, низкочастотного преобразования сырой нефти в моторное масло. Сжатый водород используется для получения очень низких (минусовых) температур, а также в качестве топлива для криогенных ракетных двигателей. Ведется широкомасштабная научно-исследовательская работа по более широкому применению водородного топлива и его использованию вместо бензина.

Таким образом, использование водородного топлива на автомобильном транспорте является вопросом ближайшего будущего и может иметь большой технико-экономический и экологический эффект. Для этого потребуется найти решение ряда организационно-технических и технологических задач.

**Список литературы**

1 **Григорьев, А. А.** Синтетические углеводородные ракетные горючие (пути снижения стоимости синтина) / А. А. Григорьев // Катализ и нефтехимия. – 2005. – № 13. – С. 44–52.

2 **Носиров, И. З.** Озонная смесь для двигателя внутреннего сгорания / И. З. Носиров, А. А. Умаров // Вестник АСТА Туринского политехнического университета в городе Ташкенте. 2014. – № 4. – С. 55–59.

3 **Reza R. Jazar.** Vehicle dynamics. Theory and application / Reza R. Jazar. – London : Springer, 2008. – 586 p.

4 C01B3/02 (200:01), C01B/3/02 (2006.01). Способ и устройство для получения горючего газа, тепловой энергии, водорода и кислорода. Описание изобретения к евразийскому патенту 015081 B1 : заявл. 19.05.2009 : опубл. : 29.04.2011 / Е. В. Портнов. – 2011. – 6 с.

УДК 504.054:656

# ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЯЖЁЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ ТЕРРИТОРИЙ ВБЛИЗИ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

*М. А. ЖУРАВЛЕВА, Н. И. ЗУБРЕВ, С. М. КОКИН*
*Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва*

Одним из факторов, учитываемых при оценке качества городских почв, является их загрязнение тяжёлыми металлами (атомная масса выше 50 а. е. м.). Попадая в почву, тяжёлые металлы накапливаются, и их содержание в ней остаётся постоянным даже спустя долгое время после того, как сам источник загрязнения был устранён. В крупных городах основными загрязнителями являются, как правило, промышленные предприятия, объекты энергетического комплекса, транспорт, в том числе – и железнодорожный [1]. В рамках настоящей работы была поставлена задача оценки картины распределения металлов-загрязнителей вдоль полотна железной дороги и на прилегающих к ней территориях. Понятно, что количественные показатели по концентрации загрязнителей могут меняться в зависимости от района, в котором берутся пробы (в мегаполисе с богатой историей почв иногда даже возможны локальные «выбросы» данных), тем не менее, полученные результаты позволяют сделать некоторые обобщённые выводы.

Пробы грунта брались с участков вблизи главного хода Рижского, Курского и Казанского направлений МЖД в Северном и Юго-Восточном административных округах г. Москвы. Отбор почв проводился методом квадратов; после соответствующей подготовки пробы анализировались на содержание металлов методом атомно-эмиссионной спектроскопии (такой анализ обеспечивает необходимую точность измерений). Содержание железа определялось спектрофотометрическим и рентгенофлуоресцентным методами. Далее определялись коэффициенты концентрации $K_{Ci}$ металлов-загрязнителей ($K_{Ci} = C_i/C_{fi}$, где $C_i$ – содержание конкретного металла в почве, а $C_{fi}$ – его среднее фоновое содержание), а также суммарный показатель загрязнения почвы $Z_C = \sum_{i=1}^{n} K_{Ci} - (n-1)$, где $n$ – число рассматриваемых металлов-загрязнителей [2, 3].

Было установлено, что на обследованных участках в пробах грунта присутствуют железо, свинец, цинк, никель, медь, кобальт, молибден и хром, ванадий, локально встречается кадмий, отсутствует ртуть. Анализ значений $Z_C$ показал, что загрязнение тяжелыми металлами на этих территориях наиболее сильно проявляется в технической полосе железной дороги, почвогрунты которой можно отнести к «опасной» ($Z_C$ = 32…128) и даже (местами) к «чрезвычайно опасной» ($Z_C$ > 128) категории. О характере распределения металлов-загрязнителей вблизи прилегающих к дороге территорий дают диаграммы, представленные ниже.

Диаграмма на рисунке 1 показывает, как меняются концентрация $C_{Fe}$ железа (в граммах на килограмм пробы грунта) и суммарный показатель загрязнения почвы $Z_C$ *вдоль* рельсового полотна на отрезке железнодорожной линии между двумя остановочными пунктами Рижского направления МЖД.

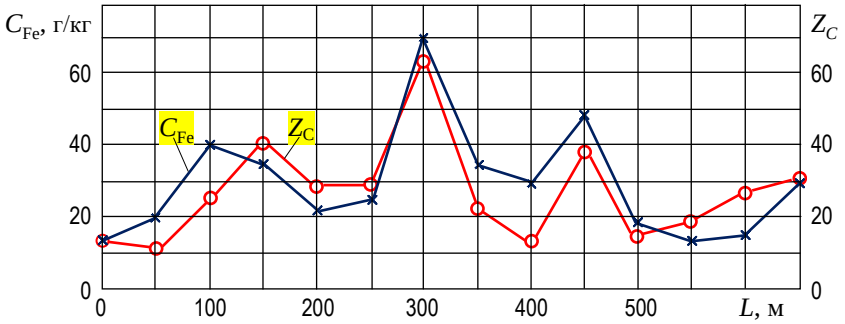



Рисунок 1 – Изменение концентрации $C_{Fe}$ железа и суммарного показателя загрязнения почвы $Z_C$ вдоль рельсового полотна в зависимости от расстояния $L$ от начала платформы первого остановочного пункта

Из рисунка следует:

– загрязнение железом носит неравномерный характер (в работе [4] показано, что это связано с наличием в местах, соответствующих максимумам зависимости $C_{Fe}$, участков торможения подвиж-

ного состава, на которых идёт активное трибологическое взаимодействие в состоящих из стальных сплавов системах «колесо – рельс» и «колодка – колесо»);

– на рассматриваемом отрезке железнодорожной линии суммарный показатель $Z_C$ меняется практически «синхронно» с изменением содержания железа вдоль полотна.

На рисунке 2 представлены диаграммы, которые показывают, как меняются коэффициенты концентрации $K_C$ таких загрязнителей, как Ni, Co, Cr, Cu, Pb, Zn, Sn, Mo *по мере удаления* от железнодорожного полотна.

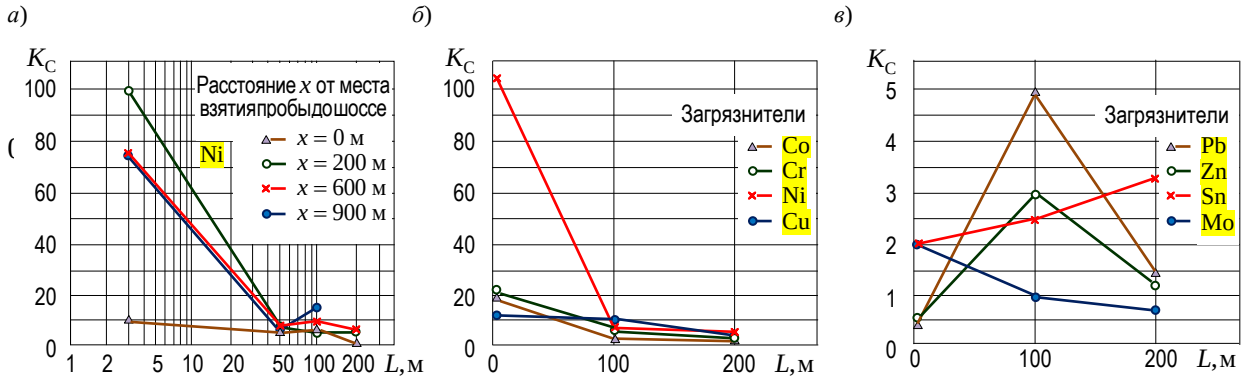



Рисунок 2 – Изменение коэффициентов концентрации $K_C$ металлов-загрязнителей в зависимости от расстояния $L$ от железнодорожного полотна:
*а* – пробы брались на разных расстояниях *x* от близлежащего автомобильного шоссе;
*б* и *в* – пробы брались на территории сортировочной станции

Из рисунка 2, *а* и *б* следует, что на рассматриваемых участках основным металлом-загрязнителем является никель. Источником загрязнения могут служить никель-кадмиевые щелочные батареи 42НК-125 или 21НК-125, НКТ-120 электровозов ВЛ10, ВЛ11, ВЛ80, ЧС2, ЧС2Т, ЧС7 на направлениях главного хода (см. рисунок 2, *а*) и щелочные батареи Nife-HI-15, 72КН150Р для маневровых тепловозов ЧМЭ3 (в районе сортировочной станции, (см. рисунок 2, *б*). Повышенное содержание свинца в середине сортировочной станции (см. рисунок 2, *в*) может быть связано с использованием в маневровых тепловозах ТЭМ-1, ТЭМ-2, ТЭМ-5, ТЭМ7А, ТЭМ18Г, ТГМ6А свинцово-кислотных батарей 32ТН-450.

Зависимость концентрации других металлов в почве от расстояния до железнодорожного полотна выражена слабо. По-видимому, это обусловлено тем, что данные металлы «поставляются» дорогой в меньшей степени, а так же с тем, что в этих случаях существенным оказывается вклад в общую картину других близлежащих поставщиков загрязнений – промышленных предприятий, автотранспорта, объектов коммунального хозяйства и т. д. [5]. Но, например, (см. рисунок 2, *а*) изменение расстояния от точки, где брались пробы, до близлежащего оживлённого шоссе практически не сказалось на характере зависимости $K_C(L)$. О том же говорят и результаты измерений, учитывающих расстояние до районной тепловой электростанции, расположенной в районе взятия проб. Это позволяет сделать вывод о том, что (по крайней мере, в рассмотренных случаях) основной вклад в загрязнение городских почв тяжелыми металлами в зоне, близкой к рельсовым нитям, связан именно с железной дорогой.

**Список литературы**


1 Экология транспорта и устойчивое развитие : учеб. / под общ. ред. И. В. Карапетянц, Е. И. Павловой. – М. : ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2019. – 370 с.

2 МУ 2.1.7.730-99. Гигиеническая оценка качества почвы населённых мест. Методические указания. – Введ. 05.04.1999. – М. : Минздрав РФ, 1999. – С. 9.

3 ГОСТ 17.4.4.02-84. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. – Введ. 01.01.1986. – М. : Стандартинформ, 2008. – 8 с. – URL: https://-ohranatruda.ru/upload/iblock/296/4294847763.pdf (дата обращения: 28.08.2025).

4 **Журавлева, М. А.** Загрязнение полосы отвода / М. А. Журавлева, Н. И. Зубрев, С. М. Кокин // Мир транспорта. – 2012. – № 3. – С. 112–118.

5 Влияние предприятий на распределение тяжелых металлов в санитарно-защитной зоне железнодорожной магистрали / М. А. Журавлева, Н. И. Зубрев, М. И. Панфилова, С. Ю. Ефремова // Экология и промышленность России. – 2018. – Т. 22, № 2. – С. 52–57.

УДК 628.4

# ПРОБЛЕМА УТИЛИЗАЦИИ ТОКСИЧНЫХ ОТХОДОВ АВТОМОБИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

*Н. Ж. КАБУЛОВА*
*Андижанский государственный технический институт, Республика Узбекистан*

В настоящее время, в целях поддержания стабильного состояния окружающей среды, остро стоит проблема утилизации промышленных отходов. Одним из таких отходов является шлам, который постоянно образуется на территориях окрасочных цехов автомобильной промышленности. Эта проблема актуальна и для одного из крупнейших заводов нашей страны – автомобильной компании «УзАвто» в Узбекистане. Однако вышеупомянутый вопрос утилизации шламовых отходов, которые, в свою очередь, являются токсичными, остается нерешенным и на этом предприятии.

Для начала разберемся, что такое шлам и как он образуется. Смесь краски и воды, образующаяся в окрасочно-сушильной камере, называется отходами лакокрасочных материалов.

Шламовые отходы из окрасочных цехов автомобилей образуются в процессах предварительной грунтовки кузова, покраски и очистки оборотной воды. Длина автомобильных окрасочно-сушильных камер обычно составляет от 15,5 до 45,5 м, и они включают в себя несколько роботизированных и ручных зон распыления. Эти системы контролируют температуру и влажность. Во время окраски в таких камерах определённое количество краски не прилипает к поверхности окрашиваемого автомобиля и образует мелкодисперсный туман в воздушном пространстве вокруг камеры. Этот туман необходимо удалить из воздуха. Для этого загрязнённый воздух поступает в специальный резервуар через систему подачи воздуха окрасочно-сушильной камеры. Через него проходит циркулирующая водяная завеса, которая затем попадает на фильтры отработанного воздуха.

Проходя через водяную завесу, воздух очищается от тумана и сбрасывается в поддон, обычно расположенный под окрасочно-сушильной камерой. Здесь частицы краски отделяются от воды, в результате чего вода перерабатывается, а частицы краски утилизируются в виде шлама.

В настоящее время Асакский автомобильный завод производит 253 421 автомобиль в год. Это означает, что ежегодно образуется 937 657,7 кг шлама.

Ученые из нескольких институтов развитых стран в настоящее время проводят целенаправленные исследования по переработке шламовых отходов автомобильных покрасочных цехов [1–4]. В частности, д-р Бхарати и Ч. Буранде, профессора кафедры химии Инженерного института имени Индиры Ганди (Индия), предложили несколько альтернативных решений по использованию шламовых отходов.

Все эти виды шламовых отходов в настоящее время помещаются в мешки и хранятся на специально отведенных для этого полигонах предприятия. На данный момент полигоны предприятия практически заполнены.

При изучении образующихся отходов ранее было выявлено, что в составе шламовых отходов присутствуют нерастворимые соли фосфатов железа и цинка. При этом в остаточной смеси присутствуют и некоторые органические компоненты. На заключительном этапе сухой остаток фосфатной смеси после многократного использования фильтруется, образуя влажную пастообразную светло-желтую массу. В этом состоянии, на открытом воздухе, масса превращается в желтый, без запаха, сыпучий порошок (сыпучий порошок без запаха) [5–8].

Целью нашей работы был поиск путей использования вышеупомянутых шламовых отходов, так как с ростом производства увеличится и объем этих отходов. В то же время их дальнейшее хранение на свалках может стать невозможным из-за отсутствия места для их захоронения. Поэтому мы начали работу по практическому использованию вышеупомянутых шламовых отходов путем их переработки на основе разработанной нами технологии. На этапах работы нами были разработаны технологии получения грунтовочных смесей, шпатлевок и лакокрасочных материалов различных цветов (за счет изменения состава образующихся отходов) для их применения в народном хозяйстве.

Важными компонентами красок являются пигменты и наполнители. В зависимости от природы их степень токсичности варьируется. Относительно безопасны диоксид титана, барит (сульфат бария), силикат кальция, карбонат кальция, силикат магния, слюда, оксид железа, некоторые органические пигменты.

Предельно допустимая концентрация в воздухе – 10 мг/м$^3$. Особый случай – кварц. Кварц существует в двух основных формах: кристаллической и аморфной. Уже много лет известно, что воздействие

высоких концентраций кварцевой пыли приводит к дегенеративному заболеванию лёгких – силикозу. Доказано, что кристаллический кварц может привести к раку лёгких у людей, вдыхающих его пыль в течение многих лет. Если в состав порошка для покрытия входит кристаллический кварц, это должно быть указано в техническом паспорте на материал и на упаковке с предупреждением о том, что данный продукт является потенциальным канцерогеном.

Считается, что если потенциально опасные частицы, такие как кристаллический кварц, заключены в смоляную оболочку, как это происходит в порошковых красках, они не причиняют никакого вреда.

Медицина придерживается иной точки зрения, и краски, содержащие такие вещества, считаются вредными.

Чаще всего покрытия отверждают в печах. Время отверждения обычно составляет 10 мин при 200 °С и 30 мин при 135 °С.

В этом случае возможно образование летучих побочных продуктов разложения. Поэтому важно, чтобы все печи имели хорошую вытяжку. Печи необходимо регулярно проверять на предмет надлежащего осушения и отсутствия вредных выбросов в рабочей зоне. Понятие утилизации промышленных отходов включает в себя целый комплекс существующих технологических процессов, которые требуют не только использования современного оборудования, но и специальных знаний, а также соблюдения требований законодательства в этой области. Не все промышленные предприятия могут решить вопрос утилизации отходов самостоятельно.

Сложность утилизации промышленных отходов данного типа заключается в том, что каждая категория лакокрасочных материалов требует особых условий и технологий для этого процесса. Кроме того, согласно требованиям законодательства в области экологии, все предметы и материалы, непосредственно контактирующие с ними, также подлежат переработке. Поскольку все краски представляют собой мелкодисперсные порошки, они вредны, как минимум из-за негативного воздействия пыли на организм.

В заключение хотелось бы отметить, что наша работа затрагивает проблему не только утилизации отходов, но и их переработки, что позволяет сохранить окружающую среду и приносят определенные экономические выгоды производителю.

**Список литературы**

1 Патент США № 5,254,263. Способ приготовления глиняного порошка и мастики из глины для красок и глиняного порошка, а также мастичная композиция, полученная из них : 19.10.1993 / M. J. Gerace, S. C. Gamboa, Y. S. Landaburu.

2 Оценка смесей краски и глины для адсорбции выбранных растворителей для красок / B. R. Kim, E. M. Kalis, T. J. Salmin // Environ. Eng. – 1993. – Vol. 122 (6). – P. 532–539.

3 Патент США № 5129,995. Процесс и устройство для пиролиза :14.06.1992 / K. B. Agarwal.

4 Патент США № 5,198,018. Процесс и устройство пиролиза : 30.03.1993 / K. B. Agarwal.

5 Технология и оборудование для нанесения полимерных покрытий в электростатическом поле / И. П. Верещагин, Л. Б. Котлярский, В. С. Морозов [и др.]. – М. : Энергоиздат, 1990. – 240 с.

6 **Яковлев, А. Д.** Порошковые краски / А. Д. Яковлев. – Л. : Химия, 1987. – 216 с.

7 Порошковые полимерные материалы и покрытия на их основе / А. Д. Яковлев, В. Ф. Здор, В. И. Каплан. – Л. : Химия, 1979. – 256 с.

8 **Белый, В. А.** Полимерные покрытия / В. А. Белый, В. А. Довгяло, О. Р. Юркевич. – Минск : Наука и техника, 1976. – 416 с.

8 **Негматов, С. С.** Технология получения полимерных покрытий / С. С. Негматов. – Ташкент : Узбекистан, 1975. – 232 с.

UDC 621.431.732

## USE OF A GASOLINE-HYDROGEN MIXTURE TO INCREASE THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A GASOLINE VEHICLE

*S. M. KADIROV,*
*Tashkent State Transport University, Uzbekistan*

*R. M. DADABOEV, S. S. ULKANOV*
*Andijan State Technical Institute, Uzbekistan*

**Introduction.** The suitability of any fuel for use in internal combustion engines is determined by its engine properties. As a hydrogen fuel, it has a number of important properties that distinguish it from other fuels. The use of hydrogen allows for a new approach to the organization of the work process of internal combustion engines, significantly increasing their fuel efficiency and reducing the amount of harmful

emissions from exhaust gases [7,9,12,14,15]. The characteristics of the operating process of hydrogen-powered engines are the concentration limits of the hydrogen-air mixture, the temperature and energy of combustion, the rate of combustion, the distance of the flame, the net calorific value per unit mass of fuel. Hydrogen is one of the most energy-efficient fuels, with a lower combustion heat value than petroleum fuels (42,700 kJ / kg for diesel and 43,930 kJ / kg for gasoline). kg) is almost 3 times higher, 120,000 kJ / kg. When hydrogen fuel is used in internal combustion engines, the engine power is significantly lower at the same size cylinder and compression ratio. To prevent this, the excess coefficient of air required for hydrogen combustion a> 1 must be high and the working mixture must be prepared outside. If the working mixture is prepared inside a cylinder, spontaneous combustion of hydrogen will occur. The combustion equation of hydrogen is given below [3–6].

$$2N_2 + O_2 = 2N_2O.$$

During the combustion of three newly charged gas molecules, two molecules of the combustion product are formed, as a result of which the moles of the combustion products $M_2$ decrease relative to the number of moles of the new charge $M_1$. Due to the low density of hydrogen in the stoichiometric composition of the mixture, the energy density of the hydrogen engine in which the internal mixture is formed is 15–20 % lower than that of a gasoline engine. Conversely, when an external mixture is formed, the energy density of the hydrogen engine increases by 12 %, allowing higher values of the average effective pressure of the nadduv engines to be achieved (up to 0,85 MPa) [1].

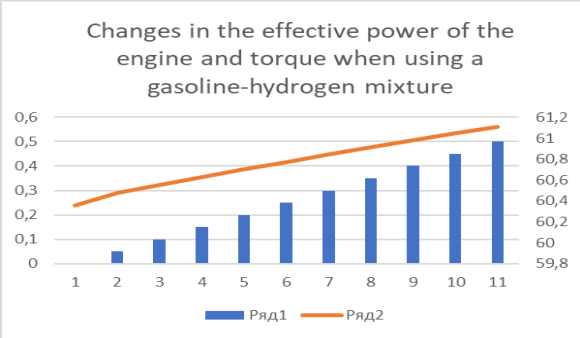



Figure 1 – As a result of adding 5–50 % hydrogen to the engine of the Spark car, its power and torque increase

**Method.** When hydrogen is used as a fuel in internal combustion engines, forms of mixture formation outside the cylinder and inside the cylinder can be used. The formation of the external mixture has the following indicators, the degree of homogeneity of the mixture is high, determined by the fuel properties such as temperature point and diffuse ion. Hydrogen is the best fuel in this regard because its boiling point is –253 °C and to exclude the presence of a liquid phase in the working mixture under any operating conditions of the engine; the diffusion coefficient of hydrogen is 8 times higher than that of gasoline. We can say that under atmospheric conditions, hydrogen is always in a gaseous state, which mixes well with air. These properties of hydrogen ensure the formation of a homogeneous mixture, and during the preparation of the mixture it increases the speed of its movement due to bending and contraction in the cooling and inlet pipes, and as a result does not form a film on the surface of the inlet pipes. If we use hydrogen fuel in internal combustion engines, it is definitely advisable to use the method of external preparation of the working mixture. Below we explain one such method [1, 2, 5, 6].

With the formation of the internal mixture (with the delivery of fuel to the compression line) the requirements for fuel in terms of the rate of formation of the gamagen mixture become more stringent, because the time allotted for the formation of the mixture is one how many times less. The properties of hydrogen meet these requirements better than those of liquid and gaseous hydrocarbon fuels. Hydrogen mixes quickly and qualitatively with air to form a combustible mixture in a very short time (less than 1 m / s).

Series-produced internal combustion engines can run on a mixture of gasoline and hydrogen with minor upgrades.

The addition of hydrogen fuel to gasoline fuel promotes the formation of highly active centers of chemical reactions (hydrogen atoms) in the cylinder, reducing the ignition energy and expanding the combustion limits of gasoline.

**Conclusion.** The addition of hydrogen to hydrocarbon fuels contributes to the formation of highly active chemical reaction centers (hydrogen atoms), reducing the ignition energy and expanding the combustion limits of gasoline, resulting in a significant improvement in the economic and environmental characteristics of the engine. With the addition of a relatively small amount of hydrogen, gasoline consumption is reduced by more than 1/3 while maintaining the maximum power of the main engine. Hydrogen-added engines belong to the group of low-toxic internal combustion engines and meet the highest requirements for exhaust gas emissions without the use of catalysts.

An increase in the combustion rate of a hydrogen-enriched gasoline-air mixture helps to increase the detonation resistance of gasoline: the addition of 5 % hydrogen increases the detonation resistance of gasoline by 8–10 times, and by 10 % – by 13–15 times. To increase the self-ignition resistance of gasoline by adding hydrogen, to achieve this goal to completely eliminate the addition of tetraethyl lead to gasoline and to reduce the emissions of lead compounds from engine exhaust gases. 'q allows you to do.

In general, we can conclude that hydrogen additives to gasoline are promising, especially in the first phase of the transition of the automotive industry to pure hydrogen. The addition of hydrogen does not require significant changes to the design of the fuel system, where the engine can only run on gasoline, which is important until the number of hydrogen filling stations reaches a sufficient level.

**References**


1 **Мишенко, А. И.** Применение водорода для автомобилных двигателей / А. И. Мишенко. – Киев : Наук. думка, 1984.

2 **Исматов, Ж. Ф.** Применение водорода в виде добавки автомобильных двигателях / Ж. Ф. Исматов, Ж. Х. Джалилов, А. Ж. Файзуллаев // Universum: технические науки : электрон. науч. журн. – 2021. – 4(85). – URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11523 (дата обращения: 26.11.2021).

3 **Дадабоев, Р. М.** Перспективы использования водородного топлива в автомобилях / Р. М. Дадабоев, С. Ж. Аббасов // Universum: технические науки : электрон. науч. журн. – 2021. – № 3(84). – URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11348 (дата обращения: 26.11.2021).

4 **Kodirov, S. M.** Ichki yonuv dvigatellari / S. M Kodirov. – Toshkent : Zarqalam, 2006. – 456 B.

5 **Колчин, А. И.** Расчет автомобилных и тракторных двигателей : учеб. пособие для ВУЗов / А. И. Колчин, В. П. Демидов. – 4-е изд., стереотип. – М. : Высшая школа, 2008. – 496 с.

6 **Крамаренко, Г. В.** Качество топлива и надежность автотракторных двигателей / Г. В. Крамаренко, О. У. Салимов, Н. Каримходжаев. – Ташкент : Фан, 1992. – 126 с.

7 Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей / под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглов. – 4-е изд. – М. : Машиностроение,1983. – 375 с.

8 Двигатели внутреннего сгорания. Системы поршневых и комбинированных двигателей / под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. – 3-е изд. – М. : Машиностроение, 1985. – 455 с.

9 **To'layev, B.** Ichki yonuv motorlari nazariyasi va dinamika asoslari / B. To'layev. – Toshkent : Fan va texnoligiya, 2010. – 294 b.

10 **Xudoyberdiev, T. S.** Traktor va avtomobillar ichki yonuv dvigatellarining tuzilishi va ishlashi / T. S. Xudoyberdiev– Toshkent : Barkamol fayz media, 2018. – 352 b.

11 Ichki yonuv dvigatellari. B 3 ч. / M. M. Fayziyev, M. M. Miryunusov, M. M. Orifjonov, B. I. Bozorov. – Toshkent : Turon-iqbol, 2007. – 608 b.

12 Учебное пособие по курсовому проектированию двигателей внутреннего сгорания : учеб. пособие В 3 ч. / И. В. Алексеев, С. Н. Богданов, Ю. В. Горшков [и др.]. – М. : МАДИ, ГТУ, 2006.

13 **Белов, П. М.** Двигатели армейских машин / П. М. Белов, В. Р. Бурячко, Е. И. Акатов. – М. : Изд-во Минобороны СССР,1971. – 512 с.

14 **Ефимов, М. А.** Основы теории двигателей внутреннего сгорания и трактора : учеб. / М. А. Ефимов. – Орѐл : Изд-во ОрѐлГАУ, 2015. – 432 с. – ISBN 978-5-93382-256.

15 **Karimov, U.** Traktor va avtomobil dvigatellari nazariyasi / U. Karimov. – Toshkent : Mexnat, 1989. – 232 b.


УДК 621.431.732

## ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ЖАРКО КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ УЗБЕКИСТАНА

*Н. КАРИМХОДЖАЕВ, Д. А. МОЙДИНОВ, Д. П. ЭРГАШЕВ*
*Андижанский государственный технический институт, Республика Узбекистан*

Автомобили и их двигатели при проектировании, как правило, рассчитываются на работу в условиях умеренного климата, хотя и природно-климатические условия, особенно экстремальные случаи, оказывают существенное влияние на надежность и износостойкость двигателей [1–4]. Ниже

представлены результаты работ, проведенных в Андижанском машиностроительном институте по изучению влияния природно-климатических условий эксплуатации на изменение технического состояния автомобилей в жарко климатических условиях Республики Узбекистан. Условия эксплуатации автомобилей в республике считаются экстремальными, и с высоким содержанием пыли в воздухе [1, 2].

В процессе эксплуатации двигатель соприкасается с окружающей средой, а его элементы взаимодействуют между собой, вследствие чего вызывается нагружение деталей, их взаимные перемещения, трение, нагрев, химические преобразования и изменения во время работы физических значений и конструктивных параметров: размеров, взаимного расположения деталей, зазоров и других величин. Техническое состояние двигателя или его агрегатов оценивается совокупностью изменяющихся свойств, характеризуемых текущими значениями конструктивных параметров: $x_1$, $x_2$, $x_3$, $x_п$. Например, размеры деталей цилиндро-поршневой группы, кривошипно-шатунного и газораспределительных механизмов и т. п.

Известно, что на изменение технического состояния двигателя основное влияние оказывают его конструкция, качество материалов, из которых изготавливаются детали, технология производства, качество топливо-смазочных материалов, условия работы двигателя и его деталей в эксплуатации, а также качество ТО и ремонта. В данной работе рассматривается влияние условий эксплуатации на изменение параметров технического состояния двигателей в Республике Узбекистан.

Исследования последних 10–15 лет показали, что одним из основных эксплуатационных факторов, влияющих на техническое состояние автотракторных двигателей, является атмосферная пыль, поступающая в двигатель вместе с потребляемым воздухом, топливом и маслом, а также через неплотности в местах соединения деталей. Пыль, попадая в двигатель, вызывает интенсивный абразивный износ его деталей. Недооценка этого фактора при проектировании, испытании и эксплуатации двигателя может привести к неоправданно высоким затратам вследствие быстрого ухудшения технического состояния и сокращения долговечности. Основное количество пыли попадает в двигатель через воздухоочиститель, и чем больше количество пыли попадает в двигатель, тем быстрее изнашиваются детали. С увеличением коэффициента пропуска пыли воздухоочистителем резко повышается интенсивность изнашивания цилиндров (рисунок 1).

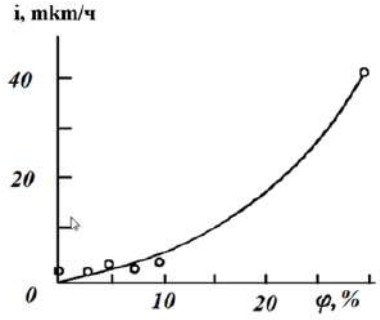


Рисунок 1 – Влияние коэффициента пропуска пыли (φ) воздухоочистителем на скорость изнашивания (*i*) цилиндров двигателя

Получено, что при работе двигателя на загрязнённом топливе существенно снижается его надёжность. Механические частицы, попадая с топливом в инжекционную систему питания и в карбюратор, вызывают отказ и изнашивание их деталей и агрегатов. Так, элементами, имевшими наибольшее число отказов, являлись инжектор и электрический бензонасос, средняя величина которых соответственно – 2,28 и 2,77 отказ/авт., а в карбюраторном двигателе до 47 % отказов элементов топливной аппаратуры происходило из-за загрязненности топлива. Это показывает, что техническое состояние двигателей тесно взаимосвязано с качеством топливо-смазочных материалов, дорожными, а также климатическими условиями эксплуатации. При высокой температуре и повышенной запыленности воздуха ускоряется износ деталей двигателя. Главным образом детали цилиндропоршневой группы интенсивно изнашиваются и в этих условиях превалирующее значение имеет абразивное изнашивание деталей [1, 2].

Какой бы совершенной не была конструкция двигателя, с увеличением продолжительности работы и истечением времени его техническое состояние претерпевает изменения и это приобретает особую значимость для климатических условий Республики Узбекистан.

Заключение.

1 Условия эксплуатации автомобилей в республике считаются экстремальными, с высоким содержанием пыли в воздухе.

2 Сильное влияние на интенсивность изменения технического состояния двигателей оказывает ззапылённость воздуха, загрязненность топлива и масла. Пыль, попадая в двигатель, вызывает интенсивный абразивный износ его деталей. Недооценка этого фактора при проектировании, испыта-

нии и эксплуатации двигателя может привести к неоправданно высоким затратам вследствие быстрого ухудшения технического состояния и сокращения долговечности.

3 На интенсивность изнашивания двигателей решающее влияние оказывают природно-климатические и дорожные условия. При высокой температуре и повышенной запыленности воздуха детали двигателя, главным образом детали цилиндропоршневой группы, интенсивно изнашиваются и в этих условиях превалирующее значение имеет абразивное изнашивание деталей.

4 Какой бы совершенной не была конструкция двигателя, с увеличением продолжительности работы и истечением времени его техническое состояние претерпевает изменения, и это приобретает особую значимость для климатических условий эксплуатации автомобилей в Республике Узбекистан.

**Список литературы**

1 **Каримходжаев, Н.** Основные причины, вызывающие износ деталей автотранспортных средств, эксплуатирующихся в различных природно-климатических условиях / Н. Каримходжаев, Т. О. Алматаев, Х. Р. Одилов // Universum: Технические науки : электрон. науч. журн. – 2020. – № 5 (74). – URL: http://7universum.com/ru/ tech/archive/item/9435 (дата обращения: 29.09.2025).

2 **Каюмов, Б. А.** Обеспечение надежности системы питания современных бензиновых двигателей в условиях жаркого климата / Б. А. Каюмов. – Андижан: Андижонашриёт-манбаа, 2019. – 104 с.

3 Конструктивные отличия и особенности Эксплуатации двигателей в экстремальных условиях / А. Ф. Шеховцев [и др.]. – URL : Kovsh.com/ library/ice/climatic conditions/ekspluadvigatelekstremuslov. 2019.

4 Recommendations for Cleaning and Pretreatment of Heavy Fuel Oil Alfa Laval. – London, 2012. – 124 p.

5 Эксплуатация двигателей в экстремальных условиях. – URL: Kovsh.com/ library/ice/climatic conditions/*eksplua dvigatel* ekstrem uslov. 2019_.

6 **Эфендиев, А. М.** Повышение надежности автотракторных двигателей в условиях пустынь с высокой концентрацией солесодержащей пыли в воздухе / А. М. Эфендиев. – Ташкент, 1994. – 180 с.

УДК 629.33

# ОПТИМИЗАЦИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ФОРМЫ КУЗОВА АВТОМОБИЛЯ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТРАНСПОРТА

*Б. А. КАЮМОВ, Д. П. ЭРГАШЕВ*
*Андижанский государственный технический институт, Республика Узбекистан*

**Введение.** Современные тенденции в автомобильной промышленности направлены на повышение энергетической эффективности и эксплуатационной безопасности транспортных средств. Аэродинамика автомобиля играет ключевую роль в достижении этих целей, так как сопротивление воздуха оказывает существенное влияние на расход топлива, динамику движения и надёжность конструкционных систем.

При движении транспортного средства около 25–40 % всей затрачиваемой энергии расходуется на преодоление аэродинамического сопротивления. Это означает, что совершенствование формы кузова является не только инженерной задачей, но и фактором обеспечения безопасности и экономии топлива.

Автопроизводители по всему миру (в том числе UzAuto Motors, Toyota, BMW, Tesla) активно применяют аэродинамическое моделирование на ранних этапах проектирования. В результате коэффициент сопротивления воздуха современных автомобилей снижается до рекордных значений $Cd$ = 0,20…0,25, что обеспечивает экономию топлива и снижение шумов.

**Методика исследования.** Исследования проводились в лаборатории кафедры «Автомобилестроение и транспорт» Андижанского государственного технического института.

Для экспериментальных измерений использовалась модель автомобиля в масштабе 1:10, испытанная в аэродинамической трубе при скоростях потока от 20 до 40 м/с. Измерялись перепады давления, распределение скоростей вдоль кузова и формировались карты распределения давления.

Дополнительно проведено численное моделирование с использованием программы ANSYS Fluent, реализующей метод CFD (Computational Fluid Dynamics). Применялась турбулентная модель

k–ε, позволяющая определить распределение давления, турбулентные зоны и точки отрыва потока. Для расчёта использовалась сетка из 1,2 млн элементов.

**Результаты.** По результатам экспериментов и моделирования установлены значения коэффициента аэродинамического сопротивления (*Cd*) и связанные с ними эксплуатационные показатели (таблица 1, рисунок 1).

*Таблица 1*

| Тип кузова | Коэффициент *Cd* | Расход топлива (л/100 км) | Оценка устойчивости |
|---|---|---|---|
| Седан | 0,34 | 8,1 | Высокая |
| Хэтчбек | 0,31 | 7,4 | Средняя |
| Оптимизированная форма | 0,27 | 6,9 | Очень высокая |

Как видно из таблицы 1, снижение коэффициента сопротивления с 0,34 до 0,27 позволяет уменьшить расход топлива на 10–15 %, улучшить устойчивость при боковом ветре и повысить надёжность систем охлаждения.

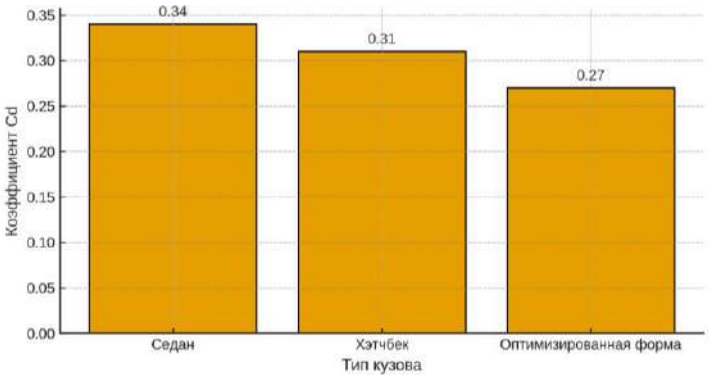



Рисунок 1 – Коэффициенты аэродинамического сопротивления различных типов кузовов

**Обсуждение.** Аэродинамическая оптимизация кузова положительно влияет не только на топливную экономичность, но и на безопасность движения. Неравномерное распределение давления на поверхности автомобиля вызывает боковые моменты, снижающие устойчивость на больших скоростях. При оптимальной форме кузова эти явления сводятся к минимуму.

Кроме того, уменьшение турбулентности под днищем снижает уровень шума и вибрации, улучшает акустический комфорт в салоне. Таким образом, аэродинамика напрямую связана с надёжностью и долговечностью элементов автомобиля – от подвески до систем охлаждения.

В качестве примера можно отметить: Tesla Model 3 имеет коэффициент *Cd* = 0,23, а Mercedes EQS – *Cd* = 0,20. Это рекордные показатели, обеспечившие не только экономию энергии, но и высокий уровень устойчивости на скоростях свыше 150 км/ч.

**Выводы.**

1 Аэродинамическая форма кузова оказывает прямое влияние на безопасность и надёжность транспортного средства.

2 Снижение аэродинамического сопротивления способствует экономии топлива, повышает устойчивость и снижает нагрузку на конструктивные элементы.

3 Комбинация численного CFD-моделирования и испытаний в аэродинамической трубе (с моделью в масштабе 1:10) является наиболее эффективным методом оптимизации формы кузова.

4 Внедрение аэродинамических исследований в отечественное автомобилестроение соответствует целям стратегии «Новый Узбекистан – 2030» и способствует устойчивому развитию транспортной отрасли.

**Список литературы**

1 **Селифонов, В. В.** Теория автомобиля / В. В. Селифонов, А. Ш. Хусаинов, В. В. Ломакин. – М. : МГТУ «МАМИ», 2007. – 102 с.

3 Влияние числа Рейнольдса на аэродинамическое сопротивление моделей / Д. А. Масленников, И. Е. Анучик, А. В. Тумасмов [и др.] //Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – С. 891–891.

4 **Евграфов, А. Н.** Аэродинамика автомобиля / А. Н. Евграфов. – М. : МГИУ, 2010.

5 **Ergashev, D.** CFD and Experimental Testing in Vehicle Aerodynamics / D. Ergashev // International Journal of Artificial Intelligence. – 2025. – Vol. 1, № 4. – P. 801–806.

6 **Kayumov, B. A.** Design and test results of wind tunnel for car prototypes / B. A. Kayumov, D. P. Ergashev // Galaxy International Interdisciplinary Research Journal. – 2023. – Vol. 11, № 1. – P. 81–90.

УДК 628.21

# ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ И УПРАВЛЕНИЮ СИСТЕМАМИ КАНАЛИЗАЦИИ: ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ

*М. В. КЛИМЕНКОВА, О. К. НОВИКОВА*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Современные системы канализации представляют собой важный элемент обеспечения санитарно-экологической безопасности урбанизированных территорий и устойчивого развития инженерной инфраструктуры. В условиях интенсивной урбанизации, ужесточения экологических требований и необходимости оптимизации эксплуатационных расходов традиционные подходы к проектированию и управлению системами канализации требуют существенной модернизации с применением цифровых технологий и современных инженерных решений.

Настоящее исследование направлено на комплексный анализ современных тенденций в проектировании и эксплуатации систем канализации на основе изучения международного опыта. Проведенный анализ позволит выявить основные направления развития отрасли, а также оценить возможность адаптации зарубежных практик в других регионах с учетом климатических, экономических и нормативных особенностей.

Анализ международного опыта последних десятилетий свидетельствует о повсеместном внедрении инновационных технологических решений, включающих:

– BIM-моделирование (информационное моделирование строительных объектов);
– системы мониторинга на основе Интернета вещей (IoT);
– интеллектуальные системы управления водными ресурсами (Smart Water).

Современный этап развития водопроводно-канализационного хозяйства характеризуется активным внедрением специализированного программного обеспечения, обладающего расширенными функциональными возможностями и включающего мощный аналитический аппарат для гидравлических расчетов, развитые средства визуализации и отчетности, интеграцию с геоинформационными системами. Расчетные модели канализационных сетей не только служат инструментом инженерного анализа, но и формируют единую базу исходных данных для проектирования.

Среди наиболее востребованных на международном рынке программных продуктов можно выделить: *Bentley WaterGEMS* (США) – для моделирования сетей водоснабжения и канализации; *MIKE URBAN* (*DHI Water & Environment*, Дания), созданную на основе геоинформационной системы *ArcGIS* и применяемую для гидравлического расчета систем водоснабжения, канализации и дождевых сточных вод. Данные программные комплексы базируются на общепринятых законах гидравлики, но имеют существенные различия в нормативных методиках расчета, подходах к проектированию наружных сетей канализации и требованиях к параметрам эксплуатации.

Международная практика проектирования инженерных систем свидетельствует о распространении применения технологий информационного моделирования (BIM) в области проектирования инженерных коммуникаций, включая системы канализации. Согласно аналитическим данным, степень внедрения BIM-технологий варьируется в зависимости от региона: в Великобритании показатель внедрения к 2019 году достиг 70 %, в США с 2007 года их применение стало обязательным при работе с кадастровыми и геопространственными данными, а Сингапур благодаря реализации государственной программы уже к 2015 году добился 80 % уровня внедрения.

Экономический анализ демонстрирует устойчивую положительную динамику развития BIM-рынка: с 4,9–5,2 млрд дол США в 2019 году до прогнозируемых 15,1–15,6 млрд дол. США к 2027 году [1]. В течение ближайшего пятилетнего периода в странах Европы и Америки прогнозируется рост рынка интеллектуальных систем водоснабжения и канализации на 40 %. Европейский Союз, начиная с 2014 года, проводит последовательную политику по внедрению BIM-технологий, что обусловлено их доказанной экономической эффективностью, выражающейся в оптимизации проектных решений, сокращении сроков реализации проектов и снижении эксплуатационных затрат. Перспективные направления развития связаны с интеграцией BIM с системами интернета вещей (IoT), совершенствованием методов предиктивной аналитики и созданием комплексных цифровых двойников инфраструктурных объектов.

Согласно исследованиям Агентства по охране окружающей среды США (EPA), предприятия водопроводно-канализационного хозяйства относятся к числу наиболее энергоемких объектов городской инфраструктуры, потребляя порядка 30–40 % от общего потребления энергии. Параллельные исследования, проведенные на европейском рынке, выявили устойчивую тенденцию к внедрению интеллектуальных систем управления, обусловленную ужесточением экологических нормативов и необходимостью оптимизации энергопотребления. Наблюдается значительный рост спроса на автоматизированные решения для очистки сточных вод, что свидетельствует о формировании нового технологического уклада в данной отрасли, характеризующегося переходом к полностью автоматизированным системам с интегрированными функциями мониторинга и управления. Этот процесс сопровождается существенным повышением эффективности эксплуатации и качественных показателей работы сооружений и оборудования.

Германия занимает лидирующие позиции в области управления системами водоснабжения и канализации как в Европе, так и в мировом масштабе, что подтверждается применением инновационных технологий в области очистки сточных вод и подключением практически всего населения к системам канализации. Особенностью немецкого подхода является повсеместное применение централизованных систем канализации. В стране было вложено более 78 млрд евро в новое строительство, расширение и обновление систем канализации и очистных сооружений. Общая протяжённость сетей канализации в Германии составляет 445 700 км, из них 51 % – сети общесплавной системы канализации, через которую отводятся хозяйственно-бытовые, производственные, дождевые и талые сточные воды. Протяженность сетей хозяйственно-бытовой канализации составляет около 134000 км [2].

Современный этап развития систем канализации характеризуется активным внедрением интеллектуальных технологий управления, в частности концепции «умных сетей» (smart networks). Данный подход предполагает комплексную интеграцию цифровых решений в процессы эксплуатации систем канализации, где особую значимость приобретают технологии Интернета вещей (IoT). Европейский опыт демонстрирует, что применение IoT-решений позволяет существенно трансформировать традиционные методы управления коммунальными системами. На примере Германии прослеживается эффективность использования интеллектуальных датчиков, обеспечивающих непрерывный мониторинг технического состояния сетей канализации. Установленные сенсорные устройства передают оперативные данные в режиме реального времени на централизованные диспетчерские пункты, что значительно повышает скорость реагирования эксплуатационных служб на возникающие нештатные ситуации. Практическая реализация таких систем показала их способность минимизировать количество аварийных ситуаций, связанных с нарушением работы сетей канализации. Подобные технологические решения представляют собой перспективное направление модернизации систем канализации, обеспечивающее переход к принципиально новому уровню управления инженерной инфраструктурой городов.

Нидерланды, характеризующиеся сложными гидрогеологическими условиями с высоким уровнем грунтовых вод, демонстрируют передовой опыт применения сенсорных технологий в системах канализации. Установленные в канализационных коллекторах датчики непрерывно отслеживают уровень сточных вод, обеспечивая автоматическое регулирование работы насосных станций и перенаправление потоков, что существенно снижает риск перегрузки системы и возникновения затоплений. В рамках реализации программы *Amsterdam Smart City* была создана комплексная система мониторинга, интегрирующая данные от датчиков водоснабжения и канализации. Результаты внедрения свидетельствуют о значительном снижении аварийности и улучшении экологических показателей городской среды.

Применение IoT-технологий в управлении инженерной инфраструктурой представляет собой эффективный инструмент повышения эксплуатационной надежности и качества услуг. Данный подход не только обеспечивает экономию эксплуатационных затрат и оптимизацию управления, но и вносит существенный вклад в обеспечение экологической устойчивости городских территорий, одновременно повышая уровень комфорта проживания населения.

Научные исследования подтверждают, что интеллектуальные системы управления позволяют достичь синергетического эффекта, сочетая технико-экономическую эффективность с экологическими преимуществами.

Международная практика свидетельствует о значительном потенциале инновационных технологий в повышении эффективности управления водопроводно-канализационным хозяйством. Анализ успешных кейсов внедрения IoT-технологий демонстрирует устойчивую тенденцию к снижению эксплуатационных затрат при одновременном улучшении качества предоставляемых услуг. При этом важное значение

приобретает адаптация передового опыта с учетом региональных особенностей, включая климатические условия, экономические параметры и специфику нормативно-правового регулирования.

Современные подходы к проектированию и эксплуатации сетей канализации предполагают обязательное использование специализированного программного обеспечения и инновационных технологических решений. Это позволяет эффективно решать актуальные проблемы эксплуатации, возникающие вследствие износа сетей, изменения нагрузок и других факторов.

Несмотря на существующие национальные различия в методах управления, обусловленные преимущественно климатическими и экономическими особенностями, наблюдается конвергенция подходов в части внедрения передовых технологий. Такая унификация объясняется их доказанной эффективностью в оперативном реагировании на аварийные ситуации и предотвращении аварийных ситуаций, что в конечном итоге способствует повышению надежности и устойчивости работы систем канализации.

Проведенный анализ зарубежного опыта демонстрирует, что современные системы канализации переходят на качественно новый уровень развития за счет внедрения цифровых технологий (BIM, IoT) и интеллектуальных систем управления. Для успешной адаптации этих технологий необходимо учитывать региональные особенности, включая климатические условия, экономические возможности и нормативную базу, что требует дальнейших междисциплинарных исследований.

**Список литературы**

1 **Брылева, И.** Как BIM-технологии повышают КПД проектной организации? / И. Брылева // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. – 2022. – № 1. – С. 17–20.

2 Водный сектор в Германии: методы и опыт. – URL: https: //pubdoc.ru/doc/235260/vodnyj-sektor-v-germanii---metody-i-opyt (дата обращения: 05.05.2025).

УДК 539.621

## ЭКОТРИБОЛОГИЯ СМАЗКИ ДЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

*И. Н. КОВАЛЕВА*
*Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель*

*А. В. ПИГУНОВ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

**Введение**. Выбор и оптимизация свойств смазочных материалов остается важной проблемой современного машиностроения. Изначально использовались биожиры (растительные масла и животные жиры), позже вытесненные минеральными маслами, а затем их синтетическими аналогами. Сейчас на рынке смазочных материалов преобладают продукты нефтепереработки, создавая экологические проблемы и стимулируя разработку биоразлагаемых аналогов с использованием возобновляемых ресурсов. Биожиры привлекательны своей доступностью и заменяемостью, несмотря на более низкие физико-химические показатели по сравнению с минеральными и синтетическими материалами, особенно при экстремальных нагрузках и низких температурах [1, 2]. Триботехнические характеристики биожиров, уступающие нефтяным маслам, можно повысить введением специальных добавок [3]. Исчерпавшую свой ресурс смазку на основе биожиров можно использовать не только в качестве вторичного смазочного материала, но и как биотопливо, обеспечивая утилизацию и выработку тепловой энергии.

Железнодорожный транспорт оказывает значительное воздействие на окружающую среду, включая загрязнение почвы и воды. Традиционные минеральные и синтетические смазки вызывают серьезные экологические проблемы, такие как трудности с утилизацией и учет выбросов в окружающую среду. Современные разработки в области экотрибологии направлены на создание биоразлагаемых и экологически безопасных смазок, которые могли бы успешно применяться в подшипниках колесных пар, тормозных системах и лубрикации (смазывания) кривых участков рельсового пути [1–3]. Применение функциональных присадок и технологий модификации растительных масел позволяет достичь необходимого уровня защиты узлов трения от износа и коррозии. Примером являются смазочные композиции на основе касторового масла, обладающего уникальными анти-

фрикционными характеристиками и способностью формировать прочные защитные слои на металлических поверхностях [4]. Такие разработки открывают перспективы для широкого внедрения экологически безопасных смазочных материалов в железнодорожном транспорте, снижая негативное воздействие на природу и повышая эффективность эксплуатации подвижного состава. Разработка экологически чистых смазочных материалов на основе биожиров для узлов трения железнодорожного транспорта является актуальной задачей ввиду глобальных тенденций устойчивого развития и снижения зависимости от углеводородных ресурсов [5]. **Цель работы** – сравнительный анализ экологических и триботехнических показателей биожиров и нефтяных смазочных материалов для определения области применения биожиров на железнодорожном транспорте.

**Объекты и методы исследований.** В качестве объектов исследований рассмотрены растительные и животные жиры, распространенные нефтяные масла без присадок и консистентные смазки на основе нефтяных масел. Кинематическую вязкость η (мм2/с) определяли при температуре 40 °С с помощью вискозиметра ВПЖ 2 (0,99) и термостата А2м (БМЦ, Беларусь) по ГОСТ 33-2016. Исследования триботехнических характеристик объектов исследований, диаметра пятна износа $D_и$ (мм) и нагрузку сваривания $N_{св}$ (кгс) проводили по ГОСТ 32502-2013 на приборе ЧШМ-К1 (Технопромкомплект, Украина).

**Результаты исследований.** В таблицах 1, 2 приведены результаты испытаний объектов исследований, в таблице 3 представлены результаты анализа экологических показателей. Проведённые эксперименты и изучение научных публикаций свидетельствуют о том, что растительные и животные жиры представляют собой перспективную замену нефтяных масел для создания экологически чистых смазочных материалов. Эти вещества пригодны для эксплуатации в узлах трения железнодорожного подвижного состава, непосредственно взаимодействующих с внешней средой, а также для производства консервирующих составов и очищающих растворов при подготовке техники к эксплуатации после длительного хранения.

*Таблица 1* – **Технические характеристики объектов исследования**

| Промышленная смазка для ж.-д. транспорта | Температура каплепадения*, °С | Диапазон рабочих температур*, °С | $D_и$ , мм при 20 кгс | $N_{св}$ , кгс |
|---|---|---|---|---|
| Циатим 203 | 150 | –50 …+90 | 0,52±0,01 | 85,0±0,3 |
| Буксол | 180 | –60 +120 | 0,50±0,02 | 80,0±0,1 |
| Пума | 140 | –60…+130 | 0,70±0,01 | 66,0±0,1 |
| *Данные приведены из открытых интернет-источников. | | | | |

*Таблица 2* – **Технические характеристики масла**

| Масло | Η, мм$^2$/с при 40 ˚С | *Диапазон рабочих температур, ˚С | $D_и$ , мм при 20 кгс | $N_{св}$ , кгс |
|---|---|---|---|---|
| Рапсовое | 32,7±0,1 | –20 …+80 | 0,67±0,03 | 126,0±0,1 |
| Пальмовое | 42,3±0,1 | –20 …+80 | 0,51±0,01 | 141,0±0,1 |
| Касторовое | 45,8±0,2 | –20 …+80 | 0,55±0,03 | 133,0±0,2 |
| Говяжий жир | 48,4±0,1 | –20 …+80 | 0,41±0,01 | 188,0±0,1 |
| Минеральное И-40 | 51,0±0,2 | –40…+120 | 0,60±0,03 | 200,0±0,3 |
| ПАО 100 | 53,0±0,3 | –60…+140 | 0,67±0,04 | 230,0±0,3 |
| *Данные приведены из открытых интернет-источников. | | | | |

*Таблица 3* – **Экологический показатель и области применения смазочных материалов**

| Смазочный материал | Процент за 21 день [6] | Преимущества / Недостатки | Узлы трения ж.-д. транспорта и др. | Нагрузка / Скорость / Температура |
|---|---|---|---|---|
| Минеральные масла | 10–45 | Дешевые, распространенные / Нестабильные, неэкологичные | Буксовый узел, механизм стрелочного перевода | Большие нагрузки / Большие скорости / –40…+100 |
| Полиальфаолефины / синтетические масла | 20–80 | Эффективные, условно экологичные / Дорогие, сложный процесс производства | Многоцелевые подшипники скольжения ж/д транспорта | Большие нагрузки / Большие скорости / –100…+180 |
| Биожиры | 75–100 | Дешевые, возобновляемые, экологичные / Слабая окислительная стабильность и устойчивость к низким температурам | Смазка контактной пары «колесо–рельс», винтовые пары рельса, механизм стрелочного перевода, моющие и консервационные составы | Средние нагрузки / Малые и средние скорости / –20 … +90 (короткий срок эксплуатации до замены) |

**Список литературы**

1 **Reeves, C. J.** Advancements in eco-friendly lubricants for tribological applications: Past, present, and future / C. J. Reeves, P. L. Menezes //Ecotribology: research developments. – Cham : Springer, 2016. – P. 41–61.

2 Состояние и перспективы развития производства биоразлагаемых пластичных смазок (обзор) / О. П. Паренаго, Р. З. Сафиева, С. В. Антонов [и др.] //Нефтехимия. – 2017. – Т. 57, №. 6. – С. 766–768.

3 Неорганическая полимерная присадка к пластичным смазочным материалам / И. В. Колесников, М. А. Савенкова, А. П. Сычев [и др.] //Трение и износ. – 2021. – Т. 42, №. 5. – С. 532–538. – DOI: 10.32864/0202-4977-2021-42-5-532-538.

4 Rheological and mechanical properties of oleogels based on castor oil and cellulosic derivatives potentially applicable as bio-lubricating greases: Influence of cellulosic derivatives concentration ratio/ R. Sanchez , J. M. Franco, M. A. Delgado [et al.] // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2011. – Т. 17, №. 4. – С. 705–711.

5 **Wasilczuk, M.** Ecology in Tribology: Selected Problems of Eliminating Natural Oil-Based Lubricants from Mashine Friction Couplers / M. Wasilczuk, J. Łubiński, K. Zasińska // Tribologia. – 2023. – Vol. 304, №. 2. – P. 97–103. DOI: 10.5604/01.3001.0053.6129.

6 Microalgae Biomass as a New Potential Source of Sustainable Green Lubricants / L. I. Farfan-Cabrera, M. Franco-Morgado, A. González-Sánchez [et al.] // Molecules. – 2022. – Vol. 27, iss. 4. – P. 1205. – DOI: 10.3390/molecules27041205.

УДК 543.068

# МЕТОД АНАЛИЗА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ОБЩЕГО ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСАХ В АТМОСФЕРУ ОТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

*К. М. КОМИССАРОВА, В. В. МАКЕЕВ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В современных условиях вопросы экологической безопасности приобретают первостепенное значение для всех отраслей промышленности. Особое внимание уделяется железнодорожному транспорту как ключевому элементу транспортной системы Республики Беларусь. Становление и развитие железнодорожной инфраструктуры сопровождается увеличением объёмов грузо- и пассажироперевозок, что неизбежно приводит к возрастанию экологической нагрузки на окружающую среду.

Анализ экологической ситуации показывает, что значительная часть железнодорожных объектов располагается в непосредственной близости от населённых пунктов. Это создаёт потенциальную угрозу для здоровья работников отрасли и населения. Комплексный характер проблемы определяется несколькими факторами: растущая транспортная нагрузка на инфраструктуру и высокая плотность железнодорожной сети, локализация объектов вблизи населённых пунктов, что требует постоянного совершенствования природоохранных мероприятий и поддержания экологического баланса [1].

Одним из значимых факторов негативного воздействия на экологическую обстановку является выброс общего органического углерода (ООУ), который поступает в атмосферный воздух от железнодорожных предприятий в составе промышленных выбросов в атмосферный воздух. Данный показатель служит индикатором техногенной нагрузки на атмосферный воздух и может оказывать комплексное воздействие на состояние окружающей среды [2, 3].

На объектах железнодорожной инфраструктуры формирование общего органического углерода происходит в результате деятельности различных предприятий: вагонные и локомотивные депо, дистанции гражданских сооружений, дистанции пути, шпалопропиточный завод, на которых реализуются лакокрасочные работы, пропитка древесных материалов, сжигание газообразного и жидкого топлива, в том числе на основе отходов [1].

В Республике Беларусь действует комплексный подход к контролю выбросов общего органического углерода, регламентируемый техническим нормативным правовым актом ЭкоНиП 17.08.06-001-2022 «Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосферный воздух (в том числе озоновый слой). Требования экологической безопасности в области охраны атмосферного воздуха». Нормативный документ устанавливает дифференцированные требования к предельно допустимым концентрациям (ПДК) выбросов ООУ в зависимости от характера производственных процессов:

При сжигании газообразного и жидкого топлива в различных типах установок определены следующие нормативы:

– для газотурбинных и газоперекачивающих установок, включая газовые турбины комбинированного цикла, ПДК варьируется от 150 до 300 мг/м³ в зависимости от типа используемого топлива;

– в случае поршневых, когенерационных, микротурбинных и тригенерационных установок, а также газомотокомпрессоров и других технологических установок с двигателями внутреннего сгорания (за исключением газотурбинных и газоперекачивающих) устанавливается норматив не менее 300 мг/м³.

Особые требования предъявляются к процессам сжигания отходов:

– при использовании и обезвреживании коммунальных отходов, RDF-топлива и топлива из коммунальных отходов допустимая концентрация составляет 200 мг/м³;

– для иных видов отходов и топлива из отходов (с содержанием отходов более 15 %) установлен показатель 50 мг/м³.

Строгие нормативы применяются к процессам нанесения покрытий:

– при работе с металлическими, пластмассовыми и деревянными поверхностями ПДК составляет 50 мг/м³;

– для операций с клейкими покрытиями установлен показатель 150 мг/м³;

– при проведении очистки поверхностей допустимая концентрация составляет 75 мг/м³.

Данные нормативы направлены на обеспечение экологической безопасности и сохранение качества атмосферного воздуха в районах размещения объектов железнодорожной инфраструктуры. Их соблюдение является обязательным условием для всех предприятий отрасли. Контроль за соблюдением установленных ПДК ООУ осуществляется уполномоченными органами государственного экологического контроля и аккредитованными субъектами на регулярной основе [4].

В Республике Беларусь единственным методом измерения концентрации ООУ в выбросах в атмосферный воздух, соответствующим требованиям законодательства об обеспечении единства измерений, является метод, представленный в государственном стандарте Республики Беларусь СТБ 17.13.05-51-2021/EN 12619:2013 «Определение массовой концентрации общего газообразного органического углерода. Метод с применением детектора с непрерывной пламенной ионизацией». Данный стандарт предусматривает использование газоаналитического оборудования для определения массовой концентрации ООУ.

Ключевым недостатком газоаналитического оборудования и реализуемого на его основе метода, описанного в стандарте, является применение единого коэффициента пересчета, определенного по пропану [5, 6]. Это снижает достоверность определения концентрации ООУ в составе сложных многокомпонентных газовых смесей с компонентами, значительно отличающимися как по молекулярному строению и количеству содержания в них атомов углерода, так и по концентрации.

Согласно имеющимся данным, неопределенность измерений может варьировать в достаточно широком диапазоне – от 20 до 50 % от полученного значения концентрации [5].

Методика также имеет существенные ограничения в отношении диапазона определяемой концентрации ООУ, и ее верхний предел обнаружения составляет 1 000 мг/м$^3$ , что накладывает серьезные ограничения на возможность работы с пробами, характеризующимися высоким содержанием органических веществ, и существенно сужает область применения метода.

Несмотря на указанные ограничения, СТБ 17.13.05-51-2021/EN 12619:2013 остается актуальным инструментом контроля содержания общего органического углерода, однако требует тщательного подхода к его применению и учета всех потенциальных источников погрешностей при проведении измерений [6].

**Целью** исследования является разработка методики анализа многокомпонентных газовых смесей в промышленных выбросах из организованных источников железнодорожных предприятий методом газовой хроматографии с пламенно-ионизационным детектором с возможностью селективного определения состава и концентрации отдельных компонентов газовой смеси для последующего определения концентрации общего органического углерода.

Методология газовой хроматографии представляет собой один из наиболее перспективных подходов к решению данной проблемы. Газовая хроматография как метод разделения смесей базируется на различной скорости движения компонентов по колонке, разной способности к сорбции-десорбции и различной растворимости в неподвижной фазе.

Этот метод обладает целым рядом существенных преимуществ, среди которых выделяется высокая чувствительность и точность измерений, возможность автоматизации, высокая селективная способ-

ность, позволяющая эффективно анализировать даже самые сложные многокомпонентные смеси, что особенно важно при анализе промышленных выбросов [8]. Хроматографический анализ является распространенным рутинным методом, оборудование для которого производится в Российской Федерации, обслуживается в Республике Беларусь.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи.

**1 Разработка алгоритма пробоотбора и пробоподготовки промышленных выбросов от железнодорожных предприятий с учетом специфики их состава и концентраций загрязняющих веществ:**

− выбор сорбционных материалов;
− определение объема отобранной пробы;
− установление времени десорбции.

**2 Оптимизация параметров хроматографического анализа:**

− выбор типа хроматографический колонки;
− определение оптимальных температурного режима и скорости газа-носителя;
− настройка параметров работы пламенно- ионизационного детектора (ПИД-детектора);
− установление режимов ввода пробы.

**3 Создание системы градуировки и калибровки методики:**

− подбор стандартных образцов органических веществ;
− построение градировочных характеристик;
− установление калибровочных коэффициентов;
− определение пределов обнаружения и линейности;
− расчет метрологических характеристик.

**4 Обработка результатов.**

На рисунке 1 представлена блок-схема алгоритма анализа многокомпонентных газовых смесей методом газовой хроматографии с пламенно-ионизационным детектором для определения концентрации ООУ.

Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма анализа многокомпонентных газовых смесей методом газовой хроматографии с пламенно-ионизационным детектором для определения концентрации ООУ

**Вывод**. В результате проведенных исследований разработана методика определения ООУ в промышленных выбросах в атмосферный воздух предприятий железнодорожной отрасли на основе анализа многокомпонентных газовых смесей методом газовой хроматографии с пламенно-ионизационным детектором с возможностью селективного определения состава и концентрации отдельных компонентов газовой смеси. Предложенный подход экологического мониторинга ООУ успешно прошел экспериментальную апробацию на объектах железнодорожного транспорта.

**Список литературы**

1 Белорусская железная дорога [сайт]. – URL: https://www.rw.by/ (дата обращения: 05.09.2025).

2 О деятельности, связанной с выбросами загрязняющих веществ в атмосферный воздух : постановление М-ва природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь № 33 от 27.12.2023 (с изм. от 30.12.2024 № 75) // ЭТАЛОН: информ.-поисковая система (дата обращения: 28.09.2025).

3 Органический углерод: вопросы гигиенического регламентирования и гармонизации / Е. А. Кузьмина, Е. О. Кузнецов, Н. В. Смагина [и др.] //Гигиена и санитария. – 2013. – № 6. – С. 60–64.

4 ЭкоНиП 17.08.06-001-2022. Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосферный воздух (в том числе озоновый слой). Требования экологической безопасности в области охраны атмосферного воздуха : утв. постановлением М-ва природ. ресурсов и охраны окруж. среды Респ. Беларусь от 29.12.2022 № 32-Т // Национальный правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. – URL: https://pravo.by/-document/?guid=12551&p0=W22339600p (дата обращения: 28.09.2025).

5 СТБ 17.13.05-51-2021/EN 12619:2013. Выбросы от стационарных источников. Определение массовой концентрации общего газообразного органического углерода. Метод с применением детектора с непрерывной пламенной ионизацией. – Введ. 01.02.2022. – Минск : БелГИСС, 2022. – 20 с.

6 **Цупрева, В.** Анализаторы общего органического углерода компании Shimadzu для исследования проб различной природы / В. Цупрева //Аналитика. – 2013. – №. 2. – С. 82–87.

УДК 621:534.614

## ВЛИЯНИЕ СОБСТВЕННОЙ ВИБРАЦИИ НА РАБОТУ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

*Е. Ф. КУДИНА, И. В. ПРИХОДЬКО, П. А. КУРИЦЫН*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

*Г. Р. ГОНЧАРОВ*
*ООО «IEK GROUP», г. Москва, Российская Федерация*

*А. К. ОНГАРБЕКОВ*
*ОПС «КазЦСЖТ», г. Астана, Республика Казахстан*

Одним из наиболее интересных направлений исследований влияния вибрационных параметров является изучение собственной механической вибрации электрических машин. Она вызывается разбалансированностью вращающихся частей, механическими неисправностями или причинами электромагнитного характера [1, 2]. Повышенные вибрации электрических машин являются одной из главных причин их преждевременного выхода из строя, в первую очередь, это касается повреждения подшипников. Повышенная вибрация быстро изнашивает изоляцию обмоток и может привести к деформации вала, появлению трещин, повреждениям на корпусе, а также опорной рамы или фундамента. Недооценка этого фактора может иметь неоднозначные последствия.

Отсутствие диагностики в процессе эксплуатации оборудования может привести к выходу из строя как самого объекта – источника вибрации, так и всей технологической установки, в состав которой он входит, что может вызвать остановку технологического процесса или создать ситуацию, связанную с риском для жизни [3, 4]. В настоящее время оценку уровней вибрации производят с целью установления надежности работы оборудования. Самый распространенный – контактный способ. Как правило, он осуществляется при помощи пьезоэлектрических датчиков или так называемых акселерометров, устанавливаемых на корпусе объекта.

Вибрация электрической машины в значительной степени зависит от способа ее установки, и поэтому необходимо проводить измерение вибрации в условиях, близких к действительным условиям ее размещения в процессе эксплуатации. В зависимости от требований по вибрации электрические машины подразделяются на три категории, и от этого будут зависеть условия проведения испытаний и критерии поверки испытываемого оборудования.

Одно из наиболее важных условий проведения измерений – это правильное расположение датчиков в контрольных точках измерений вибрации. Поскольку реакции механических систем на возбуждение механическими колебаниями определяются сложными физическими процессами, то при измерении даже на одном элементе испытываемого объекта в близких друг к другу точках может наблюдаться различный характер исследуемых колебаний. Необходимо производить замеры вибрации в одних и тех же контрольных точках. Измерение параметров вибрации в контрольных точках производятся на подшипниковых опорах агрегата, корпусе агрегата и на анкерных фундаментных болтах.

Испытание электрических машин связано с измерением нескольких видов вибрационных характеристик:

– виброускорение (м/с$^2$) – прямая зависимость вибрации от силы, ее вызвавшей;

– виброскорость (мм/с) – величина, характеризующая перемещение точки измерения вдоль оси электродвигателя;

– виброперемещение (мкм) – величина амплитуды, показывающая расстояние между крайними точками при вибрации.

При измерениях вибрационных характеристик, в большинстве случаев, измеряют виброскорость, так как она наиболее точно описывает характер проблемы [5]. Оценка состояния объекта испытания по пиковому или среднеквадратическому значению виброскорости во всем частотном диапазоне измерений имеет ряд существенных недостатков. То есть, не могут быть учтены вибрационные проявления технологических и режимных отклонений при эксплуатации оборудования. Уровень вибрации обычно определяется в фиксированной полосе частот (для большинства виброметров в полосе от 10 Гц до 1 кГц), что иногда не может обеспечить достаточно высокую степень чувствительности параметра на начальной стадии развития дефекта. И самым большим недостатком оценки состояния оборудования по общему уровню вибрации является то, что он практически нечувствителен к изменениям сравнительно низкоуровневых частотных составляющих (с малыми энергиями в колебательном процессе) вибросигнала, характерных, например, для ряда зарождающихся и развивающихся дефектов подшипников качения, зубчатых передач, электрических и ряда других дефектов [5]. Устранить эти существенные недостатки возможно при помощи вышеупомянутого спектрального анализа. Но его использование увеличивает объем обрабатываемых данных, поэтому необходимо выбирать наиболее оптимальный метод диагностики.

Вибродиагностические методы контроля состояния электрических машин обычно являются первым этапом в оценке их состояния, так как позволяют анализировать состояние оборудования непосредственно во время его работы. После выявления основных характерных признаков существования того или иного дефекта необходимо применять другие, специализированные методы диагностики для более тщательной проверки, а оборудование, имеющее несоответствия по величине вибрационных параметров, не допускается к эксплуатации и подлежит дальнейшей доработке или наладке. Это является важным критерием для оценки надежности и безопасности работы оборудования.

**Список литературы**

1 **Кудина, Е. Ф.** Влияние виброакустических факторов на экологическую безопасность производства / Е. Ф. Кудина, И. В. Приходько // Трансграничное сотрудничество в области экологической безопасности и охраны окружающей среды : сб. докл. V Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 4–5 июня 2020 г. – Гомель : ГГУ им. Ф.Скорины, 2020. – С. 460–468.

2 **Кудина, Е. Ф.** Оценка влияния вибрации на безопасность оборудования и экологию производства / Е. Ф. Кудина, И. В. Приходько, П. А. Курицын // Трансграничное сотрудничество в области экологической безопасности и охраны окружающей среды : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 2–3 июня 2022 г. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2022. – С. 279–281.

3 **Додолев, С. Г.** Диагностирование технических объектов методами неразрушающего контроля : учеб.-метод. пособие / С. Г. Додолев, О. В. Холодилов. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 40 с.

4 **Холодилов, О. В.** Методы и средства неразрушающего контроля: лабораторный практикум / О. В. Холодилов, В. В. Бурченков, А.В. Янчилик. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 40 с.

5 **Ширман, А. Р.** Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А. Р. Ширман, А. Б. Соловьев. – М. : Наука, 1996. – 276 с.

УДК 699.844

## МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ШУМОПОДАВЛЕНИЯ

*А. В. ЛЕМЕШЕВСКАЯ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Практически все, что окружает нас, звучит: шум ветра, рокотание птиц, гул моторов, а также большую долю информации человек воспринимает слухом. Звук – это механические колебания волн, распространяемых в упругой среде (воздушная и водная оболочки, твердые тела). Стремительно развивающаяся промышленность, инновации в области техники, конструирование тяжелых станков, аппаратов, механизированных приборов – все это в совокупности способствует проявлению шумового фактора на окружающую среду и на человека в том числе [1].

С ростом численности населения и развитием технологий уровень шумового загрязнения продолжает расти, требуя инновационных решений. Традиционные методы борьбы с шумом, такие как звукоизоляция зданий и использование барьеров, не всегда эффективны и могут быть дорогостоящими. Поэтому разработка новых материалов, способных активно или пассивно поглощать и рассеивать звук, является актуальной и приоритетной задачей. Кроме того, важным аспектом является разработка экологически чистых и устойчивых материалов с шумоподавлением, которые не наносят вреда окружающей среде и могут быть переработаны после использования. Целью данного исследования является комплексный анализ существующих и перспективных материалов с шумоподавлением, выявление их основных характеристик, преимуществ и недостатков, а также определение областей их наиболее эффективного применения.

Сейчас средний уровень шума в городах, производимый транспортом, растет из-за увеличения интенсивности движения. Особенно в кварталах, прилегающих к крупным дорогам, – там уровень шума может составлять 67–77 децибел, что сопоставимо с детским плачем [2].

Степень влияния шума на организм человека зависит от некоторых характеристик:

− время воздействия;
− спектральный состав;
− интенсивность;
− характер работы человека;
− положение человека;
− индивидуальные особенности организма [3].

Повреждения слуха из-за воздействия шума имеют особое значение, потому что необратимы. Тенденция распространения в крупных городах тугоухости из-за воздействия шума до сих пор сохраняется. Примерно у 1 миллиарда населения мира (или 16 %) присутствуют серьезные нарушения слуха – исходя из данных Всемирной организации здравоохранения [4].

**Метаматериалы.** Метаматериалы – это искусственно создаваемые структуры из ячеек малых волновых размеров (метаатомов), которые могут иметь, кроме обычных, также свойства, какие не встречаются в природе. Их активное исследование началось в электродинамике и оптике в 1990-х годах после того, как было сконструировано и экспериментально изучено несколько таких структур, в том числе структура с отрицательной рефракцией. Исследования сильно активизировались с разработкой так называемого метода преобразовательной оптики [5, 6], позволившего получить теоретические решения для задач о «шапке-невидимке», «суперлинзе» и других, ранее считавшихся неразрешимыми. Реализовать эти решения можно только с помощью метаматериалов. Дату опубликования метода, 2006 год, можно считать годом рождения акустических метаматериалов, так как большинство результатов электродинамики и оптики были практически сразу распространены на акустику [7].

В августе 2025 года появились новости о «прорыве» в лаборатории Синь Чжана в Бостонском университете, которые произвели фурор в мире управления звуком. В новом исследовании ученые представили инновационную разработку – фазово-градиентные ультраоткрытые метаматериалы PGUOM, способные эффективно заглушать звуки широкого спектра частот (рисунок 1).

Рисунок 1 – Специализированная вентиляционная система PGUOM, демонстрирующая эффективное широкополосное подавление шума, одновременно поддерживая свободный проход воздушного потока с уровнем открытости до 70 % [8]

По данным Tech Xplore, новый материал представляет важный этап многолетнего проекта Чжана по созданию эффективного акустического глушителя. Первоначальные разработки фокусировались преимущественно на снижении низкочастотного шума в системах вентиляции и охлаждения. Новую технологию можно применять в гораздо большем спектре ситуаций.

PGUOM эффективно устраняет шумы практически любых частот. Хотя переход от узкополосного подавления к широкополосному немного снижает максимальную эффективность звукоизоляции, данная разработка предлагает большие преимущества для практического использования в промышленности, офисных помещениях и общественных пространствах, где важна качественная циркуляция воздуха одновременно с устранением постороннего шума [8].

Метаматериал Чжана состоит из одиночных или повторяющихся суперячеек, каждая из которых включает три элементные ячейки субволнового диапазона. В первой и третьей ячейках установлены плотные барьеры, обеспечивающие управляемое изменение фазы проходящих звуковых волн, тогда как центральная ячейка остается свободной для нормального воздухообмена. Благодаря этому формируется полный 2π-фазовый градиент, превращающий входящий звук в поверхностные волны, аналогичные оптическим плазмонным волнам, которые поглощаются и гасятся поверхностью материала. Результат – широкополосный шум эффективно подавляется, при этом сохраняется воздушный поток и геометрическая адаптивность. Создатели PGUOM нацелены на внедрение собственных инноваций непосредственно в серийные товары и прикладные решения. Пока что они совершенствуют свойства метаматериалов для крупномасштабного промышленного производства. Параллельно ведется работа по улучшению показателей звукопоглощения при сохранении низкого сопротивления движению воздуха и минимальной общей толщины материала [9].

Традиционные материалы для шумоподавления, такие как минеральная вата или пенополистирол, часто обладают значительным экологическим следом из-за энергоемких процессов производства, использования невозобновляемых ресурсов и трудностей в утилизации. Именно поэтому все больше внимания уделяется разработке и применению экологичных материалов, которые не только эффективно поглощают звук, но и оказывают минимальное воздействие на окружающую среду.

**Натуральные волокна.** Использование натуральных волокон, таких как конопля, джут, лен, кокосовое волокно и шерсть, является одним из направлений в создании экологичных шумопоглощающих материалов. Эти материалы обладают рядом преимуществ: они возобновляемы, биоразлагаемы и имеют низкую энергетическую интенсивность производства. Благодаря своей пористой структуре природные волокна эффективно поглощают звук, особенно в средне- и высокочастотном диапазонах.

Конопля и лен обладают высокой прочностью и упругостью, что делает их отличным выбором для изготовления шумопоглощающих панелей и матов. Их выращивание не требует больших затрат ресурсов и не оказывает негативного влияния на почву.

Джут широко доступен и относительно недорог, что делает его привлекательным вариантом для массового производства шумопоглощающих материалов. Джутовые панели и коврики хорошо поглощают звук и могут использоваться в различных помещениях.

Кокосовое волокно обладает отличными звукоизоляционными свойствами и устойчивостью к влаге, что делает его идеальным для использования во влажных помещениях.

Шерсть – прекрасный природный изолятор, который не только эффективно поглощает звук, но и регулирует влажность в помещении. Шерстяные панели и ковры создают уютную и акустически комфортную атмосферу.

Несмотря на свои преимущества, природные волокна могут быть подвержены воздействию влаги и гниению, поэтому их часто обрабатывают специальными экологически безопасными пропитками для повышения долговечности и устойчивости к биопоражениям [10].

**Переработанные материалы.** Важным направлением в разработке экологичных материалов для шумоподавления является использование переработанных отходов. Переработка позволяет не только сократить количество отходов, отправляемых на свалки, но и снизить потребление первичных ресурсов. *Отработанная одежда, текстильные отходы и ковры* могут быть переработаны в шумопоглощающие панели и маты (рисунок 2). Эти материалы обладают хорошими акустическими свойствами и могут использоваться в различных помещениях, от офисов до жилых домов [11].

*Пластик, переработанный из бытовых отходов или мусора с пластиковой фабрики*, превращается в панели с высокой прочностью и хорошими акустическими характеристиками. Они долговечны, влагостойки и подходят для влажных помещений [12].

Амбициозную задачу – разработать технологию строительства полноценного здания из пластиковых пакетов и бутылок поставили перед собой специалисты нового стартапа из Лос-Анджелеса. Суть идеи состоит в том, чтобы создать современный, более быстрый, экологичный и чистый способ возвести дом, чем при условии использования традиционных строительных блоков. Для этого предполагается использовать пластиковые отходы, в том числе те, которые не подлежат вторичной переработке. Разработанная технология ByFusion Global позволяет переработать «неперерабатываемый» пластик в прочные кирпичи большого размера. Шлакоблоки, именуемые «ByBlocks» (рисунок 3), изготавливаются методом парового уплотнения. Достоинство этой технологии состоит в том, что для неё не требуется каких-либо добавок, клеевых составов либо наполнителей [13].

Рисунок 2 – Теплошумоизоляционные плиты Экотеплин 50 мм с антипиреном

Рисунок 3 – Шлакоблоки ByBlocks

*Переработанные шины* представляют экологичное решение, позволяющее не только утилизировать старый транспортный мусор, но и создавать высокоэффективные звукоизоляционные материалы. Такой материал обладает отличной амортизирующей способностью, что способствует уменьшению передачи вибраций и шумов. Механизм снижения шума основан на физических свойствах резины: способности поглощать и рассеивать вибрационные волны. Такое решение широко используется в строительстве зданий, аэродромных покрытиях, дорожных покрытиях, а также для шумоизоляции промышленных объектов и транспортных средств [14].

**Биополимеры.** Биополимеры входят в состав живых организмов – белков, нуклеиновых кислот, полисахаридов, лигнина. Это достойная альтернатива искусственным пластикам, которые загрязняют окружающую среду. Их процесс разложения составляет от 400 до 700 лет, а биополимеров – до полугода, при этом не наносится ущерб природе. Биополимеры, полученные из возобновляемых природных ресурсов, таких как крахмал, целлюлоза, хитин и белки, обладают уникальным сочетанием свойств, которые делают их идеальными кандидатами для шумопоглощающих и звукоизоляционных применений. Их структура, пористость и вязкоупругие характеристики могут быть настроены и оптимизированы для поглощения звуковых волн в широком диапазоне частот. Более того, биополимеры биоразлагаемы и компостируемы, что значительно снижает их воздействие на окружающую среду по сравнению с традиционными синтетическими материалами.

Использовать *грибной мицелий* в производстве шумоизолирующих материалов предложили специалисты Немецкого института окружающей среды, безопасности и энергетики имени Фраунгофера. Они обратили внимание на то, что грибница, формируемая из нитевидных гифов, имеет пористую структуру и способна разрастаться до высокой плотности. Другими словами, она может превращаться в сплошной покров со множеством воздушных камер, которые способны поглощать звуковые волны. Однако предложенный немецкими исследователями материал – это не просто пласты мицелия. В основе материала лежат волокна древесины, тщательно просушенная солома, отходы пищевых производств и грибница, выращенная в лабораторных условиях. Из них был изготовлен специальный субстрат, из которого посредством 3D-принтера печатаются своеобразные матрицы, представляющие основу для дальнейшего роста мицелия. Когда он разрастается до необходимой плотности, затвердевшие матрицы отправляются в печи для высокотемпературной обработки. Под воздействием жара мицелий погибает и теряет органическую массу. Это позволяет получить структуру с высокой плотностью открытых пор (рисунок 4), которая, по оценкам разработчиков, как нельзя лучше справляется с задачами шумопоглощения [15].

Рисунок 4 – Шумоизоляционный материал на базе грибного мицелия

Исследование материалов с шумоподавлением является важной и актуальной задачей, решение которой позволит создать более комфортную и безопасную среду для жизни и работы людей.

Перспективы развития экологичных материалов для шумоподавления связаны с дальнейшим совершенствованием технологий производства, расширением ассортимента используемых материалов и повышением их эффективности и долговечности.

Переход к использованию экологичных материалов для шумоподавления является важным шагом на пути к созданию более устойчивой и здоровой окружающей среды.

**Список литературы**


1 Борьба с шумом на производстве : справочник / Е. Я. Юдин, Л. А. Борисов, И. В. Горенштейн [и др.]. – М. : Машиностроение, 1985. – 400 с.

2 **Бубнов, И. Н**. Влияние транспортного шума на здоровье человека и способы его минимизации / И. Н. Бубнов, О. Р. Ильясов // Инновационный дискурс развития современной науки : материалы XXII Междунар. науч.-практ. конф., Петрозаводск, 2 июня 2025 г. – Петрозаводск : Междунар. центр науч. партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И. И.), 2025. – С. 251–257.

3 Способы защиты от шума и вибрации железнодорожного подвижного состава / И. И. Балтер, А. М. Березовский, Г. В. Бутаков [и др.] ; под ред. Г. В. Бутакова. – М. : Транспорт, 1978. – 231 с.

4 **Иванов, Н. И.** Концепция снижения шума в РФ / Н. И. Иванов // Защита от повышенного шума и вибрации : материалы V Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием / под ред. Н. И. Иванова. – СПб. : Айсинг, 2015. – С.12–25.

5 **Pendry, J. B.** Controlling elec tromagnetic fields // J. B. Pendry, D. Schurig, D. R. Smith // Science. – 2006. – Vol. 312, № 5781. – P. 1780–1782.

6 **Leonhardt, U.** Optical conforming mapping / U. Leonhardt // Science. – 2006. – V. 312, № 5781. – P. 1777−1780.

7 **Бобровницкий, Ю. И.** Поглощение звука и метаматериалы (обзор) / Ю. И. Бобровницкий, Т. М. Томилина // Акустический журнал. – 2018. – Т. 64, № 5. – С. 517–525. – DOI: 10.1134/S0320791918040020.

8 This smarter sound shield blocks more noise without blocking air // Tech Xplore. – URL: https://techxplore.com/-news/2025-08-smarter-shield-blocks-noise-blocking.html (date of access: 25.09.2025).

9 Шум больше не страшен: как новые метаматериалы глушат звук // Hi-Tech Mail. – URL: https://hi-tech.mail.ru/-news/131689-shum-bolshe-ne-strashen-kak-novye-metamaterialy-glushat-zvuk/ (дата обращения: 26.09.2025).

10 Экотекстиль и натуральные материалы для шумоизоляции: экологичная альтернатива традиционным средствам // Tecnov.ru. – URL: https://tecnov.ru/ekotekstil-i-naturalnye-materialy-dlya-shumoizolyatsii-ekologichnaya-alternativa-traditsionnym-sredstvam (дата обращения: 27.09.2025).

11 Преимущества акустических экранов из шумоизоляционных матов Экотеплин // Экопланета, Натуральные строительные материалы. – URL: https://www.ekoplaneta.su/blog/sovety-pokupatelyam/akusticheskie-ekrany-iz-shumoizolyatsionnykh-matov-ekoteplin/ (дата обращения: 27.09.2025).

12 Использование акустических панелей из переработанных материалов для экологичной шумоизоляции дома // Tecnov.ru – URL: https://tecnov.ru/ispolzovanie-akusticheskih-paneley-iz-pererabotannyh-materialov-dlya-ekologichnoy-shumoizolyatsii-doma (дата обращения: 28.09.2025).

13 В Лос-Анджелесе разработали технологию создания кирпичей из переработанного пластика // Novate.Ru. – URL: https://novate.ru/blogs/040722/63464/ (дата обращения: 28.09.2025).

14 Шумоизоляция с помощью переработанных шин: как резиновая крошка снижает вибрационный шум // Tecnov.ru. – URL: https://tecnov.ru/shumo izolyatsiya-s-pomoschyu-pererabotannyh-shin-kak-rezinovaya-kroshka-snizhaet- (дата обращения: 28.09.2025).

15 Создан экологически чистый шумоизоляционный материал на базе грибного мицелия // Pacs.ru. – URL: https://pacs.ru/blog/tekhnologii/sozdan-ekologicheski-chistyy-shumoizolyatsionnyy-material-na-baze-gribnogo-mitseliya/?ysclid=-mg4uo5lfg0144708507 (дата обращения: 28.09.2025).


УДК 625.06

## МОДИФИКАЦИЯ БИТУМОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТХОДОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

*М. С. МОРДАС, Н. М. АКУЛИЧ, Е. О. КЛИМЕНКОВ*
*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

В дорожной отрасли Республики Беларусь остро стоит вопрос повышения качества битумов, а также рационального использования отходов промышленного производства. Традиционные технологии производства битумов требуют значительных финансовых затрат. В то же время большое количество промышленных отходов требует экологичной утилизации. Использование отходов в качестве модификаторов битумов позволяет решить обе проблемы: улучшить характеристики дорожного покрытия и решить экологические вопросы.

Преимущества использования отходов:

1 Экономическая эффективность. Отходы имеют низкую стоимость по сравнению с традиционными полимерными модификаторами.

2 Экологический эффект. Сокращение объёмов неиспользуемых промышленных отходов.

3 Улучшение характеристик битума: повышение теплостойкости, увеличение эластичности, расширение температурного диапазона применения, улучшение адгезии к минеральным материалам.

Ежедневно человечество использует огромное количество пластика, который можно применить в том числе и для модификации дорожного битума. Для этих целей подходит полиэтилентерефталат (PET) [1].

При добавлении к битуму PET улучшается устойчивость к колееобразованию дорожного покрытия, из чего можно сделать вывод, что его можно использовать в городских условиях, где нагрузка на дорогу существенно выше.

При помощи PET можно улучшить следующие характеристики битума:

− увеличить температуру размягчения битума;

− оптимизировать вязкость;

− снизить пенетрацию (материал более жесткий и устойчивый к деформациям и нагреву);

− улучшить водостойкость;

− повысить устойчивость к усталости битума;

− улучшить низкотемпературные свойства битума [2].

При этом способе модификации полиэтилентерефталат из-за высокой температуры плавления (250 °С) может действовать только как наполнитель. PET не растворяется в битуме, его добавляют измельченным с резиновой крошкой той же фракции и отработанным моторным маслом.

Резиновая крошка, полученная после переработки использованных шин, поможет сделать дорожное покрытие более безопасным, обеспечив противоскользящие свойства и снижение шума. Оценены физико-механические характеристики резиновой крошки в процессе модификации нефтяных битумов. Как показывает исследование, степень набухания изменяется с изменением размера крошки, причем оптимум набухания для крошки большего размера достигается значительно быстрее. Анализ процесса модификации битума резиновой крошкой показал, что в битумно-резиновой композиции можно использовать резиновую крошку различных размеров.

Отработанное моторное масло при модификации дорожных битумов обеспечит смягчение асфальтобетонной смеси, компенсируя жесткость, которую вносят резина и PET, улучшит адгезию битума к минеральным материалам, будет способствовать более равномерному распределению модификаторов в битуме.

Использование переработанного пластика (PET) в качестве наполнителя для модификации битума – это перспективная технология, позволяющая одновременно решать экологические и инженерные задачи. Сочетание PET, резиновой крошки и отработанного масла позволяет создать более долговечное, безопасное и экологичное дорожное покрытие, особенно эффективное в условиях интенсивного городского трафика.

За 2022 год в ОАО «Полоцк-Стекловолокно» образовалось порядка 125 т грубых отходов базальтового волокна, за 8 месяцев 2023 года около 90 т, которые в дальнейшем нигде не используются, вывозятся на полигон.

Были проведены лабораторные испытания для определения целесообразности использования базальтового волокна в дорожном битуме. Для этих целей ОАО «Полоцк-Стекловолокно» предоставило грубые отходы базальтового волокна. Вид отходов – застывший базальтовый расплав, прошедший чрез фильеры стеклоплавильного агрегата в виде грубого волокна толщиной от 12 до 150 мкм произвольной длины. Плотность базальтовых волокон составляет 2,67 г/м$^3$, влажность – около 3–8 %.

Базальт – это природный материал, который обладает высокой прочностью, стойкостью к применению в агрессивных средах, а продукция, изготовленная из него, имеет длительный срок эксплуатации. Текстура пористая, миндалекаменная или массивная. Излом неровный. Шероховатый на ощупь. Удельный вес 2,6–3,11 г/см$^3$. Твердость по шкале Мооса от 5 до 7. Прочность на сжатие горной породы достигает величины 400 МПа. По сравнению с другими композитными материалами базальтовое волокно является более экологичным продуктом [3]. Базальтовое волокно имеет температуру плавления 1100–1450 °С, обладает высокой термо-стойкостью и стабильными свойствами материала при смешивании при высоких температурах.

По сравнению с полимерным волокном базальтовое волокно имеет более высокую прочность и модуль упругости в асфальтобетонных смесях, поэтому широко используется в строительных материалах[4].

В ходе проведения лабораторных исследований было установлено, что базальтовые волокна легко измельчаются и перемешиваются со щебнем в смесительной установке. За время перемешивания, рав-

ное 30 секундам, волокна соответствовали размеру 2,5–8 мм. Базальтовые волокна равномерно распределяются в разогретом битуме. При испытании образцов дорожного битума на дуктилометре электромеханическом, образец битума с базальтовым волокном показал более высокую растяжимость по сравнению с образцом без волокна, что обеспечивает трещиностойкость дорожных покрытий.

Базальтовые волокна повышают устойчивость асфальтобетонного покрытия к разрушению, прочность на разрыв и сопротивление колейности, улучшают высокотемпературные характеристики и вязкоупругость, а также оказывают определенное влияние на усталостную прочность и водонепроницаемость дороги. Кроме того, при некоторых дефектах различных типов волокон в строительных материалах, таких как биоразлагаемость, диспергируемость и поверхностная инертность волокон, вводится целенаправленная модификация волокон на основе методов физической и химической модификации для улучшения эксплуатационных свойств модифицированных волокон в различных условиях [5].

Модификация битумов промышленными отходами – это не только экономически выгодный, но и экологически ответственный подход к производству дорожных материалов. Дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на оптимизацию составов и разработку новых технологий применения модифицированных битумов в дорожном строительстве. Такой подход позволяет не только улучшить эксплуатационные характеристики дорожного покрытия, но и внести значительный вклад в охрану окружающей среды.

**Список литературы**

1 **Ласман, И. А.** Модификация асфальтобетона бытовым отходом полиэтиленгликольтерефталатом / И. А. Ласман, Е. А. Соломников, Е. О. Иванов // Инновации в строительстве, 2023 : сб. трудов конференции, Брянск, 6–8 апр. 2023 г. – Брянск, 2023. – С. 281–283.

2 **Есина, А. Ю.** Полимерная модификация битума как способ повышения качества дорожно-строительных композитов / А. Ю. Есина, А. А. Григоров, М. И. Вициенко // Сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова, посвящ. 170-летию со дня рождения В. Г. Шухова. – Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2023. – С. 70–74.

3 **Александров, Д. Ю.** Перспектива использования отходов базальтовых волокон в дорожной отрасли / Д. Ю. Александров //Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных : материалы Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, 8–9 февр. 2017 г. – Омск : СибАДИ, 2017. – С. 17–20.

4 **Секерин, В. Д.** Отходы базальтового волокна – в доходы / В. Д. Секерин, А. Е. Горохова, Е. Н. Новикова //Экономика и предпринимательство. – 2016. – № 8. – С. 417–419.

5 **Мордас, М. С.** Оценка эффективности применения базальтового волокна в дренирующем асфальтобетоне / М. С. Мордас, Е. М. Жуковский // V Бетанкуровский международный инженерный форум : сб. тр., Санкт-Петербург, 29 нояб. – 1 дек. 2023 г. В 2 т. – СПб. : Петербург. гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I, 2023. – С. 53–56.

УДК 656.1/5:621.331

## СОВРЕМЕННОЕ ЭНЕРГО-ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТА

*В. М. ОВЧИННИКОВ, В. В. МАКЕЕВ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В настоящее время передовые страны обеспокоены истощением топливно-энергетических ресурсов и значительным ухудшением состояния окружающей среды и, прежде всего, началом глобального потепления. Будучи важным компонентом экономики, транспортный сектор привлекает внимание стран всего мира. Транспорт занимает видное место в решении экономических и социальных сторон любой страны. Он является энергоёмким видом деятельности и оказывает воздействие на окружающую среду. Транспорт не является производителем товаров, а осуществляет доставку этих товаров от производителей до потребителей. Кроме того, транспорт осуществляет перевозку людей, одни из которых производят товары, а другие потребляют эти товары. В результате транспорт играет ключевую роль в экономике и жизни общества.

XXI век неразрывно связан с высокими технологиями, развитием связей между странами, требует коренной модернизации средств передвижения, грузов и человека, ставит перед человеком крупнейшие инженерно-технические задачи очередного транспортного прорыва. Таким образом, транспорту в экономическом развитии стран отводится роль «локомотива». При этом транспорт во многом определяет решение энергетических и экологических проблем как в местном, так и в глобальном масштабе.

Рассмотрим состояние наземного транспорта и перспективы его развития. Ходьба и бег, два естественных способа человеческого передвижения преобладали в доиндустриальных обществах. Бег требует затрат энергии [1], в 10–20 раз больше, чем при базовом обмене веществ. Медленно бегущий человек весом 70 кг затрачивает 80 Вт; а мощность опытного марафонца, одолевшего дистанцию (42,195 км) за 2,5 часа, в среднем составит около 1300 Вт. Кстати, забег греческого воина Фидиппида перед битвой при Марафоне в 490 году до н. э. стал образцом беговой выносливости. Дистанция в 240 км была преодолена бегуном Фидиппидом всего за два дня, при этом средний выход мощности составил около 800 Вт (чуть больше одной лошадиной силы).

Одомашнивание лошадей позволило получить новый, более мощный и быстрый транспорт. Лошади были первичным двигателем, который широко использовался на транспорте и определял его энергетику. Отход от конного транспорта начался в конце 1880-х гг. с появлением электрического трамвая.

К началу XX века электрический трамвай в основном заменил лошадей в качестве средства общественного транспорта. Лишь после того, как завершилась разработка двигателя внутреннего сгорания и его внедрили в грузовых и легковых автомобилях – на это ушло время с 1900 по 1915 г., механический транспорт сменил городских лошадей.

Автомобильный транспорт связывают с Генри Фордом. До того, как построить свой первый автомобиль, Генри Форд работал в «Осветительной компании» Эдисона. Создаваемые электрические автомобили не могли уехать далеко от станции подзарядки. Первый автомобиль Форда имел двухцилиндровый четырехтактный бензиновый двигатель внутреннего сгорания мощностью четыре лошадиные силы.

Двигатель внутреннего сгорания (ДВС), можно сказать, спас нефтяную индустрию, потому что в течение 40 лет своего существования она занималась лишь освещением. Её основным продуктом был керосин, который заливали в осветительные лампы и использовали по всему миру в качестве источника света. Но в начале XX в. всё большую популярность стало приобретать электрическое освещение. И тут, очень вовремя, появился бензиновый ДВС. До этого бензин представлял собой побочный продукт, взрывоопасную и легковоспламеняющуюся фракцию переработки нефти, практически бесполезную составляющую, и её сжигали часто при добыче. Но с появлением автомобилей выяснилось, что бензин является очень эффективным источником энергии, если использовать его в ДВС в качестве топлива.

Первый лёгкий бензиновый двигатель, подходящий для мобильного использования, был разработан Даймлером и Майбахом. В 1900 г. Майбах сконструировал автомобиль Mercedes 35, который назвали первым современным автомобилем по всем основным параметрам. Кстати этот автомобиль назван по имени дочери хозяина салона Daimler. Автомобиль Mercedes 35 имел двигатель мощностью 26 кВт (35 л. с.).

После Второй мировой войны автомобили имели бензиновые двигатели мощнее 80 кВт (около 110 л. с). Самая мощная модель Mercedes (AMG E63-s) имела двигатель в 610 л. с. Это означает, что максимальная мощность высокопроизводительных автомобилей возросла примерно в 30 раз. Основной причиной роста мощности бензиновых двигателей легковых автомобилей было увеличение их массы, которое происходило, несмотря на использование более легких материалов, таких как алюминий, магний и пластмассы. Более быстрое ускорение и более высокая максимальная скорость являлись вторичным фактором. Вес рос в связи с появлением более просторных салонов, автоматической коробки передач, кондиционеров, аудиосистем, улучшенной тепло- и звукоизоляции, и многочисленных сервоприводов, которые используются в стеклоподъемниках, зеркалах, сиденьях и дверях.

Завершая тему автомобилей с бензиновыми двигателями, следует отметить, что в настоящее время в США почти все пассажирские автомобили оснащены бензиновыми двигателями, а на долю дизелей приходится всего 3 % (в США бензин гораздо дешевле), в Евросоюзе около 40 % автомобилей оснащены дизельными двигателями. Исторически автомашины всегда являлись главным пунктиком американской жизни.

Теперь о дизельных двигателях. Сейчас дизельные ДВС эффективнее на 15–20 %, чем бензиновые. Кроме того, есть ещё несколько преимуществ: дизель работает на топливе с большей плотностью энергии (оно содержит почти на 12 % больше энергии, чем такой же объём бензина). Воспламенение топлива осуществляется не точечно, что приводит к более полному сгоранию. Дизельное топливо является топливом более низкого качества (а значит более дешёвым); современные электронные системы впрыс-

ка, впускных и выпускных органов позволяют увеличить эффективный КПД двигателя и снизить выбросы вредных веществ в окружающую среду.

На автомобиле действующий прототип дизельного ДВС появился только в 1936 г. (Mercedes-Benz 2600). Началось широкое внедрение дизельного ДВС на транспорте: на железной дороге и в судостроении в первую очередь. В 1930-х гг. паровозы были заменены тепловозами, т. е. локомотивами с дизельной силовой установкой вместо паровой машины. Такая инновация позволила устранить главный недостаток паровоза – его принципиально низкую энергетическую эффективность (КПД в эксплуатации не более 6–8 %), которая не соответствовала уровню науки и техники в 1930-х гг. Следует отметить, что первые магистральные тепловозы были построены в СССР в 1925 г. по проектам Ю. В. Ломоносова и Я. М. Гаккеля. Современные тепловозные дизели имеют КПД на номинальном режиме более 40 %.

Самая успешная инновация послевоенного периода на железнодорожном транспорте – это быстрые электрифицированные поезда дальнего следования. Обладая значительными преимуществами по сравнению с другими видами транспорта (экономичность, экологическая чистота, высокий уровень безопасности и комфорта), высокоскоростные железные дороги получают всё большее распространение. По данным Международного союза железных дорог (МСЖД), при времени в пути по магистральной части маршрута до 2,5 часов более 75 % пассажиропотока приходится на высокоскоростные магистрали (ВСМ). В современном мире, в котором ценятся удобство, время, низкая энергоёмкость и низкие углеродные выбросы, высокоскоростной электропоезд всегда будет наилучшим выбором для путешествий на расстояния 150–600 км [3].

В настоящее время Китай [4] стал мировым примером в использовании высокоскоростного железнодорожного транспорта. Общая протяженность высокоскоростных магистралей (ВСМ) на 2024 г. составила 46 тыс. км. Главным показателем транспорта является энергоёмкость. Этот показатель очень важен для Китая, страны, в которой запасы жидкого топлива невелики, а именно жидкое топливо широко используется на различных видах транспорта. Транспорт обеспечивает мобильность населения, а Китай является второй по населению страной (первой стала Индия) в мире и для его трудовых ресурсов очень важна мобильность. Ни один из видов междугородного транспорта не может сравниться по энергоёмкости с высокоскоростными междугородными поездами. Китай является страной, в которой ВСМ соединяют все крупные города в густонаселенных восточных районах. В настоящее время такая богатая страна как США не догоняет Китай по освоению высокоскоростных магистралей.

Китай принял стратегию развития «Низкий углеродный след + Транспорт», основными характеристиками которой являются: всестороннее низкоуглеродное развитие, причём не в отрыве одной отрасли от другой; отсутствие карбонизации в любом из звеньев транспортной системы; решения в технологии, эксплуатации и другие, требующие инновационного мышления; непосредственное влияние транспорта на качество жизни человека и экономическое развитие в среде обитания человека, основанной на принципе «человек превыше всего»; повышение социального состояния и сокращение разрыва между богатыми и бедными.

Если для обычных железных дорог энергопотребление на одного пассажира на километр пройденного пути установлено [2] на уровне 1,0 кВт·ч/пас·км, то для легковых автомобилей – 8,5 кВт·ч/пас·км, для самолетов – 7,44 кВт·ч/пас·км. Удельный расход энергии высокоскоростным железнодорожным транспортом значительно ниже и составляет в среднем менее 0,5 кВт·ч/пас·км. Например, скорость поезда CRH380A (L) на высокоскоростной железной дороге Пекин – Гуанчжоу достигает 300 км/ч при энергопотреблении на одного пассажира в восемь раз меньше потребления легковыми автомобилями и в три раза меньше топливопотребления крупногабаритными автобусами.

Для транспорта, кроме энергоэффективности, которую часто называют пятым видом топлива, главной является борьба с загрязнением окружающей среды выхлопными газами. Причём сначала государства стали вести эту борьбу в крупных городах, где сосредоточено много транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания. Затем к этому добавилась обеспокоенность изменением климата, потепление которого, как показывают многие исследования, вызвано дополнительным выбросом парниковых газов, основным из которых является углекислый газ.

В глобальном масштабе 15 % выбросов углекислого газа приходится на транспорт. Первым мероприятием по уменьшению выбросов углекислого газа транспортом является замена транспортных средств, имеющих углеводородное топливо, такими средствами, которые не имеют ДВС. Таким назем-

ным транспортным средством является электромобиль. Кроме того, электромобиль проще в устройстве, надёжнее в эксплуатации, может существенно смягчить воздействие скачков цен на нефть, а значит на нефтяное топливо.

Аккумулятор – это сердце электромобиля, так же как двигатель внутреннего сгорания (бензиновый и дизельный) является сердцем автомобиля. Для перехода на электромобили требовался новый аккумулятор, а не используемый в автомобильной индустрии свинцовый аккумулятор. Созданные литий-ионные батареи обладают малой массой и высокой плотностью энергии. Аккумуляторы должны быстро заряжаться, иметь большой срок службы, несмотря на непрерывную разрядку и подзарядку. Помимо двигателя автомобиля аккумуляторы должны обеспечивать электроэнергией и разного рода устройства – от усилителя руля до кондиционера. Также необходимо существенно снизить стоимость.

Вторая проблема электромобилей – инфраструктура. Для большого парка электромобилей потребуется густая сеть станций подзарядки. Трансформаторные подстанции должны обеспечить подзарядку, если все жители обслуживаемых кварталов одновременно поставят электромобили на подзарядку.

Кроме вышеназванных проблем, следует принимать во внимание, что при производстве электромобилей используются редкоземельные металлы, причём их в два раза больше, чем в автомобилях с ДВС. А учитывая, что Китай является ведущей страной в мире по добыче многих редких металлов (относительная доля Китая при производстве редкозёмов в мировом горнорудном и металлургическом производстве около 90 % [6]), возникает опасность, что страны-производители электромобилей окажутся в зависимости от одной страны – Китая.

При эксплуатации электромобилей их батареи заряжаются электричеством, которое используется в данной стране. В среднем по миру 60 % электроэнергии получают из ископаемого топлива, а значит и для использования в электромобилях. Но ископаемое топливо, сгорая на тепловых электростанциях, образует парниковые газы. Следовательно, в этом случае электромобиль, который потребляет такое электричество, не является экологически чистым видом транспорта.

В настоящее время экологически чистая электроэнергия производится в Норвегии (97 % вырабатывается на ГЭС) и Франции (75 % на АЭС).

Если заряжать все электромобили от возобновляемых источников электричества, парниковые газы будут выбрасываться в атмосферу при производстве цемента и стали, технологии которых требуют затрат углеводородного топлива (только при строительстве колонны ветрогенератора высотой около 150 м требуется 1500 т железа и 2500 т бетона), изготовлении ветро- или гелиогенераторов, а также при производстве самих электромобилей. Воздействие производства электромобилей на окружающую среду этим не ограничивается. Производство электромобилей при сроке их службы 20 лет создаёт в три раза больше токсичных отходов, чем производство автомобиля с ДВС. Причина в основном заключается в большем использовании тяжёлых металлов [2].

В итоге для развития низкоуглеродного транспортного сектора необходимы низкоуглеродное развитие всех составляющих промышленной цепочки транспортной отрасли, а также низкоуглеродное производство, эксплуатация и утилизация транспортных средств.

Вышеперечисленное приведено не для того, чтобы отказаться от электромобилей – наиболее экологически чистого вида транспорта. Указывая на уже выявленные проблемы (в последующем проблемы проявятся дополнительно), мы подчёркиваем, что нужно оценить и понять последствия новой технологии, а не судить поверхностно и делать громкие заявления в её пользу. Нельзя просто вообразить идеальные, не загрязняющие окружающую среду машины, – и бесспорно приниматься насаждать их.

**Список литературы**

1 **Смил, В.** От микроорганизмов до мегаполисов. Поиск компромисса между прогрессом и будущим планеты : [пер. с англ.] / В. Смил. – М. : Эксмо, 2023. – 704 с.

2 **Смил, В.** Как устроен мир на самом деле: Наше прошлое, настоящее и будущее глазами учёного: [пер. с англ.] / В. Смил – М. : КоЛибри : Азбука-Аттикус, 2022. – 384 с.

3 **Якунин, В. И.** В будущее России, с высокой скоростью : монография / В. И. Якунин. – М. : Научный эксперт, 2012. – 216 с.

4 **Цзэн Шаоцзюнь**. Новый путь: Китайская стратегия. «Низкий углеродный след+» : [пер. с англ.] / Цзэн Шаоцзюнь. – СПб. : TeamBook2 : ИГ «Лениздат», 2022. – 496 с.

5 **Роудс, Р**. Энергия : История человечества : [пер. с англ.] / Р. Роудс. – М. : КоЛибри : Азбука-Аттикус, 2021. – 496 с.

6 **Питрон, Г.** Третья цифровая война: Энергетика и редкие металлы : [пер. с англ.] / Г. Питрон. – М. : Альпина Про, 2021. – 234 с.

УДК 628.196

# ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОСАЖДЕНИЯ ОКСИДА ЖЕЛЕЗА НА ПОВЕРХНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ФИЛЬТРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

*Д. Э. ПРОПОЛЬСКИЙ*
*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Одной из наиболее распространённых проблем водоподготовки подземных вод Республики Беларусь является повышенная концентрация соединений двухвалентного железа ($Fe^{2+}$) и марганца ($Mn^{2+}$) [1]. Согласно [2], концентрации $Fe^{2+}$ и $Mn^{2+}$ в питьевой воде не должны превышать 0,3 мг/л и 0,1 мг/л соответственно. Возможными причинами повышенной концентрации данных металлов может являться наличие в почве Fe-, Mn-содержащих пород и минералов, их взаимодействие с подземными водами в результате фильтрации дождевых вод через них. Также загрязнение почвы данными металлами возникает в результате контакта с эксплуатируемой автомобильной техникой (коррозия корпуса и его деталей, утечка технических жидкостей).

Для большинства методов обезжелезивания и деманганации подземных вод обязательным этапом является фильтрация через инертные материалы. Это этап позволяет задерживать образовавшиеся в результате водоподготовки осадки, в том числе осадки окисления железа и марганца. Важным критерием эффективной эксплуатации фильтрационных установок является выбор фильтрующего материала на основе его технических и экономических параметров [3]. Кроме распространённых материалов загрузки фильтров (кварцевый песок, антрацит, цеолит, керамзит, гравий и т. д.) могут применяться модифицированные материалы. Получение такого материала (с улучшенными физико-химическими свойствами, составом и текстурой поверхности) достигается в результате различных комбинаций термической и реагентной обработки исходного материала [3, 4]. Также нанесение на поверхность материала различных оксидов металлов (например, Fe, Mn, Mg, Ca, Si [3]) позволяет осуществлять очистку воды от соединений железа и марганца путём их каталитического окисления.

В ранее проведенных экспериментальных исследованиях [5, 6] осуществлялась модификация исходного антрацита методом экзотермического горения в растворах [7–10]. В качестве окислителя был использован нитрат железа $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$, а восстановителя – мочевина U ($CH_4N_2O$) или лимонная кислота CA ($C_6H_8O_7$). Концентрации реагентов устанавливались в зависимости от концентрации насыщенного раствора нитрата (от 5 до 40 %). Согласно [6] максимальные концентрации растворов FeU и FeCA составляют 30 %. Использование более высоких концентраций приводило к слипанию зёрен исходного материала, а также при использовании CA – к активному пенообразованию и загустеванию раствора.

Результаты энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии образцов, представленных в таблице 1, подтвердили, что использование более высоких концентраций растворов приводит к снижению концентрации железосодержащих фаз на поверхности материала.

*Таблица 1* – **Результаты энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии**

| Образец | Массовое содержание железа на поверхности материала, мас. % | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 |
| FeU | 5,77±1,51 | 32,5±11,17 | 28.09±13,96 | 58,76±10,76 | 44,54±0,93 |
| FeCA | 18,32±7,64 | 27,0±5,66 | 27,78±35,60 | 33,15±7,14 | 28,12±28,33 |

Установлено, что содержание железосодержащих фаз на поверхности образцов FeCA 5 % превышает соответствующий показатель образца FeU 5 % в 3,18 раза. Между тем при дальнейшем увеличении концентрации растворов наблюдается обратная закономерность: концентрация железосодержащих фаз на поверхности образцов FeU становится выше образцов FeCA в 1,2–1,77 раза. Это также подтверждает ранее сделанные выводы [10], что мочевина является более перспективным восстановителем для получения модифицированного материала в сравнении с лимонной кислотой. Также поверхность гранул антрацита имеет и пористую, и гладкую структуру, что влияет на эффективность равномерного нанесения покрытия и объясняет наличие большого стандартного отклонения для представленных образцов. Дальнейшее лабораторное исследование образцов позволит провести более углубленный анализ определения оптимальных концентраций синтеза модифицированных фильтрующих материалов для целей обезжелезивания подземных вод.

**Список литературы**

1 **Романовский, В. И.** Анализ загрязнений источников питьевого водоснабжения в Республике Беларусь / В. И. Романовский // Вестник БрГТУ. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – 2014. – № 2. – С. 65–67.

2 Об утверждении гигиенических нормативов : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 25 янв. 2021 г. № 37 // ЭТАЛОН: информ.-поисковая система (дата обращения: 23.06.2025).

3 **Propolsky, D.** Iron and Manganese Removal from Groundwater: Comprehensive Review of Filter Media Performance and Pathways to Polyfunctional Applications/ D. Propolsky, V. Romanovski // Environmental Science: Water Research & Technology. – 2025. – Vol. 11. – P. 2499–2515.

4 **Пропольский, Д. Э.** Фильтрующие материалы для обезжелезивания и деманганации подземных вод: критерии подбора, разновидности и условия применения / Д. Э. Пропольский // Водоснабжение и санитарная техника. – 2025. – № 4. – С. 10–19. – DOI: 10.35776/VST.2025.04.02.

5 **Пропольский, Д. Э.** Концентрационные параметры растворов нитратов для нанесения монофункциональных покрытий фильтрующих материалов / Д. Э. Пропольский, А. Д. Шеко // IV Республиканский форум молодых ученых учреждений высшего образования с международным участием : сб. материалов форума, Гомель, 18–20 мая 2025 г. / редкол. : Д. Л. Коваленко (гл. ред.) [и др.] ; М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2025. – С. 65–67.

6 **Шеко, А. Д.** Определение максимальных концентраций растворов нитратов для синтеза монофункциональных модифицированных фильтрующих материалов / А. Д. Шеко ; науч. рук. Д. Э. Пропольский // Материалы 81-й студенческой науч.-техн. конф. в рамках Междунар. молодежного форума «Креатив и инновации 2025», 22 мая 2025 г. / Белорус. нац. техн. ун-т, кафедра «Водоснабжение и водоотведение» ; сост.: С. А. Дубенок, А. А. Куралёнок. – Минск : БНТУ, 2025. – С. 62–65.

7 **Пропольский, Д. Э.** Принципиальная схема синтеза полифункциональных фильтрующих материалов методом экзотермического горения в растворе / Д. Э. Пропольский // Вода. Газ. Тепло – 2025 : материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 15–16 мая 2025 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: С. В. Харитончик, Д. Г. Ливанский, В. А. Кусяк [и др.]. – Минск, 2025. – С. 165–168.

8 **Пропольский, Д. Э.** Модифицированный активированный уголь для обезжелезивания подземных вод / Д. Э. Пропольский, В. И. Романовский, Е. В. Романовская // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер.: Водохоз. строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – 2019. – № 2. – С. 47–50.

9 Полифункциональный модифицированный уголь для очистки подземных вод / Д. Э. Пропольский, В. И. Романовский // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2020. – № 4. – С. 103–111.

10 **Propolsky, D.** Modified activated carbon for deironing of underground water / D. Propolsky, E. Romanovskaia, W. Kwapinski, V. Romanovski // Environmental Research. – 2020. – Vol. 182. – P. 108996. – IF 6.2 Q1. DOI: 10.1016/j.envres.2019.108996.

УДК 628.144

# АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА НАДЕЖНОСТЬ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

*А. М. РАТНИКОВА, И. А. САЛЯНКО*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В настоящее время все большее внимание уделяется вопросам безопасности функционирования различных систем, и надежность функционирования систем становится все более значимым аспектом. Надежность трубопроводных систем – это свойство системы сохранять во времени в установленных пределах значения своих параметров, характеризующих способность обеспечивать заданный режим работы. Являясь комплексным свойством, надежность в зависимости от назначения объекта и условий применения может включать безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств [1].

Рассматривая в качестве примера систему водоснабжения, можно выделить ряд факторов, влияющих на надежность системы:

– нормативный срок эксплуатации трубопровода;
– фактический срок эксплуатации трубопровода;
– материал труб;
– диаметр труб;
– гидравлические показатели (скорости течения, напорные характеристики);
– глубина залегания труб, тип грунта;
– механические воздействия на трубопровод (за счет движения транспорта и др.);
– конфигурация сети;

– качественные характеристики транспортируемой воды.

Для повышения надежности системы водоснабжения необходимо не только учитывать существующее состояние систем, но и предусматривать различные способы повышения показателей надежности при реконструкции систем.

Для обеспечения надежности системы (исключения перерыва в водообеспечении потребителей) необходимо планировать структурное резервирование системы водоснабжения, которое предусматривает закольцовывание тупиковых участков [2], устройство перемычек.

Водопроводные сети городов Республики Беларусь имеют значительный срок эксплуатации, иногда значительно превышающий нормативный, что часто ведет к авариям на сети водоснабжения.

Основными причинами аварий трубопроводов являются:

– износ трубопроводов;

– неправильный выбор материала труб и класса их прочности;

– несоблюдение технологии производства работ по укладке и монтажу трубопроводов;

– недостаточность или отсутствие необходимых мер по защите трубопроводов от агрессивного воздействия и т. п.

Использование труб из полимерных материалов позволяет во многом решить проблемы, обозначенные выше. Например, максимальный срок службы напорного трубопровода для систем хозяйственно-питьевого водоснабжения при температуре $T_{макс}$ = 20 °С составляет 50 лет.

Для систем хозяйственного водоснабжения в последнее время преимущественно используются трубы из полимерных материалов. Для стабильного функционирования системы имеет важное значение правильный выбор типа трубопровода с характеристиками, отвечающими заданным требованиям.

В качестве исходных данных при выборе серии напорных полимерных труб учитываются:

– назначение напорного трубопровода;

– расчетный срок службы напорного трубопровода;

– вид и рабочие параметры транспортируемой среды (давление и температура);

– коэффициенты запаса прочности;

– способ прокладки напорного трубопровода.

При выборе типа труб и соединительных деталей следует учитывать рабочее давление в напорных трубопроводных системах, температуру и агрессивность транспортируемой среды, необходимый срок службы труб, способ соединения труб, виды фасонных частей (фитингов) и технико-экономические показатели. Выбор типа напорных труб и соединительных деталей должен быть обоснован гидравлическими и прочностными расчетами.

Требуемая серия напорных полимерных труб для ряда максимальных рабочих давлений и определенного класса эксплуатации определяется в зависимости от величины расчетного напряжения в стенке трубы (σ). При выборе требуемой серии напорных полипропиленовых труб необходимо, чтобы было выполнено следующее условие: серия $S_{треб} \leq$ расчетной серии $S_{max} = \sigma / p_{макс}$.

При проектировании трубопроводов системы водоснабжения можно спрогнозировать срок службы трубопровода, находящегося в определенных условиях [3].

К преимуществам использования труб из полимерных материалов следует отнести:

– небольшой вес изделия, по сравнению с металлическими в 3,5–4 раза легче, соответственно отсутствует необходимость применения тяжелой техники;

– срок службы при грамотной эксплуатации около 50 лет;

– низкая шероховатость внутренней поверхности обеспечивает снижение гидравлического сопротивления потока, что в свою очередь дает устойчивость к образованию отложений на внутренней поверхности труб;

– стойкость внутренней и наружной поверхности к воздействию грунтовых вод;

– высокая коррозийная стойкость по сравнению с металлическими трубами и изделиями.

Исходя из вышеперечисленного можно сделать вывод, что надежность системы водоснабжения во многом зависит от правильности выбора конфигурации сетей, материала, диаметров и толщины стенок труб, учитывающих конкретные условия эксплуатации систем.

**Список литературы**

1 ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – Введ. 01.07.1990. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 37 с.

2 СН 4.01.01-2019 Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Строительные нормы проектирования. – Введ. 09.07.2020. – Минск : Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2018. – 75 с.

3 ГОСТ ISO 13760-2024. Трубы из пластмасс для транспортирования жидкостей под давлением. Правило Майнера. Метод расчета накопленного повреждения. – Введ. 29.11.2024 / подготовлен обществом с ограниченной ответственностью «Группа ПОЛИПЛАСТИК». – Минск : Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2024. – III, 8 с. – URL: https://files.stroyinf.ru/Data/845/84540.pdf?ysclid=mflioz13fx109124102 (дата обращения: 10.09.2025).

УДК 628.35:628.395

# ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕКОНСТРУКЦИИ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ: ОПЫТ МОДЕРНИЗАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ БИОЛОГИЧЕСКОГО УДАЛЕНИЯ АЗОТА И ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ФОСФОРА

*А. А. РОДЕНКО*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Реконструкция городских очистных сооружений является важнейшей задачей в условиях роста антропогенной нагрузки на водные объекты и ужесточения экологических нормативов сброса сточных вод. Устаревшие технологии очистки, применявшиеся при строительстве большинства действующих очистных сооружений несколько десятилетий назад, не обеспечивают требуемую степень очистки по таким показателям, как биогенные элементы (азот и фосфор). Кроме того, физический износ оборудования и конструкций приводит к повышенным эксплуатационным затратам, увеличению аварийных ситуаций и снижению эффективности очистки сточных вод.

Кроме технологических аспектов, актуальность реконструкции обусловлена экономическими факторами. Эксплуатация морально и физически устаревших очистных сооружений связана с высокими затратами на ремонты, значительными потерями ресурсов и рисками штрафных санкций за превышение допустимых концентраций загрязняющих веществ. Внедрение энергоэффективного оборудования, цифровых систем мониторинга и современных методов обработки осадка обеспечивает долгосрочную экономию бюджетных средств и снижает экологические риски. Таким образом, реконструкция очистных сооружений представляет собой не только экологическую, но и экономическую необходимость, способствуя устойчивому развитию городской инфраструктуры [1].

Объектом реконструкции являются очистные сооружения г. Владикавказа. Первая очередь очистных сооружений производительностью 123 тыс. м$^3$/сут была введена в эксплуатацию в 1976 году, вторая очередь производительностью 157 тыс. м$^3$/сут – в конце 1990 года. Фактическая производительность очистных сооружений существенно снизилась и составляет 96,5 тыс. м$^3$/сут. Действующие очистные сооружения включают сооружения и оборудование механической (решетки, горизонтальные песколовки, преаэратор, первичные радиальные отстойники) и биологической очистки (четырехкоридорные аэротенки вытеснители с регенераторами, вторичные радиальные отстойники). В настоящее время в эксплуатации находятся только решетки и горизонтальные песколовки, а далее сточные воды по транспортирующему лотку отводятся в реку Терек. Сооружения по обработке осадка (радиальные илоуплотнители, метантенки) не работают и выведены из эксплуатации. Сырой осадок и избыточный активный ил отводятся на иловые площадки для обезвоживания и складирования.

На основании проведенного обследования очистных сооружений установлено множество дефектов и повреждений основных элементов сооружений:

– сколы, отслоения, продольные и поперечные трещины защитного слоя бетона;

– разрушение бетонного слоя с оголением арматуры;

– коррозия металлоконструкций (ограждений, площадок обслуживания, щитовых затворов) и технологического оборудования (воздуховодов, трубопроводов, решеток);

– признаки глубокой коррозии в местах оголения арматуры.

Критическое состояние существующих очистных сооружений обусловлено совокупностью факторов, среди которых основными являются продолжительная эксплуатация без капитального ремонта и деструктивное влияние климатических условий.

Качественный состав сточных вод, поступающих на очистные сооружения, существенно отличаются от проектных значений. Концентрации загрязняющих веществ в составе сточных вод на выпуске очистных сооружений превышают допустимые значения по показателям: взвешенные вещества, $БПК_5$, ХПК, азот общий, азот аммонийный, фосфор общий и фосфор фосфатов (таблица 1).

Очистные сооружения не только находятся в неудовлетворительном состоянии, но и не обеспечивают требуемую степень очистки. Без проведения реконструкции очистных сооружений получить нормативные концентрации загрязняющих веществ в очищенных сточных водах невозможно.

*Таблица 1* – **Качественная характеристика сточных вод г. Владикавказа**

| Показатели | Концентрации загрязняющих веществ, мг/дм$^3$, в составе сточных | | | |
|---|---|---|---|---|
| | поступающих на очистные сооружения | | на выпуске очистных сооружений | |
| | проектные | фактические | фактические | допустимые |
| Взвешенные вещества, мг/дм$^3$ | 210 | 286,83 | 48 | 5,0 |
| $БПК_5$, мг$O_2$/дм$^3$ | 192 | 309,62 | 25,5 | 3,0 |
| ХПК, мг$O_2$/дм$^3$ | 150 | 553,67 | 170,2 | - |
| Азот общий, мг/дм$^3$ | 60 | 50,52 | 48,3 | 15 |
| Азот аммонийный, мг/дм$^3$ | 50 | 38,4 | 60,1 | 0,4 |
| Фосфор общий, мг/дм$^3$ | 10 | 10,2 | 8,6 | 0,5 |
| Фосфор фосфатов, мг/дм$^3$ | 8 | 6,41 | 5,32 | 0,2 |

На основании проведенного комплексного обследования и оценки эффективности работы очистных сооружений г. Владикавказа разработаны рекомендации по их реконструкции, направленные на достижение нормативных показателей очистки сточных вод, соответствующих требованиям сброса в р. Терек.

Разработанный проект реконструкции предусматривает комплексную модернизацию системы очистки сточных вод, включающую:

– интенсификацию существующих технологических процессов за счет внедрения современных решений, повышающих эффективность очистки и производительность сооружений;

– оптимизацию состава очистных сооружений на основе детального анализа технологической схемы с подбором наиболее эффективного оборудования для механической, биологической и физико-химической очистки;

– совершенствование системы обработки осадка путем модернизации узлов обезвоживания и утилизации, обеспечивающей снижение объема образующихся осадков и их экологически безопасное использование.

Проект реконструкции включает следующие основные технологические решения:

– замена устаревших среднепрозрачных решеток на современные ступенчатые решетки с мелким прозором для повышения эффективности задержания взвешенных веществ;

– оптимизация работы горизонтальных песколовок путем стабилизации скорости движения сточных вод и модернизации системы удаления осадка (замена гидроэлеваторов);

– демонтаж преаэраторов как технологически устаревших элементов;

– замена пластиковых водосливов на коррозионностойкие конструкции из нержавеющей стали;

– трансформация традиционных аэротенков-вытеснителей в современные сооружения с глубокой биологической очисткой, включающие: организацию анаэробной, аноксидной и аэробной зон; установку мешалок в анаэробных и аноксидных зонах; полную замену системы аэрации на мелкопузырчатый пневмоаэраторы ООО «ГЕФЛИС»;

– применение технологии обеззараживания гипохлоритом натрия с возможностью дальнейшей модернизации на УФ-обеззараживание.

Применение технологической схемы биологической очистки с выделением анаэробной, аноксидной и анаэробной зон обеспечивает снижение концентрации фосфора общего до 1,7–2,0 мг/дм$^3$. Для обеспечения нормативного содержания общего фосфора в очищенных сточных водах (не более 0,5 мг/дм$^3$) предусмотрено дополнительное химическое осаждение с использованием сульфата алюминия в качестве коагулирующего реагента [2]. Данный реагент был выбран благодаря его высокой эффективности осаждения фосфатов и оптимальному соотношению стоимости и производительности.

Введение раствора сульфата алюминия осуществляется на завершающей стадии биологической очистки – непосредственно перед подачей сточных вод во вторичные отстойники. Такой подход позволяет:

– максимально использовать синергию биологического и химического методов очистки;

– обеспечить образование плотных хлопьев фосфата алюминия, которые эффективно задерживаются в отстойниках;

– минимизировать расход реагента за счет точного дозирования, автоматически корректируемого в зависимости от текущей концентрации фосфора.

Дополнительным преимуществом применения сульфата алюминия является его способность улучшать седиментационные свойства активного ила, что повышает эффективность работы вторичных отстойников. Для контроля процесса предусмотрена система онлайн-мониторинга остаточного фосфора с обратной связью на дозирующее оборудование.

Проектные решения по обработке осадков предусматривают комплексный технологический подход, обеспечивающий полный цикл переработки образующихся осадков сточных вод. Отбросы, задерживаемые решетками, подвергаются обезвоживанию с использованием шнекового пресса, что позволяет значительно уменьшить их объем. Пескопульпа, образующаяся в процессе очистки, поступает в два имеющихся песковых бункера для последующего удаления. Смешанные осадки, поступающие с решеток, первичных и вторичных отстойников, направляются в метантенки для анаэробного сбраживания в мезофильных условиях, где происходит их стабилизация с одновременным выделением биогаза.

Механическое обезвоживание осадков осуществляется с помощью фильтр-прессов, обеспечивающих снижение влажности до технологически оптимальных значений. Дальнейшая обработка включает сушку в барабанной сушилке с последующим термическим обезвреживанием в барабанных печах. Образующийся в метантенках биогаз используется в качестве энергоресурса для поддержания температурного режима сбраживания, а также для работы сушильных установок и печей.

Вторичный продукт термической обработки – зола – обладает потенциалом для полезного применения в строительной отрасли в качестве добавки при производстве бетонных смесей. Данный подход позволяет минимизировать объем отходов, направляемых на захоронение, и реализовать принципы ресурсосберегающей и экологически ориентированной технологии.

Разработанные проектные решения направлены на модернизацию всего технологического цикла – от механической очистки до обработки образующихся осадков. Переход на современные системы биологической очистки с глубоким удалением азота и фосфора, внедрение энергоэффективного оборудования и автоматизированных систем управления позволят не только достичь нормативных показателей сброса, но и значительно повысить эксплуатационную надежность комплекса. Особое внимание уделено вопросам утилизации осадков, где предусмотрено создание замкнутого цикла переработки с максимальным использованием энергетического потенциала биогаза и полезным применением золы.

Реализация проекта реконструкции позволит не только устранить текущие экологические риски, но и создать технологический запас прочности для будущего развития городской системы канализации. Комплексный подход к модернизации, сочетающий техническое переоснащение с внедрением ресурсосберегающих технологий, обеспечит устойчивую и экономически эффективную работу очистных сооружений на десятилетия вперед, что соответствует принципам экологически ориентированного развития городской инфраструктуры.

**Список литературы**

1 **Новикова, О. К.** Реконструкция систем водоснабжения и канализации : учеб. пособие / О. К. Новикова. – Гомель : БелГУТ, 2023. – 212 с.

2 **Новикова, О. К.** Технология очистки сточных вод : учеб. пособие / О. К. Новикова. – Гомель : БелГУТ, 2020. – 302 с.

УДК 631.624

## КОМПЛЕКСНОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ПОВЫСИТЕЛЬНЫХ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ

*Н. П. СЕРЕДА*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

**Актуальность.** Повысительные насосные станции являются важнейшим элементом городской системы водоснабжения. Значительное количество насосных станций третьего подъёма функционирует в течение продолжительного времени, в результате чего установленное насосное оборудование и используемые системы автоматизации требует замены [3].

Для повышения эффективности функционирования насосных станций третьего подъёма и их модернизации необходимо проведение комплексного обследования, позволяющего выявить технические и эксплуатационные проблемы и определить оптимальные пути их устранения, что, в конечном счёте, будет способствовать повышению надёжности и эффективности работы всей системы водоснабжения.

**Цель работы**: проведение комплексного обследования повысительных насосных станций города Гомеля для определения их технического состояния и особенностей функционирования.

**Основные результаты**. По состоянию на 2025 год на балансе государственного предприятия «Гомельводоканал» находится 69 повысительных насосных станций, классифицируемых как станции третьего подъёма. Эти объекты размещены преимущественно в районах многоэтажной жилой застройки и выполняют функцию обеспечения подачи воды на верхние этажи зданий, где давление в системе недостаточно. Для реализации данной задачи в эксплуатации находится 210 насосных агрегатов, отличающихся разнообразием гидравлических характеристик. Основную долю составляют консольно-моноблочные насосные установки, которые отличаются компактностью конструкции и удобством технического обслуживания. В условиях высокой плотности застройки, требующей поддержания повышенного давления, также применяются вертикальные высоконапорные насосные агрегаты, способные обеспечить стабильную подачу на верхние уровни зданий.

На основании результатов технического обследования и анализа эксплуатационной документации установлено, что около 60 % повысительных насосных станций предприятия «Гомельводоканал» находятся в эксплуатации более 15 лет. Продолжительный срок службы оборудования оказывает негативное влияние на общую эффективность функционирования системы водоснабжения, что негативно отражается на стабильности подачи воды и увеличивает затраты на её транспортировку.

На большинстве станций, а именно около 70 %, используются морально и физически устаревшие насосные агрегаты, гидравлические и энергетические характеристики которых значительно уступают современным аналогам; установлены устаревшие схемы управления, не соответствующие современным требованиям энергоэффективности и автоматизации; отсутствуют частотные преобразователи, а применяется схема прямого подключения агрегатов к электрической сети, что приводит к повышенному энергопотреблению и ограничивает возможность адаптации режима работы оборудования в соответствии с текущим уровнем водопотребления [2].

В большинстве повысительных насосных станций города Гомеля около 70 % применяется типовая трёхагрегатная схема, в соответствии с которой основной насосный агрегат функционирует в постоянном режиме, обеспечивая базовый уровень подачи воды и поддержание требуемого давления, вспомогательный агрегат активируется при превышении нормативного расхода воды, что характерно для утренних и вечерних пиков потребления (он работает совместно с основным насосом, стабилизируя параметры давления), а резервный агрегат предназначен для включения в случае отказа основного оборудования, обеспечивая непрерывность водоснабжения и минимизируя риски перебоев. Такая конфигурация способствует повышению надёжности системы, гибкости её работы и устойчивости к аварийным ситуациям [1].

В рамках комплексного обследования была проведена оценка технического состояния всех повысительных насосных станций города. В качестве примера рассмотрена станция, расположенная в микрорайоне Федюнинский по адресу: ул. Оранжерейная, 117, а. На данном объекте в эксплуатации находятся три насосных агрегата марки КМ. Управление их работой осуществляется посредством одного частотного преобразователя и двух датчиков давления: первый датчик установлен на вводном коллекторе и обеспечивает контроль входного давления; второй датчик размещён на напорном коллекторе и фиксирует выходное давление. Станция также оснащена запорно-регулирующей арматурой, обеспечивающей корректное функционирование оборудования.

Установлено, что использование одного частотного преобразователя для управления несколькими насосными агрегатами нельзя считать оптимальным решением. В условиях повышенного водопотребления (утренние и вечерние пики) при недостаточной мощности основного насоса в работу вводится дополнительный агрегат. Однако его подключение осуществляется напрямую к электрической сети, что приводит:

– к увеличению энергопотребления;

– снижению общей энергоэффективности станции;

– ограничению возможностей гибкого регулирования режимов работы.

Для повышения энергоэффективности и надёжности функционирования данной станции и аналогов рекомендуется провести модернизацию, предусматривающую установку отдельного частотного преобразователя для каждого насосного агрегата, что позволит:

– гибко регулировать производительность оборудования в зависимости от текущего уровня водопотребления;

– снизить эксплуатационные энергозатраты;

– повысить устойчивость и надёжность системы водоснабжения.

Повысительная насосная станция, расположенная по адресу: ул. Белорусская, 13, а, оснащена четырьмя высоконапорными вертикальными насосными агрегатами марки WILO. Система управления станции включает четыре частотных преобразователя, каждый из которых обеспечивает индивидуальное регулирование работы соответствующего агрегата. Такая схема управления позволяет гибко адаптировать режим функционирования насосов к текущим параметрам водопотребления, что обеспечивает:

– оптимизацию эксплуатационных характеристик оборудования;

– снижение энергозатрат;

– повышение общей энергоэффективности работы станции.

В ходе комплексного обследования особое внимание было уделено анализу продолжительности работы насосных агрегатов. Установлено отсутствие функции ротации насосов: один насосный агрегат работает в постоянном режиме, остальные остаются неиспользуемыми. Длительный простой оборудования повышает риск возникновения неисправностей и выхода агрегатов из строя, что снижает общую устойчивость системы водоснабжения. Для повышения эффективности работы повысительных насосных станций рекомендуется установка новейших систем управления, которые предусматривают функцию ротации насосных агрегатов для исключения длительного простоя резервного оборудования.

**Выводы.** В результате проведённого комплексного обследования повысительных насосных станций г. Гомеля установлено следующее:

1) данные объекты характеризуются различным уровнем технического оснащения и отличаются по параметрам, обеспечивающим поддержание требуемого давления в распределительной сети;

2) на станциях со сроком эксплуатации более 15 лет, а это более 60 %, используется устаревшее насосное оборудование, также отсутствуют современные системы автоматизированного управления.

Указанные факторы оказывают негативное влияние на эффективность функционирования станций, приводят к снижению надёжности водоснабжения и увеличению эксплуатационных затрат, связанных с обслуживанием насосных агрегатов.

Для повышения эффективности работы повысительных насосных станций рекомендуется:

– внедрение современных систем управления и автоматизации;

– установка энергоэффективного насосного оборудования;

– своевременная замена изношенных элементов.

Реализация данных мероприятий позволит:

– повысить надёжность и стабильность функционирования станций;

– снизить энергопотребление;

– оптимизировать эксплуатационные расходы.

**Список литературы**

1 **Зинаков, В. А.** Проблемы, возникающие при проектировании и эксплуатации канализационных насосных станций / В. А. Зинаков // Передовые технологии в системах водоотведения населенных мест : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 12–13 февр. 2020 г. – Минск : БГТУ, 2020. – С. 81–83.

2 Насосные станции : пособие для студентов специальностей 1-70 04 01 «Водохозяйственное строительство» и 1-70 07 01 «Строительство тепловых и атомных электростанций» / В. В. Ивашечкин, Н. Н. Линкевич, О. В. Немеровец, Я. А. Семенова. – Минск : БНТУ, 2022. – 123 с.

3 СН 4.01.012-2019. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. – Минск : Минстройархитектуры Республики Беларусь, 2020. – 78 с.

УДК: 69.059.72

# ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ И ПЕРЕПЛАНИРОВКЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

*В. И. СЛЕПЦОВА*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Реконструкция и перепланировка производственных зданий – это сложный многоуровневый процесс, включающий инженерно-технические, организационно-строительные и нормативно-правовые аспекты. Реконструкция зданий представляет собой комплекс мероприятий по изменению их структуры и функционального назначения. В случае производственных объектов она позволяет увеличивать объем и качество продукции без расширения площадей, снижая затраты и сроки реализации.

Рациональное определение приоритетов и методов реконструкции обеспечивает оптимизацию текущего функционирования предприятий и создает условия для их долгосрочного развития, способствуя устойчивому росту экономических показателей.

Процесс выполнения строительно-монтажных работ в ходе реконструкции и перепланировки существующих промышленных предприятий представляет собой довольно сложную задачу, так как осуществляется в рамках действующего генерального плана предприятия. Это создает дополнительные трудности для организации и технологии выполнения работ, а также для обеспечения материально-техническими ресурсами [2].

Выделены основные особенности организации строительных работ при реконструкции и перепланировке производственных объектов:

1) системная многокомпонентность процессов реконструкции и перепланировки;
2) необходимость инженерно-технического обследования конструкций;
3) проведение сопутствующей модернизации инженерных систем;
4) соблюдение требований нормативно-правовых актов;
5) организация строительных процессов в условиях функционирующего предприятия;
6) применение современных методов проектирования.

Реконструкция и перепланировка производственных объектов характеризуются множественностью взаимосвязанных факторов, которые необходимо учитывать при планировании и реализации строительных работ. Многокомпонентность процессов проявляется в необходимости одновременного анализа состояния конструкций, инженерных систем, технологических процессов предприятия и нормативной базы.

При организации реконструкции игнорирование хотя бы одного из этих факторов может привести к снижению надежности конструкций, нарушению технологических процессов и увеличению эксплуатационных рисков. Следовательно, комплексный подход является обязательным условием планирования и реализации строительных мероприятий.

Кроме того, многокомпонентность процессов требует применения современных методов проектирования и управления строительством, позволяющих учитывать взаимодействие конструктивных элементов, инженерных сетей и технологических потоков, что обеспечивает более высокий уровень управляемости проектом и снижает вероятность ошибок [1].

Инженерно-техническое обследование несущих конструкций является основной процедурой, определяющей возможность перепланировки и реконструкции зданий. Анализ состояния фундаментов, колонн, ригелей и плит перекрытий позволяет выявить дефекты, определить остаточный ресурс конструкций и установить необходимость их усиления.

Практика реконструкции показывает, что эффективными методами усиления являются установка металлических и композитных обойм, торкретирование, инъекционное введение специальных смесей и монтаж дополнительных несущих элементов. Эти мероприятия позволяют восстановить или повысить несущую способность конструкций и соответствовать требованиям.

Особое внимание уделяется деформационным швам и узлам сопряжения, которые являются наиболее уязвимыми при изменении планировочной структуры. Игнорирование этих элементов может привести к снижению пространственной жесткости здания и возникновению аварийных ситуаций.

Перепланировка производственных помещений сопровождается реконструкцией инженерных сетей, включая вентиляцию, отопление, электроснабжение, водоснабжение, канализацию и противопожарную

защиту. Рациональная модернизация этих систем обеспечивает соответствие современным стандартам безопасности, энергоэффективности и санитарным требованиям.

Например, системы вентиляции и кондиционирования должны обеспечивать нормативные параметры микроклимата, соответствующие технологическим процессам производства. Электроснабжение требует перерасчета нагрузок, установки резервных источников и оптимизации схем. Противопожарная защита должна включать автоматические установки пожаротушения, системы дымоудаления и эвакуационные пути в соответствии с нормами. Кроме того, модернизация инженерных систем позволяет интегрировать новые технологии и оборудование, что повышает производительность и снижает эксплуатационные расходы предприятия.

Соблюдение нормативной и правовой базы является обязательным условием реализации строительных работ. Основными документами являются Кодекс Республики Беларусь об архитектурной, градостроительной и строительной деятельности, СН, СП и ТКП, а также санитарные и противопожарные нормы.

Проектная документация должна проходить экспертизу и согласование в надзорных органах: Министерстве архитектуры и строительства Республики Беларусь, органах государственной строительной экспертизы, МЧС, органах охраны окружающей среды. Это обеспечивает контроль соответствия проектных решений требованиям безопасности и минимизирует риски для эксплуатации объекта. Несоблюдение нормативов может привести к юридической ответственности и повышению вероятности аварийных ситуаций.

Особенностью реконструкции является выполнение строительных работ на действующем предприятии. При проведении строительных работ при перепланировке производственных помещений важно учитывать множество факторов, чтобы минимизировать риски и обеспечить эффективность процесса.

Для минимизации влияния на технологический процесс применяются поэтапные методы организации строительных работ, календарно-сетевое планирование, использование модульных и сборных конструкций, а также внедрение многоуровневого контроля качества.

Эффективная организация строительного процесса позволяет минимизировать простои производства, снизить вероятность ошибок и обеспечить рациональное использование материальных и трудовых ресурсов. Контроль качества должен осуществляться на всех уровнях – авторским, техническим и государственным надзором.

BIM-технологии и информационное моделирование являются ключевыми инструментами при реконструкции и перепланировке производственных объектов. Цифровая модель позволяет прогнозировать взаимодействие конструктивных и инженерных элементов, выявлять коллизии и оптимизировать строительные процессы. Применение BIM снижает риски ошибок, сокращает сроки согласований и повышает управляемость проектом. Особенно важно это для объектов с высокой плотностью инженерных коммуникаций, где любые изменения могут привести к значительным технологическим и финансовым последствиям [3].

Эффективная реконструкция и перепланировка возможны только при комплексном подходе, объединяющем технические, инженерные, организационные и нормативные меры. Такой подход обеспечивает сохранение надежности конструкций, эффективность функционирования инженерных систем, соблюдение норм безопасности и рациональное использование ресурсов.

Комплексность процесса также предполагает учет экономических, технических и эксплуатационных факторов, что позволяет планировать реконструкцию на долгосрочную перспективу и повышать качество реализации проектов. Комплексная механизация и применение современных технологий помогут эффективно организовать строительные работы без значительного влияния на производственные процессы.

Успешная реконструкция производственных объектов требует комплексного подхода, интегрирующего техническое обследование, модернизацию инженерных систем и строгое соблюдение нормативных требований. Применение BIM-технологий для управления проектами и организация работ без остановки основного производства позволит обеспечить увеличение мощности, снижение издержек и повышение безопасности предприятия.

**Список литературы**

1 **Шерешевский, И. А.** Конструирование промышленных зданий и сооружений : учеб. пособие для студентов строит. специальностей / И. А. Шерешевский. – М. : Архитектура-С, 2010. – 168 с.

2 **Леонович, С. Н.** Технология производства строительных работ при реконструкции действующих объектов : учеб. пособие/ С. Н. Леонович. – Минск : БНТУ, 2022. – 529 с.

3 **Уткин, В. В.** Современные технологии строительной индустрии / В. В. Уткин, Ю. Н. Чумерин. – М. : Русский Издательский Дом, 2008. – 100 с.

УДК 625.8

# ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ОТВЕДЕНИЯ И ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТОЧНЫХ ВОД ПРЕДПРИЯТИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

*К. А. СЛЕПЦОВА*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Качественный состав поверхностных сточных вод с территорий промышленных предприятий имеет, как правило, более сложный состав, чем с селитебной территории, и определяется характером основных технологических процессов [1]. Концентрации загрязняющих веществ в составе дождевых и талых сточных вод зависят как от периода формирования, так и от вида поверхности водосбора, санитарно-технического состояния и режима уборки территории, эффективности работы систем газо- и пылеулавливания, организации складирования и транспортирования сырья, промежуточных и готовых продуктов, а также отходов производства [2].

Очистные сооружения поверхностных сточных вод ОАО «Гомсельмаш» предназначены для удаления нефтепродуктов, взвешенных веществ и цинка из промышленно-дождевых сточных вод до нормативных значений, установленных для отведения в систему дождевой канализации г. Гомеля. Существующие очистные сооружения включают:

– регулирующий резервуар, разделенный на 2 секции, каждая из которых имеет следующие размеры: длина $L_{рег}$ = 22 м, ширина $B_{рег}$ = 20 м, глубина $H_{рег}$ = 4,0 м;

– двухсекционные нефтеловушки (2 шт.), производительностью 15 л/с каждая (с размерами: ширина секции $B$ = 3,05 м, длина $L$ = 24,2 м, высота $H$ = 5,8 м), оборудованные системой сбора нефтепродуктов (скребковый механизм) и погружными насосами для сброса осадка в емкость для подсушивания осадка;

– кассетный фильтр для доочистки сточных вод;

– емкость для подсушивания осадка с дренажной системой и возвратом дренированной воды в «голову» очистных сооружений.

В целях рационального использования водных ресурсов предприятия предлагается направлять очищенные поверхностные сточные воды на подпитку системы водоснабжения котельной. Такой подход позволит снизить объём забора свежей воды и одновременно уменьшить количество сбрасываемых сточных вод.

Характеристики поступающих и очищенных сточных вод, образующихся на территории ОАО «Гомсельмаш», а также нормативные показатели для дождевых сточных вод, направляемых в городскую канализационную сеть, и требования к воде, подаваемой на подпитку оборотной системы водоснабжения котельной, представлены в таблице 1. Состав усреднённых сточных вод, поступающих на очистные сооружения, определён на основании эксплуатационных данных предприятия за период 2018–2024 гг.

*Таблица 1* – **Состав исходных сточных вод и требования к очищенной воде**

В мг/дм$^3$

| Показатели качества | Концентрация загрязнений в поступающих сточных водах | Концентрация загрязнений в очищенных сточных водах | Требования к отведению в сети городской канализации [3] | Требования к очищенной воде, подаваемой в котельную |
|---|---|---|---|---|
| БПК$_5$ | 47,5 | 5,53 | 50 | 8,0 |
| Взвешенные вещества | 150,0 | 21,2 | 500 | 5,0 |
| Нефтепродукты | 4,2 | 1,1 | 3,0 | 3,0 |
| Цинк | 0,21 | 0,21 | 0,01 | – |
| Жесткость общая | 35 | 25 | – | 2,0 |
| pH | 8,5–10,5 | 6,5–8,5 | 6,5–8,5 | 8,5–10,5 |

На основании анализа данных, приведенных в таблице 1, и результатов проведенных обследований существующих очистных сооружений установлено, что нормативные показатели для подачи в оборотную систему превышены по взвешенным веществам и общей жесткости, поэтому необходимо проведение модернизации очистных сооружений.

Исходя из проведенного анализа современных методов очистки поверхностных сточных вод, а также технических решений в области сбора и отведения дождевых и талых сточных вод, разработан вариант реконструкции очистных сооружений ОАО «Гомсельмаш». Регулирование расхода поверхностного стока, его аккумулирование и предварительная механическая очистка осуществляются в существующем регулирующем резервуаре, обеспечивающем задержание 80–90 % взвешенных веществ [4]. Для отстаивания применяется действующая горизонтальная нефтеловушка, которая обеспечивает одновременное удаление взвешенных веществ с гидравлической крупностью более 0,2 мм/с и всплывающих нефтепродуктов. Образующиеся осадок и нефтепродукты выводятся раздельно, что облегчает их последующую утилизацию. Эффективность очистки по нефтепродуктам составляет 60–70 %. Реконструкция нефтеловушки предполагает замену механизма сбора нефтепродуктов с поверхности воды на сорбирующие подушки. Заключительным этапом очистки является фильтрация. На существующих сооружениях установлены фильтры с коксовой загрузкой, которая не обеспечивает требуемого уровня очистки. В связи с этим предлагается её замена на пенополиуретановый сорбент. Пенополиуретан обладает развитой удельной поверхностью и высокой межзерновой пористостью; по сравнению с коксом он снижает окисляемость воды на 15–30 %, увеличивает продолжительность фильтроцикла в 1,5–1,6 раза и уменьшает удельный расход воды на промывку загрузки в 1,8 раза [5]. Применение фильтров с пенополиуретановой загрузкой обеспечивает глубокую очистку сточных вод от эмульгированных и растворённых нефтепродуктов (до 0,3 мг/дм$^3$), а также от мелкодисперсных взвешенных веществ. Для накопления очищенной воды перед её подачей в цикл водоподготовки котельной предусматривается устройство аккумулирующего резервуара.

На основе проведённого анализа существующих очистных сооружений и предложенных методов реконструкции установлено, что модернизация очистных сооружений обеспечит значительное улучшение качества очищенных сточных вод, соответствующее действующим нормативным требованиям использования в системе оборотного водоснабжения котельной. Внедрение предложенных технических решений, таких как замена коксовой фильтрующей загрузки на пенополиуретановую и реконструкция нефтеловушки, позволит достичь более глубокой очистки сточных вод и повысить эффективность функционирования очистных сооружений предприятия.

**Список литературы**

1 **Новикова, О. К.** Отведение и очистка поверхностных сточных вод : [монография] / О. К. Новикова. – Гомель : БелГУТ, 2019. – 179 с.

2 **Алешин, В. С.** Особенности состава и очистки поверхностного стока в г. Ростов-на-Дону / В. С. Алешин, А. В. Алешин, Л. Г. Муртазина // Водоснабжение и канализация. – 2010. – № 3–4. – С. 109–112.

3 СН 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения. – Введ. 01.01.1986. – Минск : Минстройархитектуры РБ, 2004. – 45 с.

4 Рекомендации по расчёту систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока с селитебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты. – М. : НИИ ВОДГЕО, 2014. – 88 с.

5 **Толстов, А. М.** О перспективах применения полимерных материалов для сорбентов, предназначенных для очистки воды от нефтепродуктов / А. М. Толстов // Вестник Технологического университета. – 2023. – Т. 26, № 3. – С. 45–50. – DOI: 10.12345/vestnik.2023.03.45.

УДК 656.25.071.84

## ГАРМОНИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ В УСТРОЙСТВАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

*М. М. СОКОЛОВ, Л. А. РЫБИНА*
*Омский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация*

В Правилах технической эксплуатации железных дорог РФ (ПТЭ) требования к качеству электрической энергии, питающей устройства хозяйства автоматики и телемеханики ограничены п. 119 «Номинальное напряжение системы электроснабжения переменного тока на устройствах железнодорожной автоматики, телемеханики и связи должно быть 220 В при однофазном электропитании или 380 В – при трехфазном электропитании. Отклонения напряжения от указанных величин допускается не более ±10 %». Помимо самого напряжения на работу устройств микропроцессорной

техники железнодорожной автоматики и телемеханики оказывает влияние наличие высших гармонических составляющих. Они же являются причиной преждевременного старения изоляции. Требования к гармоническому составу в ПТЭ не прописаны, но они приведены в ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [1].

Коллективом кафедры «Автоматика и телемеханика» ОмГУПСа совместно с работниками Омской дистанции СЦБ были проведены измерения напряжения, питающего релейный шкаф автоблокировки числового кода, расположенного на участке с электротягой постоянного тока. Осциллограммы изменения мгновенных значений напряжений основного и резервного питания на входе релейного шкафа (РШ) приведены на рисунке 1.

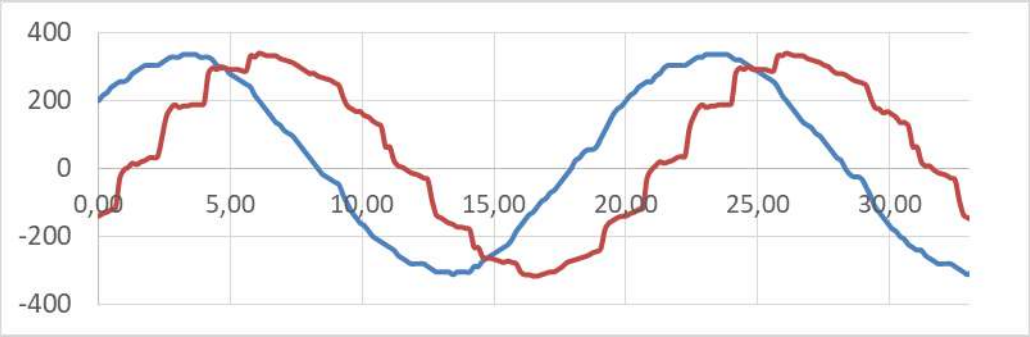



Рисунок 1 – Осциллограммы изменения мгновенных значений напряжений питания на входе РШ

Показателями качества электроэнергии (КЭ), относящимися к гармоническим составляющим напряжения, являются:

– значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения до 40-го порядка $k_i$ в процентах напряжения основной гармонической составляющей $U_1$ в точке передачи электрической энергии;

– значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (отношения среднеквадратического значения суммы всех гармонических составляющих до 40-го порядка к среднеквадратическому значению основной составляющей) $K_U$, %, в точке передачи электрической энергии.

К массиву значений, полученных при помощи осциллографа, было применено преобразование Фурье по нижеприведенным формулам.

Функция, описывающая значения выборки синусоидального сигнала с частотой, соответствующей $k$-й гармонической составляющей:

$$y(n) = \sin(2k_i\pi n / N), \tag{1}$$

где $y(n)$ – выборка синусоидального сигнала с частотой, соответствующей частоте $i$-й гармонике; $n$ − порядковый номер значения в выборке; $N$ − количество значений в выборке за период.

Формула вычисления функции спектральной плотности $i$-й гармоники:

$$A_i = 2\sqrt{(a_i)^2 + (b_i)^2}, \tag{2}$$

где $a_i$ и $b_i$ рассчитываются по формулам:

$$a_i = \left(\sum_{n=0}^{N-1} y(n)\cdot\cos\left(2i\pi\cdot\frac{n}{N}\right)\right) / N;\ b_i = \left(\sum_{n=0}^{N-1} y(n)\cdot\sin\left(2i\pi\cdot\frac{n}{N}\right)\right) / N. \tag{3}$$

В результате преобразования Фурье были получены значения амплитуд гармонических составляющих, а по ним – значения коэффициентов гармонических составляющих.

Гармонический состав питающих напряжений основного и резервного источников питания приведен на рисунке 2.

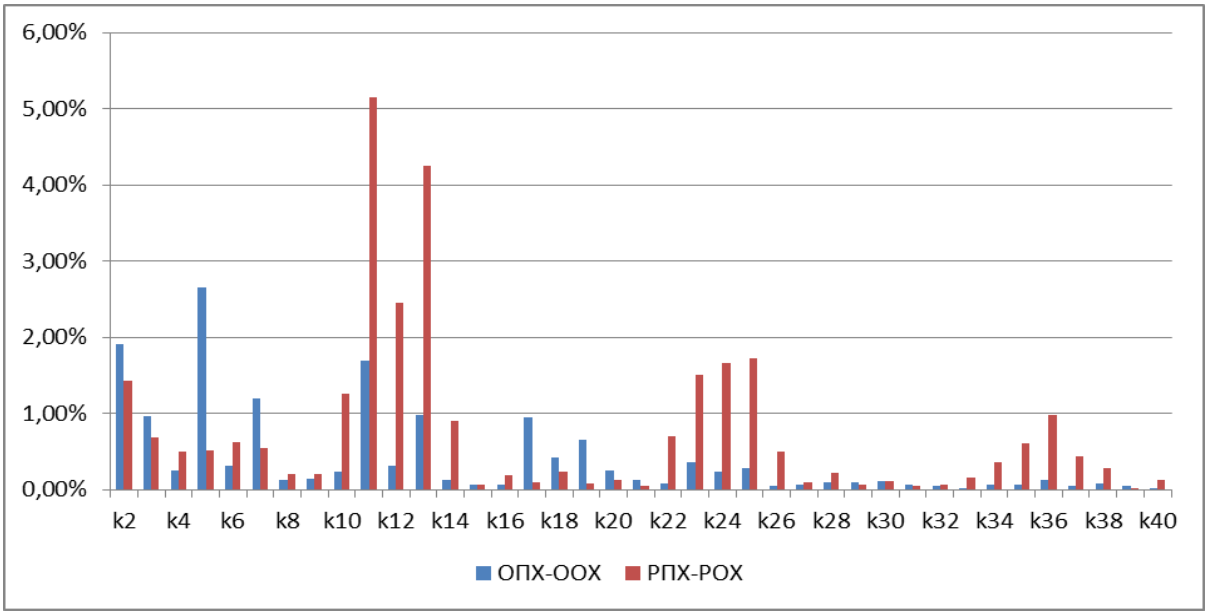



Рисунок 2 – Гармонический состав питающих напряжений

В целом, электрическая энергия, получаемая от основного источника питания, в момент проведения измерений почти удовлетворяет всем требованиям ГОСТ [1] за исключением коэффициента $k_{12}$. Электрическая энергия, получаемая от резервного источника питания, в момент проведения измерений характеризуется большим отклонением от допустимых значений коэффициентов гармонических составляющих.

В энергосистеме железной дороги при электротяге постоянного тока спектр питающих выпрямленных напряжений содержит в основном гармоники порядка $n$ = 1, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, и проведенные исследования, в целом, это подтвердили. В то же время наличие в симметричных электрических системах в условиях влияния электротяги постоянного тока четных гармонических составляющих может свидетельствовать о несимметрии напряжений трехфазной системы электроснабжения, питающей тяговую подстанцию.

**Список литературы**

1 ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 01.07.2014. – М. : Стандартинформ, 2014. – 16 с.

2 **Бадер, М. П.** Электромагнитная совместимость : учеб. для вузов железнодорожного транспорта / М. П. Бадер. – М. : УМК МПС, 2002. – 638 с.

УДК 346; 349.6

## ПРАВОВОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТРАНСПОРТА

*О. Н. ТОЛОЧКО*
*Белорусский государственный университет, г. Минск*

Развитие мировой экономики на ближайшие десятилетия во многом определяется глобальным изменением климата. Важную роль в достижении устойчивого развития, энергетической и экологической безопасности играет транспортная система, которая является крупным потребителем энергии и источником выброса углекислого газа. Соответственно, экологизация транспортной системы, её перевод на рельсы устойчивого развития имеет огромное значение в рамках происходящего в мире энергетического перехода.

По оценкам Международного энергетического агентства (IEA), сухопутный, морской и воздушный транспорт в настоящее время в основном работает на ископаемом топливе. Для достижения углеродной нейтральности необходимо, чтобы выбросы от транспортного сектора сократились к

2030 г. на 25 % независимо от роста спроса. IEA призывает правительства стимулировать переход к менее углеродоёмким способам передвижения, таким как ходьба, велосипед и общественный транспорт, а также к более энергоэффективным видам транспорта, таким как электромобили. Однако в период с 1990 по 2023 г. выбросы от транспорта росли в среднем на 1,7 % – быстрее, чем в любом другом секторе, за исключением промышленности, которая также росла примерно на 1,7 %. Чтобы достичь углеводородной нейтральности к 2050 г., выбросы в транспорте должны снижаться более чем на 3 % каждый год до 2030 г. Наиболее перспективным направлением декарбонизации транспортных систем, по оценкам IEA, является их электрификация. Переход на электрические транспортные средства – очевидный тренд в рассматриваемой сфере.

В июле 2024 г. состоялось знаковое событие: продажи электромобилей в Китае превысили долю в 50 % в общем объеме продаж легковых машин, при том, что всего лишь 3 года назад их доля составляла лишь 7 %. При сохранении тренда доля продаж электромобилей в Китае уже в 2027 г. может превысить 75 %. В настоящее время Китай активно стимулирует переход автопарка на электромобили или, по меньшей мере, на более эффективные автомобили с ДВС, предлагая субсидии за утилизацию старого автомобиля в обмен на новый. Помимо этого, снижению потребления нефти в Китае способствует перевод грузового транспорта с использованием дизельного топлива на сжиженный природный газ. Доля продаж грузовиков на сжиженном природном газе уже превышает 30 %. Газ стоит дешевле, чем дизель, к тому же, по данным Institute for Energy Economics and Financial Analisis, в ближайшие 4 года ожидается, что его мировое предложение вырастет на 40 %.

Снижению потребления углеводородного топлива в Китае способствуют также инфраструктурные инвестиции, в частности, ежегодное строительство нескольких тысяч километров электрифицированных железных дорог. Благодаря постоянному строительству новых ГЭС в Китае растет также протяженность речных путей и объемы речных грузоперевозок, которые замещают гораздо менее энергоэффективные перевозки автотранспортом. При этом КНР стремится перевести на электротягу и сам водный транспорт, как речной, так и внутренний морской.

При «консервативном» предположении, что продажи электромобилей продолжат прирастать ежегодно на 3,5–4 млн, можно подсчитать, что их доля в мировых продажах превысит 50 % уже к 2032 г., а значит мировое потребление ископаемого топлива легковым автопарком начнет снижаться. Как и другие вопросы, касающиеся энергетического перехода, экологизация транспортных систем требует согласованной правовой политики государств – членов ЕАЭС и развития в соответствующем направлении норм права ЕАЭС. Транспортные системы невозможно рассматривать в узких рамках государственных границ; смысл их состоит именно в обеспечении международной торговли и коммуникаций.

Вместе с тем правовые меры по экологизации транспортных систем могут наталкиваться на довольно жёсткое сопротивление автопроизводителей. Так, в ЕС сроки введения обязательных требований в отношении выбросов неоднократно переносились, введение системы измерений выбросов $CO_2$ для тяжёлых грузовых автомобилей задерживалось, а транспорт в целом был исключён из сферы применения Директивы 2009/125 о введении правового регулирования для установления требований экодизайна к энергопотребляющей продукции (пункт 3 статьи 1). В последнее время ситуация изменилась, однако представляется, что Евразийскому экономическому союзу, по всей вероятности, тоже предстоит долгий путь преодоления протекционистских настроений, прежде чем можно будет говорить о реальной трансформации.

Таким образом, экологизация транспорта представляет важную задачу в свете глобальной климатической повестки и осуществления энергетического перехода. Достижение углеродной нейтральности в транспортных системах требует диверсификации экономики, развития низкоуглеродных транспортных технологий и надлежащего правового обеспечения как на национальном уровне, так и на уровне интеграционных объединений, таких как ЕАЭС и СНГ.

Повышению эффективности правовой политики в области экологизации транспортных систем, как представляется, может способствовать формирование профильной структуры, в функции которой входил бы расчёт оптимальных целевых показателей перехода на экологичные транспортные технологии. Наличие количественно измеримых целей позитивно сказалось бы на общей экологической повестке.

В Европейском Союзе Директива 2019/1161 о чистых транспортных средствах устанавливает национальные цели для государственных закупок, которые определяются как минимальный про-

цент экологически чистых транспортных средств в совокупном объёме государственных закупок в государстве – члене ЕС. Государства-члены по своему усмотрению распределяют их между различными заказчиками, однако каждое государство должно выполнить как минимум половину целевого показателя закупок экологически чистых автобусов в каждом периоде за счет закупки автобусов с нулевым уровнем выбросов. Меры для ускорения энергетического перехода включают в себя также увеличение производства, распределения и использования возобновляемых и низкоуглеродных видов топлива на транспорте, финансовую поддержку замены автопарков на транспортные средства с низким и нулевым уровнем выбросов, увеличение количества пассажиров, использующих железную дорогу и общественный транспорт, перемещение грузопотока на зеленые виды транспорта. Схожие методы регулирования могут быть применены и в ЕАЭС, – разумеется, с настройкой количественных параметров под экономические возможности и потребности транспортных систем государств-членов.

В целом выработка наиболее перспективных направлений транспортной политики в ЕАЭС с учётом энергетического перехода и сокращения выбросов $CO_2$ должна осуществляться не только органами ЕАЭС и представителями профильных министерств (транспорта, охраны окружающей среды, энергетики и др.), но и с привлечением широкого круга специалистов и экспертов, а также членов бизнес-сообщества в лице транспортных предприятий, природоохранных неправительственных организаций и представителей общественности. В ЕАЭС, как и в Европейском Союзе, уже накоплен опыт проведения специализированных форумов, таких как, например, Евразийский международный форум Digital & Smart Transport. С учётом этого опыта, при содействии экспертного сообщества и гражданских институтов, целесообразно подготовить проект соглашения по экологизации транспортных систем, – возможно, в более широком выражении и применительно ко всем профильным отраслям экономики: энергетике, промышленности, сельскому хозяйству и т. д. Именно такой подход представляется наиболее релевантным с позиций масштабности стоящих перед государствами-членами задач в условиях глобального энергетического перехода.

Достижению амбициозных целей по обеспечению экологической и энергетической безопасности транспортных систем, как представляется, будет способствовать совершенствование норм права ЕАЭС, в частности, включение в статью I Приложения № 24 пункта 2 со следующим содержанием: «Скоординированная (согласованная) транспортная политика осуществляется в целях устойчивого развития транспортных систем государств-членов, их интеграции в мировую транспортную систему, повышения качества транспортных услуг и защиты окружающей среды в процессе эксплуатации транспорта на территории Союза». Экологическая составляющая скоординированной транспортной политики ЕАЭС может быть усилена включением в статью I пункта 4 с изложением общих принципов транспортной политики ЕАЭС: «4. Государства-участники координируют транспортную политику на принципах недискриминации, транспарентности, учёта интересов каждого государства и его транспортных организаций, а также защиты окружающей среды и постепенного сокращения выбросов парниковых газов».

# 5 БЕЗОПАСНОСТЬ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

УДК 625.143.482.033

## ПОВЫШЕНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СДВИГУ РЕЛЬСОШПАЛЬНОЙ РЕШЕТКИ В ЗАГРЯЗНЕННОМ БАЛЛАСТЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИМ СУФЛЯЖЕМ

*А. А. АБРАШИТОВ*
*Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва*

Одной из главных проблем устройства и содержания бесстыкового пути является обеспечение его устойчивости [1]. Основным фактором устойчивости является сопротивление сдвигу шпал в балласте (до 50 % от общего сопротивления [1]). Сопротивление поперечному сдвигу железобетонных шпал в балласте складывается из сопротивления подошвы шпалы по балласту (~50–60 %) и боковых поверхностей шпалы (~35–40 %), и сопротивления балластного плеча сдвигу (~7–10 %) [2].

На возникновение состояния потери устойчивости бесстыкового пути может влиять зона отрицательного прогиба рельсов под подвижным составом, в результате образования которой нарушается контакт между щебеночным основанием и нижними постелями шпал (рисунок 1). Зона отрицательного прогиба для пути на железобетонных шпалах составляет 2,50–2,00 м [1]. Когда вся конструкция находится в состоянии, близком к возможной потере устойчивости, сопротивление сдвигу по подошвам близлежащих к зоне отрицательного прогиба шпал должно быть достаточно высоким [1].

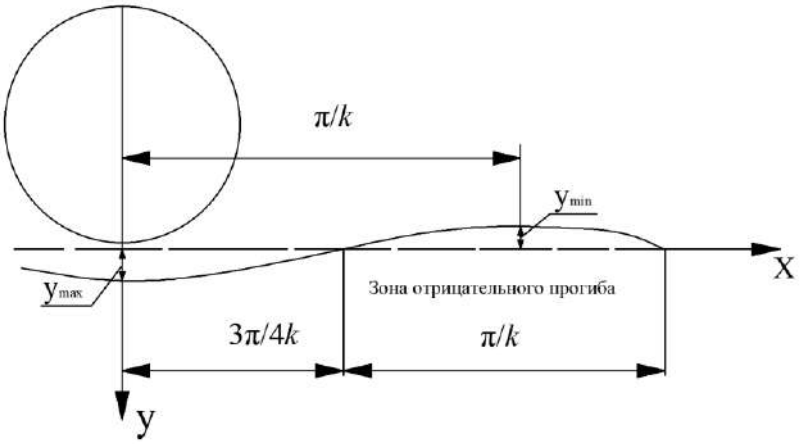



Рисунок 1 – Зона отрицательного прогиба

**Мероприятия по повышению сопротивления трению загрязненного балласта по подошве шпалы.** В МИИТе был создан испытательный стенд, на котором были выполнены лабораторные эксперименты по моделированию сопротивления железобетонной шпалы сдвигу (рисунки 2, 3).

Стенд, на котором производились испытания, представлял собой прочную металлическую раму, закрепленную над ящиком. Ящик размером 150×30×40 см был заполнен балластом.

Использовались три вида балласта:

– крупный новый балластный щебень фракции 25–60 мм, соотношение по грансоставу: частиц размером 25–40 мм – 25 %; фракции 40–60 мм – 75 %;

– старый балластный щебень, загрязненность 30 %;

– мелкий новый промытый щебень, фракции 5–10 мм.

На балласт был уложен коротыш железобетонной шпалы ШС-АРС (см. рисунок 2).

Рисунок 2 – Коротыш железобетонной шпалы ШС-АРС

Для имитации нагрузки от подвижного состава использовался вертикальный домкрат с нагрузкой до 110 кН, упирающийся в прикрепленную к полу прочную металлическую раму, а нижней частью в рельс. Для создания горизонтальной сдвигающей нагрузки использовался горизонтальный гидроцилиндр с нагрузкой до 50 кН, упирающийся в неподвижный упор (см. рисунок 3).

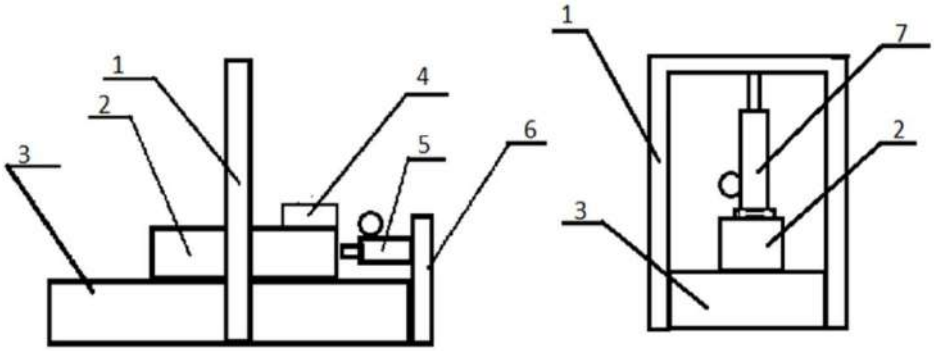



Рисунок 3 – Схема опытного стенда:
*1* – рама; *2* – коротыш шпалы; *3* – ящик со щебнем; *4* – вибратор; *5* – горизонтальный домкрат с манометром; *6* – упор; *7* – вертикальный домкрат с манометром

На каждый образец последовательно подавалась вертикальная нагрузка 0, 10, 30 и 50 кН из условия обеспечения под штампом напряжения σ = 0,32 МПа [3].

Эксперименты проводились с различными видами подшпального основания:

– крупный новый уплотненный щебень;

– грязный (30 % загрязнения) щебень;

– грязный уплотненный щебень, после уплотнения с засыпанным поверх него и уплотненным мелким щебнем.

Уплотнение щебня имитировалось нагружением коротыша вертикальной нагрузкой 49 кН, с передачей на коротыш вибрации частотой 12 Гц, амплитудой 1 мм на протяжении 50 тысяч циклов.

По результатам испытаний были сделаны следующие выводы:

1 Выправка образца грязного щебня подбивкой привела к снижению поперечного сопротивления образца на 30 %.

2 Сравнение поперечной устойчивости выправленного подбивкой и уплотненного циклической нагрузкой грязного щебня и его же, выправленного поверх суфляжем, но неуплотненного, показало, что поперечное сопротивление сдвигу обоих образцов практически одинаково.

3 При уплотнении образца грязного щебня, выправленного подбивкой, и образца грязного щебня, выправленного суфляжем, поперечная устойчивость образца, выправленного суфляжем, при нагрузках от верхнего строения пути в 2,5 раза выше, чем у образца, выправленного подбивкой щебня.

4 Образец грязного щебня, выправленный пневматическим суфляжем, после уплотнения сравним по характеристикам поперечной устойчивости коротыша на сдвиг с аналогичными характеристиками, полученными на образце с крупным новым щебнем (рисунок 4).

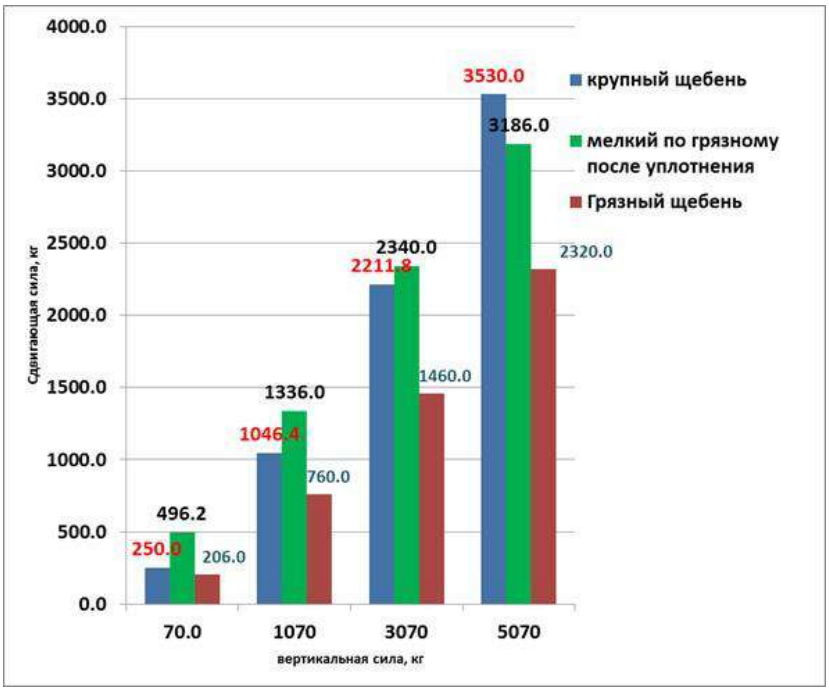



Рисунок 4 – Сравнение сопротивления сдвигу нового уплотненного щебня и грязного уплотнённого щебня с засыпанным поверх него и уплотненным суфляжным слоем щебня

**Мероприятия по увеличению общего сопротивления рельсошпальной решетки сдвигу за счет уплотнения балласта в ящике и плеча балластной призмы.** Параметром, который используется для оценки бокового сопротивления, является сила, необходимая для перемещения шпалы на определенное расстояние, как правило, до 6,4 мм [4].

Характерные примеры кривых зависимости поперечных сил сдвига от смещения для деревянных шпал приведены на рисунке 5 для выправки подбивкой с ней же, но после уплотнения плеча балластной призмы и балласта в шпальном ящике. Сопротивление перемещению увеличивается в обоих случаях. Уплотнение значительно увеличивает сопротивление по сравнению с выправкой без уплотнения. Известно три компонента поперечного сопротивления шпал, зависящие от балласта, такие, как сопротивление подошвы, боковое трение и сопротивление плеча [4].

Вклад каждого из этих элементов показан на рисунке 6 [4]. Боковое сопротивление здесь задается как отношение произвольно взятого значения для сравнения [4].

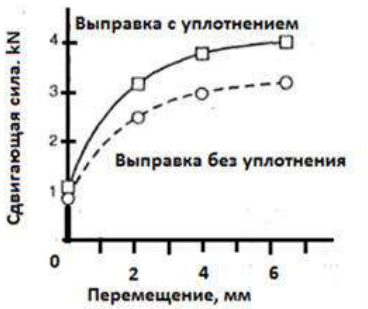



Рисунок 5 – Влияние уплотнения балласта на общее поперечное сопротивление деревянной шпалы

Рисунок 6 – Вклад элементов балластной призмы в общую устойчивость балласта (в долях единицы)

Базовое сопротивление представляет собой силу, необходимую чтобы преодолеть сопротивление трения с приложенной нормальной силой, равной весу шпал. Коэффициент трения в значитель-

ной степени зависит от шероховатости дна шпал. Этот компонент сопротивления будет возрастать с увеличением веса шпалы (см. рисунок 6, *а*). Боковое сопротивление вызвано сопротивлением трению по бокам шпалы от нормальной силы, вызванной боковым давлением балласта в ящике.

Компонент бокового сопротивления возрастает линейно от глубины балласта в ящике (см. рисунок 6, *б*). Давление балластом по бокам шпалы значительно увеличивается при уплотнении. Сопротивление плеча – это результирующая пассивного давления сопротивления со стороны плеча, которое возникает при сдвиге шпалы, и активного давления со стороны плеча, которое выталкивает шпалу, оно увеличивается непосредственно от высоты над постелью и с шириной плеча (см. рисунок 6, *с*). Уплотнение плеча приведет к увеличению этого сопротивления.

Вклад в сопротивление основания деревянной шпалы составляет лишь около 14 % от общего сопротивления. Боковое трение составляет около 57 %, т. е. более половины от общего числа, а сопротивление плеча составляет около 29 %. Боковое сопротивление под нагрузкой становится гораздо больше, чем для ненагруженной шпалы, так как компонент трения по основанию будет существенно возрастать, при том, что сопротивления от балласта в шпальном ящике и толщина плеча балластной призмы остаются без изменений. Таким образом, процентное увеличение бокового сопротивления от уплотнения должны быть значительно меньше под поездной нагрузкой, чем это показано на рисунке 6 [4].

Боковое сопротивление после уплотнения также зависит от высоты подъемки во время выправки. При увеличении высоты подъемки от 0 до 40 мм, боковое сопротивление уменьшается с 80 до 65 %. Рисунок 7 также показывает, что уплотнение щебня в ящике и уплотнение плеча увеличивает общее сопротивление сдвигу.

Под действием нагрузки, пренебрегая уплотнением балласта в шпальном ящике и уплотнением плеча балластной призмы, все три компонента сопротивления будут возрастать (рисунок 8). Общее сопротивление шпал увеличится и процент от общего вклада бокового трения в ящике сократится. Важно помнить, что этот вывод верен для ненагруженного пути. Для нагруженного пути процент вклада бокового трения по балласту в ящике будет совершенно иным и значительно снизится [4]. Преимущество уплотнения балласта ящика и плеча – уменьшение времени действия предупреждения по снижению скорости движения после выправки. После наработки пропущенного тоннажа (2 млн т) боковое сопротивление становится примерно таким же, как до выправки (см. рисунок 8).

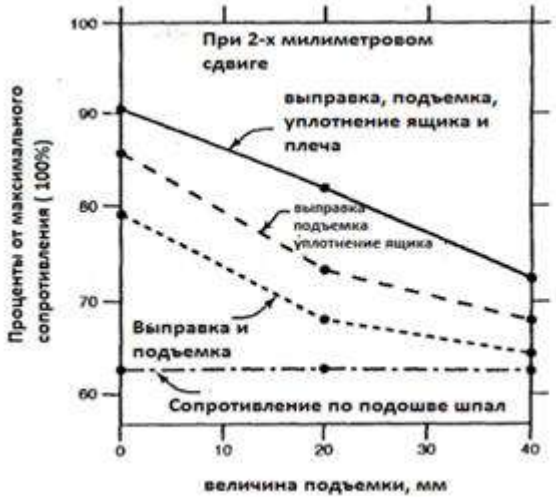



Рисунок 7 – Влияние величины подъемки и способов обработки балластной призмы после выправки на поперечное сопротивление сдвигу

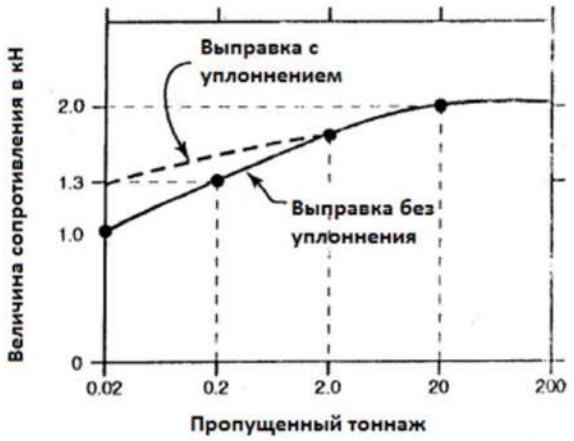



Рисунок 8 – Соответствие работы по уплотнению балласта в шпальном ящике и плеча балластной призмы пропущенному тоннажу

Результаты экспериментов, полученные в рамках лабораторного цикла исследований [4], позволяют предположить допустимость использования выправки железнодорожного пути в профиле с использованием пневматической подсыпки мелкого щебня (пневматического суфляжа). Такой способ выправки не приведет к снижению сопротивления выправленных шпал поперечному сдвигу.

Уплотнение балласта плеча балластной призмы ведет к повышению сопротивления рельсошпальной решетки поперечному сдвигу при проведении выправки пути в продольном профиле, что особенно актуально для зоны отрицательного прогиба рельсошпальной решетки [1].

**Список литературы**


1 **Бромберг, Е. М.** Устойчивость бесстыкового пути / Е. М. Бромберг. – М. : Транспорт, 1966. – С. 67.

2 **Виногоров, Н. П**. Устойчивость бесстыкового пути / Н. П. Виногоров // Путь и путевое хозяйство. – 2005. – № 8. – С. 7–13.

3 Организация высокоскоростного движения на участке Москва – Санкт-Петербург : отчет о НИР 6.3.00. – М. : МИИТ, 2005.

4 **Selig, E. T.** Track Geotechnology and Substructure Management / E. T. Selig, J. M. Waters. – London : Thomas Telford Services Ltd., 1994.

5 Сопротивление шпал поперечному сдвигу // Железные дороги мира. – 2014. – № 1.



УДК 625.85


## ЭФФЕКТИВНЫЕ СТАБИЛИЗИРУЮЩИЕ ДОБАВКИ НА ОСНОВЕ МЕСТНОГО ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ АСФАЛЬТОБЕТОНОВ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ВЯЖУЩЕГО


*А. А. АФАНАСЕНКО*

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*


Долговечность дорожных покрытий является одним из приоритетных направлений в развитии транспортной инфраструктуры. Особое место в современной практике занимают щебеночно-мастичные асфальтобетонные смеси (ЩМА), характеризующиеся высоким содержанием щебня и битумного вяжущего. Данная структура обеспечивает высокую износостойкость и сопротивление пластическим деформациям, однако приводит к технологическим сложностям, главной из которых является стекание вяжущего при высоких температурах производства и укладки.

Мировой опыт применения стабилизирующих волокон в асфальтобетоне можно разделить на несколько категорий [1–3]. *Натуральные органические волокна*, к которым относятся волокна растительного происхождения из джута, хлопка, льна, сизаля, койры и т. д. [4, 5] (рисунок 1). Наибольшее распространение и применение получили целлюлозные волокна, получаемые из древесины, они являются наиболее часто применяемым компонентом в составе щебеночно-мастичного асфальтобетона (SMA) [6]. Благодаря ветвистой структуре они обладают высокой абсорбционной способностью. В основном поставляются в виде гранул (например, Granocell), что удобно для заводского дозирования. Их преимущества – высокая эффективность и экологичность. Однако есть существенные недостатки, такие как повышенное влагопоглощение и риск термического разрушения при температурах приготовления смеси, особенно в условиях бесконтрольного нагрева материала.

Кокос Сизаль Лен Кенаф

Рисунок 1 – Натуральные органические волокна

*Минеральные волокна* бывают природными (асбест) и искусственными (стекловолокно, шлаковые волокна) [7, 8] (рисунок 2). Применение асбеста было прекращено практически во всех странах мира из-за экологических рисков и рисков, связанных со здоровьем дорожных рабочих [9]. Стек-

лянные волокна обладают выдающимися механическими свойствами (высокий модуль упругости, низкое удлинение), но отличаются хрупкостью [10].

Асбест Базальт Шлак Брусит

Рисунок 2 – Минеральные волокна

*Синтетические полимерные волокна* (полиэстер, полипропилен, арамид, рисунок 3) являются наиболее распространенными после целлюлозы. Они улучшают усталостную долговечность и сопротивление деформациям [11–13]. Арамидные волокна, например, сжимаясь при высоких температурах, повышают устойчивость покрытия в жарком климате [14].

Полиэстер Арамид Полипропилен Нейлон

Рисунок 3 – Синтетические полимерные волокна

В рамках концепции устойчивого развития активно изучается применение волокон из отходов. Наибольший интерес представляют кордовые волокна, извлеченные из переработанных автомобильных шин. Исследования подтверждают, что их использование улучшает прочностные характеристики и влагостойкость смесей, и они могут служить заменой стандартным целлюлозным волокнам в SMA [15].

На рынке Республики Беларусь, как и во многих других странах, доминируют импортные гранулированные добавки (VIATOP, ARBOCEL и др.), стоимость которых может достигать 2 евро за килограмм, что значительно увеличивает итоговую стоимость асфальтобетона. В связи с этим задача разработки и внедрения эффективных и экономически целесообразных стабилизирующих добавок на основе местного сырья, в том числе с использованием промышленных отходов, является крайне актуальной.

Учитывая высокую стоимость импортных аналогов и необходимость утилизации отходов, нами была предложена и запатентована новая композиционная стабилизирующая добавка [16]. В ее состав вошли: целлюлозное волокно, в качестве источника использовалась измельченная макулатура (эковата), соответствующая ГОСТ 10700; синтетическое полимерное волокно (применены невозвратные отходы производств искусственного меха и нетканых полотен, данные волокна создают в смеси пространственный армирующий каркас); термостабилизатор (в частности, Диафпен ФП), предотвращающий термоокислительное старение битума и слипание гранул добавки при хранении; битум, выполняющий роль связующего для грануляции компонентов.

Технология изготовления добавки включает смешение сухих компонентов, введение в массу разогретого битума с термостабилизатором и последующее перемешивание до однородной консистенции, пригодной для грануляции.

Для определения оптимального соотношения компонентов был проведен лабораторный эксперимент, включавший 16 различных составов добавки. Варьировались доли каждого из четырех компонентов, а также итоговое содержание добавки в асфальтобетонной смеси (от 0,1 до 0,8 %).

Для анализа полученных данных и выявления нелинейных зависимостей был применен метод множественной регрессии. Были построены три математические модели, описывающие зависи-

мость ключевых свойств смеси от рецептуры добавки: модель стекания вяжущего; модель предела прочности при растяжении при 0 °С; модель предела прочности при сжатии при 50 °С.

Высокие значения коэффициента детерминации ($R^2$) подтвердили адекватность и высокую прогностическую способность моделей. Данные модели легли в основу процесса оптимизации, целью которого было найти состав, удовлетворяющий комплексу требований: стекание вяжущего не более 0,15 %, предел прочности при растяжении в диапазоне 1,5–3,5 МПа и максимальное значение предела прочности при сжатии.

Анализ уравнений и экспериментальных данных позволил выявить оптимальные диапазоны. Например, составы с содержанием макулатуры около 40 % и выше, термостабилизатора от 6 до 9 % и синтетического волокна около 40 % чаще всего обеспечивали низкое стекание и высокую прочность. Использование моделей позволило проверить гипотезы без проведения натурных испытаний. Так, для состава, находящегося в центре оптимальных диапазонов (42 % полимерного волокна, 41 % макулатуры, 9 % термостабилизатора, 8 % битума), расчетное значение стекания при дозировке 0,8 % составило 0,08 %, что полностью совпало с экспериментом.

На основе проведенного комплексного анализа, включающего лабораторные исследования и математическое моделирование, был определен оптимальный состав стабилизирующей добавки, защищенный патентом [16]. Рекомендуемое количество вводимой добавки в асфальтобетонную смесь в зависимости о количества органического вяжущего составляет 0,3–0,8 % от массы минеральной части.

Таким образом, доказана возможность создания эффективной стабилизирующей добавки для асфальтобетонных смесей на основе местного сырья и промышленных отходов. Применение регрессионного анализа показало себя как мощный инструмент для решения многофакторных оптимизационных задач в материаловедении, позволяющий значительно сократить время разработок. Созданная добавка является конкурентоспособным аналогом импортных продуктов, способствуя снижению стоимости дорожного строительства и решая экологическую задачу утилизации отходов.

**Список литературы**


1 Fiber additives in asphalt mixtures // National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. – URL : https://nap.nationalacademies.org/read/22191/chapter/1 (date of access: 01.10.2025).

2 **Афанасенко, А. А.** Аналитический обзор методов стабилизации асфальтобетонных смесей с повышенным содержанием вяжущего / А. А. Афанасенко, П. П. Яцевич, А. В. Корончик // Весник гражданских инженеров. – 2024. – № 2 (103). – С. 59–70.

3 Долговечные асфальтобетонные покрытия автомобильных дорог, мостов и улиц. / В. А. Веренько, В. В. Занкович, А. А. Афанасенко [и др.] ; под ред. В. А. Веренько. – Минск : Арт Дизайн, 2015. – 296 с.

4 **Varma, R.** An experimental study of bituminous mixes using a natural fibre / R. Varma, R. K. Pandey // Global Journal of Engineering Science and Researches. – 2023. – Vol. 4, is. 5. – P. 63–72.

5 **Khan, G. K.** A review study of stone matrix asphalt using a natural fibre / G. K. Khan, J. Narwal // International Journal of Latest Research In Engineering and Computing. – 2017. – Vol. 5, is. 3. – P. 95–97.

6 **Кирюхин, Г. Н.** Строительство дорожных и аэродромных покрытий из щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей / Г. Н. Кирюхин, Е. А. Смирнов. – М. : Элит, 2009. – 176 с.

7 **Morova, N.** Investigation of usability of basalt fibers in hot mix asphalt concrete / N. Morova // Construction and Building Materials. – 2013. – Vol. 47. – P. 175–180.

8 **Guan, B.** Investigation of usability of brucite fiber in asphalt mixture / B. Guan, R. Xiong, R. He [et al.] // Pavement Research and Technology. – 2014. – Vol. 7, is. 3. – P. 193–202.

9 **Busching, H. W.** A state-of-the-art survey of reinforced asphalt paving / H. W. Busching, E. H. Elliott, N. G. Reyneveld // Proceedings of the Annual Meeting of the Association of Asphalt Paving Technologists. – 1970. – Vol. 39. – P. 766–798.

10 **Mahrez, A.** Prospect of using glass fiber reinforced bituminous mixes / A. Mahrez, M. Karim, H. Katman // Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. – 2003. – Vol. 5. – P. 794–807.

11 **Wu, S.** Investigation of rheological and fatigue properties of asphalt mixtures containing polyester fibers / S. Wu, Q. Ye, N. Li // Construction and Building Materials. – 2008. – Vol. 22, is. 10. – P. 2111–2115.

12 Synthetic fibers in asphalt paving mixtures // Texas Transportation Institute. – URL : https://static.tti.tamu.edu/tti.tamu.edu/ documents/319-1F.pdf. (date of access: 03.02.2024).

13 **Freeman, R. B.** Polyester fibers in asphalt paving mixtures / R. B. Freeman, J. L. Burati, S. N. Amirkhanian, W. C. Bridges // Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists. – 1981. – Vol. 89. – P. 387–409.

14 Evaluation of fiber-reinforced asphalt mixtures using advanced materials characterization tests / K. E. Kaloush, K. P. Biligiri, W. A. Zeiada [et al.] // Journal of Testing and Evaluation. – 2010. – Vol. 38, is. 4. – P. 400–411.

15 **Putman, B. J.** Utilisation of waste fibers in stone matrix asphalt mixtures / B. J. Putman, S. N. Amirkhanian // Resources Conservation and Recycling. – 2004. – Vol. 42. – P. 265–274.

16 Патент BY 12332, МПК (2006) C04B24/00 Стабилизирующая добавка для асфальтобетонной смеси : № a 20071250 ; заявлено 16.10.2007 ; опубл. 30.08.2009 / В. А. Веренько, В. В. Занкович, А. А. Афанасенко ; заявитель БНТУ. – 5 с.

УДК [625.7/.8+656.1]:504.61

# ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА КОМПОНЕНТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

*Г. В. АХРАМЕНКО, И. П. ДРАЛОВА, М. Ю. НИКИТЕНКО*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Развитие транспортной инфраструктуры является важнейшим фактором экономического роста и пространственной интеграции регионов. Автомобильные дороги – ключевой элемент транспортной инфраструктуры, обеспечивающий мобильность населения и развитие экономики. Однако их строительство и эксплуатация сопровождаются значительным техногенным воздействием на окружающую среду, что требует системного подхода к оценке и прогнозированию экологических последствий.

Основные виды воздействия автодорог на окружающую среду – это загрязнение воздуха, почвы и водных объектов; шумовое загрязнение; фрагментация природных территорий; световое загрязнение.

Загрязнение воздуха представляет собой одну из наиболее острых экологических проблем, особенно в районах с интенсивным движением транспорта и промышленной активностью. Оно оказывает значительное влияние как на здоровье человека, так и на состояние окружающей среды.

Основные источники загрязнения воздуха вблизи транспортной инфраструктуры включают:

– выхлопные газы автотранспорта, которые содержат широкий спектр вредных веществ, включая угарный газ (CO), оксиды азота ($NO_x$), углеводороды и сажу. Особенно опасны выбросы от дизельных двигателей;

– пыль от дорожного покрытия, возникающая в результате механического износа асфальта, шин и тормозных колодок. Эта пыль может содержать тяжелые металлы и микрочастицы, способные проникать в дыхательные пути;

– испарения топлива и технических жидкостей, включающие летучие органические соединения (ЛОС), образующиеся при испарении бензина, дизельного топлива, масел и других химических веществ, используемых в обслуживании транспорта.

Продукты смыва с автодорог загрязняют почву и водные объекты, принося с собой тяжелые металлы (например, из изношенных шин и тормозных колодок), нефть, антигололедные реагенты, частицы асфальта и пыль, которые ухудшают качество грунтов и воды, а также негативно сказываются на экосистемах и здоровье человека. Это происходит из-за попадания этих веществ в водоемы и грунтовые воды через дождевые и талые воды, а также из-за прямого контакта почвенного слоя с дорожным покрытием. Основными источниками загрязнения являются:

– тяжелые металлы (свинец, цинк, медь и кадмий), которые поступают из изношенных шин, тормозных колодок, дисков и выхлопов автомобилей;

– химические реагенты, в частности, антигололедные, используемые зимой, содержат соли и химические соединения, которые накапливаются в почве и водоемах;

– частицы дорожного покрытия (износ асфальта, частицы резины, пыль и сажа от двигателей автомобилей), которые также составляют значительную часть смывов.

Шумовое загрязнение на автомагистралях возникает из-за интенсивного движения автотранспорта, что приводит к негативному воздействию на здоровье человека и окружающую среду. Это проявляется в виде повышения артериального давления, стресса, потери слуха, нарушения сна и других сердечно-сосудистых и нервных заболеваний у людей, а также негативно сказывается на животных и их поведении. Причинами и источниками являются:

– автотранспорт – постоянный гул автомобилей, который является результатом их деятельности;

– плотность движения – высокая загруженность автодорог приводит к повышенной шумовой нагрузке на прилегающие территории.

Фрагментация природных территорий – это процесс разделения больших, непрерывных участков природы на более мелкие, изолированные фрагменты под влиянием антропогенных факторов, в первую очередь строительства и эксплуатации автомобильных дорог. Автомобильные дороги выступают барьером, нарушающим естественные миграционные пути, генетическую связь популяций

и целостность экосистем, что приводит к сокращению биоразнообразия и ухудшению состояния окружающей среды.

Световое загрязнение на автодорогах представляет собой излишнее, неправильно направленное или чрезмерное освещение, ведущее к ряду проблем, включая ослепление водителей, нарушение биоритмов животных, потерю энергии и экономические убытки. К основным видам светового загрязнения относятся блики, световой беспорядок и чрезмерное освещение, которые негативно влияют на безопасность дорожного движения, экосистемы и здоровье человека. Источниками светового загрязнения на дорогах являются:

– неэффективные светильники – уличные фонари, свет которых направлен вверх или равномерно рассеивается, а не вниз;

– чрезмерное освещение – интенсивность освещения выше необходимой для безопасного движения;

– неправильное расположение источников света – свет, попадающий в ночное небо или на нежелательные объекты;

– архитектурная подсветка и реклама – светящиеся щиты, реклама и подсветка зданий, которые вносят большой вклад в общее световое загрязнение.

Для оценки воздействия дорожной инфраструктуры на компоненты окружающей среды могут быть использованы следующие методы:

1 Оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС), включающая комплексный анализ на стадии проектирования, моделирование загрязнений, прогноз последствий, общественные слушания.

2 Мониторинг окружающей среды на основе постоянного наблюдения за уровнем загрязнений и использования автоматизированных станций контроля.

3 Геоинформационные системы (ГИС), включающие пространственный анализ воздействия и визуализацию зон риска и планирование защитных мероприятий.

4 Моделирование транспортных потоков с учетом прогноза интенсивности движения и оценки потенциального загрязнения и шума.

Для снижения негативного воздействия автомобильных дорог на компоненты окружающей среды необходимо предусматривать следующие меры:

– экологически ориентированное проектирование (учет рельефа, водных объектов, экосистем, минимизация вырубки лесов и вмешательства в природные территории);

– использование шумозащитных экранов и озеленения;

– применение современных материалов и технологий (рисунок 1) и систем очистки ливневых стоков;

– организация переходов для животных (экомосты и тоннели, снижение фрагментации среды);

– развитие общественного транспорта и снижение автотрафика (снижение нагрузки на дороги, уменьшение выбросов и загрязнений).

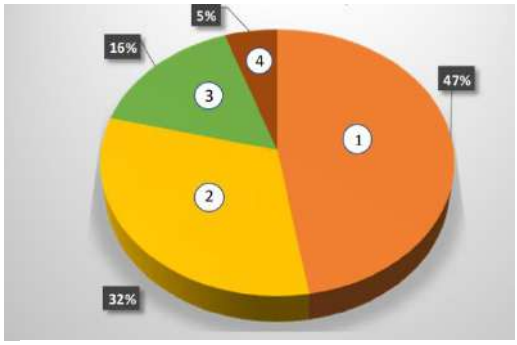



Рисунок 1 – Сравнение уровней загрязнения при разных типах дорожного покрытия: *1* – асфальтобетон (полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), алюмосиликаты); *2* – цементобетон (мелкодисперсная цементная пыль, щелочные соединения); *3* – щебеночное покрытие (пыль от механического разрушения щебня); *4* – экологичные покрытия (резиновая крошка, фотокаталитические материалы), основные загрязнители при износе минимальны

В ходе проведённого анализа выявлено, что строительство и эксплуатация автомобильных дорог оказывают комплексное влияние на природные и антропогенные компоненты среды, включая атмосферный воздух, водные ресурсы, почвенный покров, растительный и животный мир, а также социальную сферу. Грамотная оценка воздействия дорожной инфраструктуры на окружающую среду должна основываться на принципах комплексности, превентивности и устойчивости. Только при соблюдении экологических норм и внедрении инновационных решений возможно достижение баланса между развитием транспортной сети и сохранением природного потенциала территории.

**Список литературы**

1 О государственной экологической экспертизе, стратегической экологической оценке и оценке воздействия на окружающую среду : Закон Респ. Беларусь от 18 июля 2016 г. № 399-З ; дата вступления в силу : 22.01.2017 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. – URL : https://pravo.by/document/?guid=11031&p0=H11600399 (дата обращения : 12.09.2025).

2 **Леванчук, А. В.** Загрязнение окружающей среды продуктами эксплуатационного износа автомобильных дорог / А. В. Леванчук // Науковедение. – 2014. – № 1 (20). – С. 68.

УДК 625.7/.8:624.9

# АНАЛИЗ ОПЫТА ПРИМЕНЕНИЯ ГАБИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ДОРОГАХ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

*Г. В. АХРАМЕНКО, М. Ю. НИКИТЕНКО, А. А. АБРАМЕНКО*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В условиях нарастающего воздействия климатических факторов, увеличения интенсивности дорожного движения и необходимости сохранения природного баланса возрастает потребность в устойчивых, экологически безопасных и экономически оправданных решениях для укрепления русел, откосов и других элементов дорожной инфраструктуры. Габионные конструкции – один из таких инструментов, сочетающий инженерную надёжность с природной интеграцией. Их применение особенно актуально для Республики Беларусь, где значительная часть автомобильных дорог проходит вблизи водных объектов, на участках с нестабильными грунтами и в зонах с повышенным риском эрозии.

Габионные конструкции представляют собой объемные сетчатые модули, заполненные каменным материалом, которые используются для укрепления склонов, берегов, подпорных стен и дренажных систем (рисунок 1). В мировой практике они зарекомендовали себя как эффективное средство против эрозии, деформации и разрушения дорожных сооружений. В Беларуси габионы применяются преимущественно в проектах реконструкции и модернизации региональных дорог, особенно в зонах с повышенной влажностью и сложными геотехническими условиями. Однако, несмотря на положительные примеры, их использование сопровождается рядом технических, организационных и нормативных проблем, требующих системного анализа.

*а*) *б*) *в*)

Рисунок 1 – Габионные укрепления: *а* – коробчатые; *б* – цилиндрические; *в* – матрасные

Использование габионов имеет следующие преимущества:

– прочность и гибкость – габионы устойчивы к нагрузкам и деформациям, что делает их идеальными для укрепления русел, подверженных эрозии;

– дренажные свойства – конструкция габионов способствует отводу воды, что предотвращает скопление влаги и размывание грунта;

– экологичность – габионы безопасны для окружающей среды и хорошо вписываются в ландшафт;

– экономичность – не требуют дорогостоящих подготовительных работ и сложной техники для монтажа;

– долговечность – устойчивость к воде и атмосферным воздействиям обеспечивает длительный срок службы конструкций.

Примеры применения габионных конструкций на автомобильных дорогах Республики Беларусь представлены в таблице 1.

*Таблица 1* – **Примеры реализации объектов**

| Регион | Тип дороги | Участок / объект | Тип габионной конструкции | Год реализации |
|---|---|---|---|---|
| 1 Гомельская область | Республиканская | Р-31 (Жлобин – Калинковичи) | Коробчатые габионы (укрепление русла трубы Ø1000 мм) | 2020 |
| 2 Минская область | Местная | Дорога к аг. Озерцо | Матрасные габионы (укрепление откосов и дна) | 2021 |
| 3 Брестская область | Республиканская | М-10 (граница с Польшей – Кобрин) | Комбинированные габионы с геотекстилем | 2019 |
| 4 Витебская область | Местная | Дорога к лесхозу «Бешенковичи» | Цилиндрические габионы (в зоне выхода трубы) | 2022 |

Результаты обследования габионных конструкций на объектах, приведенных в таблице 1, представлены в таблице 2.

Эксплуатация габионных конструкций в дорожной и гидротехнической инфраструктуре выявила ряд проблем, которые можно классифицировать по техническим, организационным и экономическим признакам (таблица 3).

*Таблица 2* – **Результаты обследования**

| Объект | Состояние конструкции | Выявленные деформации | Необходимость ремонта | Комментарии |
|---|---|---|---|---|
| Р-31 (Гомельская обл.) | Удовлетворительное | Частичное проседание габионов на выходе трубы | Требуется локальная подсыпка и уплотнение | Причина – недостаточная подготовка основания |
| Озерцо (Минская обл.) | Хорошее | Незначительное смещение камней | Не требуется | Матрасная конструкция показала устойчивость |
| М-10 (Брестская обл.) | Удовлетворительное | Засорение фильтрующего слоя | Требуется очистка и замена геотекстиля | Ошибка в подборе материала геотекстиля |
| Бешенковичи (Витебская обл.) | Отличное | Не выявлено | Не требуется | Удачное сочетание цилиндрических габионов и дренажа |

*Таблица 3* – **Проблемы эксплуатации габионов: примеры, последствия и решения**

| Группа проблем | Типичная ситуация | Последствия | Возможные решения |
|---|---|---|---|
| Технические | Коррозия сетки в условиях высокой влажности | Потеря прочности, разрушение конструкции | Использование сетки с покрытием Zn-Al, регулярный осмотр |
| | Засорение габионов илом и растительностью | Снижение дренажной способности, накопление влаги | Установка фильтрующего слоя, очистка при обслуживании |
| | Отсутствие геотекстиля или его неправильный выбор | Вымывание грунта, образование пустот | Применение геотекстиля с заданной проницаемостью |
| Организационные | Проектирование без учёта гидрологических условий | Недостаточная устойчивость, деформация | Проведение инженерных изысканий, корректировка проекта |
| | Монтаж с нарушением технологии (слабое натяжение сетки) | Быстрое разрушение, снижение срока службы | Введение стандартов монтажа, обучение персонала |
| | Отсутствие входного контроля материалов | Использование некачественных компонентов | Сертификация поставщиков, контроль на этапе поставки |
| Экономические | Высокая стоимость оцинкованной сетки и геотекстиля | Удорожание проекта, снижение рентабельности | Поиск альтернативных материалов, закупка оптом |
| | Доставка в удалённые районы без развитой инфраструктуры | Логистические задержки, рост затрат | Планирование складов, использование модульных решений |

Несмотря на отдельные недостатки, габионы остаются эффективным инженерным решением, особенно в условиях сложного рельефа, нестабильных грунтов и повышенной водонасыщенности. Их устойчивость, экологичность и адаптивность к различным условиям делают их востребованными в современной дорожной инфраструктуре. Габионные системы представляют собой устойчивую альтернативу традиционным укрепительным сооружениям. Они способствуют снижению эрозии и укреплению откосов; улучшению дренажных характеристик; интеграции с природным ландшаф-

том; снижению углеродного следа за счёт использования местных материалов. Особенно важна их роль в контексте устойчивого развития и климатической адаптации транспортной инфраструктуры.

Для повышения эффективности применения габионов предлагается следующее: разработка междисциплинарных методик, объединяющих инженерные, экологические и поведенческие аспекты; исследование психофизиологических факторов, влияющих на восприятие водителями габионных конструкций в зоне дорожных работ; моделирование долговечности с учётом климатических изменений и нагрузок; оценка жизненного цикла габионных решений в сравнении с альтернативными технологиями.

**Список литературы**

1 СТО НОСТРОЙ 2.33.22-2011 Габионные противоэрозионные сооружения. Общие требования по проектированию и строительству. – Введ. 30.12.2011. – М. : Национальное объединений строителей, 2011. – 61 с.

2 **Иванов, А. И.** Технология применения габионов в современном строительстве : учеб. пособие / А. И. Иванов. – М.; Вологда : Инфа-Инженерия, 2023.– 196 с.

УДК 625.739:656.08

## ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕСЕЧЕНИЙ НА ПОВЕДЕНИЕ ВОДИТЕЛЕЙ И БЕЗОПАСНОСТЬ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

*Г. В. АХРАМЕНКО, М. Ю. НИКИТЕНКО, С. С. КОЖЕДУБ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Пересечения автомобильных дорог являются одними из наиболее сложных и потенциально опасных элементов транспортной инфраструктуры. По данным статистики, значительная доля дорожно-транспортных происшествий происходит именно на пересечениях, особенно в условиях высокой интенсивности движения и сложной геометрии. Традиционно оценка безопасности таких участков осуществляется на основе технических параметров – количества конфликтных точек, углов пересечения, ширины проезжей части и схем регулирования.

Однако в современных условиях недостаточно учитывать только инженерные характеристики. Поведение водителей, их психофизиологические реакции и способность к восприятию дорожной обстановки играют ключевую роль в обеспечении безопасности. Особенно это актуально на пересечениях с нестандартной геометрией, где повышается когнитивная нагрузка и возрастает риск ошибок при принятии решений.

Типы пересечений автомобильных дорог включают пересечения в одном уровне (простые, канализированные, кольцевые) и пересечения в разных уровнях, такие как развязки с путепроводами и тоннелями, которые разделяют транспортные потоки и улучшают безопасность дорожного движения. Выбор типа пересечения зависит от интенсивности движения, категорий дорог и необходимой степени управления транспортными потоками.

*Пересечения в одном уровне* делятся следующим образом:

– простые – применяются на дорогах низких категорий (IV, V, VI) и в случае низкой интенсивности движения на второстепенной дороге. Обладают высокой плотностью конфликтных точек (32 конфликтные точки). Часто требуют светофорного регулирования или применения кругового движения для снижения аварийности;

– канализированные – с направляющими островками и дополнительными полосами для разведения потоков, применяют при пересечении дорог III и II категорий с дорогой IV, когда интенсивность движения выше среднего;

– кольцевые – предназначены для организации непрерывного движения с минимизацией конфликтов. Снижают скорость движения, повышая безопасность. Эффективны при умеренной интенсивности движения, но могут быть перегружены при высоком трафике.

*Пересечения в разных уровнях* (многоуровневые развязки) применяются на магистралях и скоростных дорогах. Исключают пересечение потоков на одном уровне, устраняя зоны конфликтов.

Обеспечивают высокую пропускную способность и безопасность, но требуют значительных затрат на строительство.

Геометрические параметры пересечений включают ряд ключевых элементов, определяющих условия движения:

– угол пересечения – оптимальным считается угол, близкий к 90°, обеспечивающий хорошую видимость и простоту маневров. Острые углы (<60°) затрудняют обзор и увеличивают длину зоны конфликта, особенно при левом повороте;

– радиусы закруглений – влияют на плавность траектории при поворотах. Малые радиусы (<10 м) требуют снижения скорости, увеличивают риск выезда за пределы полосы. Радиусы >20 м обеспечивают комфортное движение, особенно для грузового транспорта;

– ширина полос движения – должна соответствовать категории дороги и типу транспортных средств. На пересечениях часто увеличивается для организации дополнительных полос поворота или накопления;

– островки безопасности и направляющие островки – служат для разделения потоков, защиты пешеходов и организации движения. Повышают «читаемость» пересечения и снижают вероятность ошибок водителей.

Геометрические элементы пересечений также напрямую влияют на поведение водителей, траектории движения и безопасность:

– траектория движения – четкая геометрия направляет водителя, снижая вероятность неправильного маневра. Плавные закругления и логичная организация полос способствуют предсказуемому поведению;

– скорость движения – узкие полосы, острые углы и малые радиусы закруглений требуют снижения скорости. На кольцевых и многоуровневых пересечениях скорость регулируется конструктивно;

– зоны конфликтов – на простых пересечениях их количество может достигать 32, включая зоны пересечения, слияния и разветвления. Круговые и многоуровневые пересечения минимизируют количество конфликтных точек. Геометрия должна способствовать их сокращению – например, за счет выделенных фаз светофора или направляющих островков.

Сравнение пересечений по ключевым геометрическим параметрам и их влияние на когнитивную нагрузку водителя представлено в таблице 1.

*Таблица 1* – **Влияние геометрии пересечений на когнитивную нагрузку водителя**

| Тип пересечения | Геометрические особенности | Уровень когнитивной нагрузки | Причины повышенной нагрузки | Возможные меры снижения нагрузки |
|---|---|---|---|---|
| Простое (в одном уровне) | Много конфликтных точек, пересечение потоков | Высокий | Сложность выбора траектории, высокая плотность движения | Светофорное регулирование, островки безопасности |
| Кольцевое | Радиус закругления, круговая траектория | Низкий – средний | Неоднозначность правил, непривычность для водителей | Знаки приоритета, визуальные ориентиры |
| Пересечение в разных уровнях | Эстакады, развязки, отсутствие прямых конфликтов | Низкий | Минимум решений, поток разделён | Четкая навигация, освещение |
| Многополосное регулируемое | Широкие проезжие части, сложные фазы светофора | Высокий | Перегрузка информацией, ожидание, смена фаз | Адаптивные светофоры, упрощение схем движения |
| Пересечение с левым поворотом | Угол поворота, необходимость оценки встречного потока | Очень высокий | Высокий риск ошибки, стресс при ожидании | Выделенные полосы, стрелки, зеркала видимости |

На рисунке 1 представлен уровень когнитивной нагрузки водителя в зависимости от типа пересечения (когнитивная нагрузка – это совокупность усилий, необходимых водителю для восприятия, анализа и принятия решений).

Рисунок 1 – Уровень когнитивной нагрузки водителя в зависимости от типа пересечения: *1* – низкий; *2* – средний; *3* – высокий; *4* – очень высокий

Таким образом, грамотный анализ геометрии пересечений позволяет оптимизировать их конструкцию с учетом безопасности, пропускной способности и комфорта. В современных условиях особое внимание уделяется адаптации геометрии к психофизиологическим особенностям водителей, обеспечению читаемости пересечений и снижению зон конфликтов. Интеграция инженерных решений с поведенческими аспектами – ключ к созданию эффективной транспортной инфраструктуры.

**Список литературы**

1 **Капский, Д. В.** Психофизиология участников дорожного движения (транспортная психология) : учеб.-метод. пособие / Д. В. Капский, П. А. Пегин, И. И. Лобач. – Минск : БНТУ, 2018. – 385 с.

2 **Булынко, О. В.** Восприятие дорожной ситуации как фактор безопасности движения / О. В. Булынко // Вестник университета гражданской защиты МЧС Беларусь. – 2019. – Т. 3, № 1. – С. 67–72.

УДК 656.2.08:37.012.3

## РОЛЬ НАСТАВНИЧЕСТВА В ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

*В. В. БОРОВИК, С. А. БИНДЮК*
*Белорусская железная дорога, г. Могилев*

*П. В. КОВТУН*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Железнодорожный транспорт – зона повышенной опасности. Любая ошибка, будь то монтера пути, бригадира или дорожного мастера, диспетчера, дежурного по станции, может привести к катастрофическим последствиям: человеческим жертвам, колоссальному экономическому ущербу, экологическим катастрофам. В современных условиях, характеризующихся ростом скоростей, интенсивностью движения и сложностью технологий перевозочного процесса, именно институт наставничества становится критически важным элементом в построении непрерывной системы безопасности, выступая мостом между теорией и практикой. Диплом из учебного заведения дает профессиональные знания, но не может передать главного – практического опыта, «чувства пути», умения действовать в нештатных и аварийных ситуациях.

Безопасность на железнодорожном транспорте – это не просто приоритет, а фундаментальный принцип, от которого зависят человеческие жизни, сохранность грузов и бесперебойность одной из ключевых артерий экономики. В условиях высоких технологий, сложнейших технических систем и колоссальной ответственности человеческий фактор остается как одним из главных источников рисков, так и главным инструментом их предотвращения. Именно здесь наставничество выполняет критически важную, системообразующую роль.

Наставничество помогает быстро и качественно адаптировать нового сотрудника на рабочем месте к условиям труда и передать практический опыт: не только «как делать», но и «как делать безопасно», «какие бывают скрытые риски». Оно формирует «культуру безопасности», т. е. особого мышления, при котором безопасность становится личным приоритетом каждого сотрудника, предупреждает исходя из собственного опыта наставника об ошибках на важных этапах профессионального становления молодого специалиста, сохраняет и приумножает знания и передовые практики производства путеремонтных работ.

Ключевые аспекты влияния наставничества на безопасность:

– передача «неписаных» правил и локальных нормативов. Наставник объясняет не только общепринятые инструкции, но и специфические особенности конкретного участка пути, дистанции пути, станции, обусловленные местными условиями, историей развития организации и сложившейся ситуацией в отношении происшедших случаев нарушения безопасности движения поездов или техники безопасности исполнителями;

– разбор реальных и нештатных ситуаций. Наставник на примерах из собственной практики или при разборе известных происшествий формирует у молодого специалиста навык принятия решений в условиях стресса и дефицита времени. Это учит предвидеть развитие событий и выбирать наименее рисковый сценарий;

– формирование правильных поведенческих паттернов (паттерны поведения – это повторяющиеся шаблоны мыслей, эмоций и действий, которые человек использует в различных ситуациях не задумываясь). Молодой специалист перенимает у наставника не только знания, но и отношение к работе: дисциплинированность, системность, бдительность, ответственность, привычку к взаимопроверкам;

– психологическая поддержка и снижение стресса. Работа на железной дороге, и особенно в путевом хозяйстве, связана с высоким нервным напряжением. Наставник, выступая как опытный коллега и психолог, помогает справиться со стрессом, страхом ошибки и грузом ответственности, что напрямую влияет на снижение количества ошибок, вызванных паникой или эмоциональным выгоранием;

– раннее выявление и купирование рисков. Внимательный наставник может заметить опасные привычки, пробелы в знаниях или недостаток психофизиологических качеств у молодого специалиста на самой ранней стадии и немедленно их скорректировать, не дожидаясь происшествия.

Наставничество как инструмент формирования культуры безопасности – в этом наиболее глубокая и долгосрочная миссия руководителя. Безопасность должна стать не набором правил, а внутренней ценностью каждого работника железнодорожного транспорта, невзирая на служебное положение и возраст!

Наставник – живой носитель корпоративной этики. Он передает новому поколению не просто навыки, а и отношение к безопасности. Он показывает на собственном примере, что строгое соблюдение инструкций – это не придирка начальства, а норма профессиональной чести и залог выживания. Наставник – как «мост» между поколениями, он помогает молодым специалистам с современным образованием адаптировать теорию к реальным условиям, а сам, в свою очередь, может перенять у молодежи современные способы коммуникации; новые, более эффективные подходы к работе с разного рода информацией.

Эффективное наставничество строится на доверии. Новичок не должен бояться задавать «глупые» вопросы или признаваться в ошибках, чтобы их немедленно разобрать и исправить. Это предотвращает сокрытие мелких инцидентов, которые, оставаясь неразобранными, могут перерасти в случаи нарушения безопасности движения.

Чтобы наставничество работало, оно не должно быть формальностью. Для этого необходимо следующее:

– профессиональная подготовка наставников. Хороший специалист не всегда является хорошим учителем. Наставников нужно целенаправленно учить методикам преподавания, психологии общения, педагогическому такту и современным средствам обучения;

– мотивация и признание. Труд наставника должен быть адекватно оценен – как материально (надбавки, премии, различные бонусы и т. д.), так и морально (статус, уважение, карьерные перспективы). Звание «Лучший наставник года» должно быть не менее престижным, чем «Лучший по профессии»;

– четкие регламенты и измеримые цели. У каждого этапа наставничества должны быть конкретные, измеримые цели и утвержденные программы стажировки, а сам процесс должен быть обеспечен необходимыми ресурсами и поддержкой со стороны руководства. Особенно это касается производственных процессов, связанных с повышенным риском нарушения безопасности движения поездов (путеремонтные работы, управление сложными грузоподъемными механизмами, например, кранами, и т. д.).

Таким образом, в XXI веке на фоне беспрецедентного технологического прогресса, именно человеческий капитал вновь выходит на первый план как ключевой гарант безопасности. Система наставничества – это не архаичный пережиток прошлого, а стратегический инвестиционный актив современной железнодорожной отрасли. Это тот самый «золотой ключ», который открывает дверь к безаварийной работе, превращая абстрактные регламенты в живую, полноценную практику со всеми вытекающими последствиями.

Если представить безопасность как грандиозное здание, то его фундаментом являются нормативные документы, стенами – высокотехнологичные машины и оборудование, а также системы управления. Крышей этого сооружения будут служить эффективные процессы. Но именно наставничество выполняет роль цементирующего раствора, который связывает все эти элементы в единое, прочное и надежное целое. Оно наполняет технологические системы человеческой мудростью, опережающей интуицией и личной ответственностью. В глобальном смысле эффективная система наставничества – это мощный иммунитет отрасли против профессиональной некомпетентности, текучести кадров и человеческого фактора как главного источника риска. Она обеспечивает преемственность поколений, создавая надежный конвейер по подготовке элиты железнодорожников, способных не только поддерживать, но и приумножать славные традиции безопасности.

Подводя итог, стоит подчеркнуть: инвестиции в наставничество являются инвестициями в будущее. Это прямая дорога к процветанию железнодорожного транспорта, который не только соответствует самым строгим международным стандартам надежности, но и задает их. Транспорта, где каждая поездка является залогом спокойствия, а безаварийный километр – результатом слаженной работы опытных мастеров своего дела и их достойной смены. Поэтому развитие и поддержка института наставничества – это не просто кадровая политика, а моральный и стратегический императив для всей отрасли, от которого зависит ее устойчивость, репутация и, в конечном счете, жизни людей.

УДК 625.76

## ПУТИ СНИЖЕНИЯ РИСКОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РАБОТ ПО ЛИКВИДАЦИИ ЯМОЧНОСТИ И ГЕРМЕТИЗАЦИИ ТРЕЩИН

*П. Д. ГАБЕЦ, В. В. ХАЧАТУРЯН, Д. Ю. АЛЕКСАНДРОВ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Дорожные работы, связанные с ликвидацией ямочности и герметизацией трещин, имеют несколько характерных отличий от других видов дорожных работ:

– малые объемы работ, рассредоточенные на фронте большой протяженности;

– высокий уровень ручного труда в общем объёме работ;

– интенсивное движение транспортных средств в непосредственной близости от зоны производства работ;

– наличие неблагоприятных погодных явлений (дождь, мокрый снег) в весенний, осенний и зимний (при необходимости) периоды производства работ;

– относительно короткий световой день в период интенсивной ликвидации ямочности.

Работы по ликвидации ямочности и герметизации трещин относятся к подвижным – движение транспортных средств ограничено в пределах перемещаемого участка дорожных работ [1]. В общем случае схема обустройства участков подвижных работ предполагает установку знаков «Ограничение максимальной скорости», «Дорожные работы», «Объезд препятствия справа/слева» и использо-

вание автомобиля прикрытия. С 1 марта 2020 г. применение демпфирующих устройств, установленных на автомобиль прикрытия (рисунок 1), обязательно при ограждении мест подвижных работ на автомобильных дорогах и улицах с повышенным скоростным режимом, магистральной улице непрерывного движения в г. Минске (МКАД) и автомобильных дорогах I категории. На дорогах более низких категорий использование демпфирующих устройств осуществляется при наличии такой возможности у дорожно-эксплуатационных управлений.

Рисунок 1 – Демпфирующие устройства

Риск производственного травматизма при ликвидации ямочности и герметизации трещин достаточно высок. Систематизированные и детализированные статистические данные о производственном травматизме в дорожной отрасли представляют собой ведомственную информацию, предназначенную для служебного пользования, и в свободном доступе отсутствуют. Однако периодически в средствах массовой информации публикуются материалы, посвященные дорожно-транспортным происшествиям с участием рабочих.

В качестве причин дорожно-транспортных происшествий с участием дорожных рабочих (в том числе и при наличии автомобиля прикрытия с демпфирующим устройтсвом) чаще всего указываются:

– невнимательность водителей автомобилей;

– нарушение скоростного режима.

Нередко подобные дорожно-транспортные происшествия приводят к тяжелым травмам и увечьям среди дорожных рабочих, исключая их из числа трудоспособных лиц. Экономические последствия объективно и всесторонне оценить достаточно трудно [2]. Они будут складываться не только из текущих затрат на преодоление последствий происшествия, но и из затрат, связанных с социальной поддержкой серьезно пострадавших в будущем.

Пути снижения рисков производственного травматизма при выполнении работ по ликвидации ямочности и герметизации трещин предполагают:

– сокращение времени, затрачиваемого на выполнение работ;

– увеличение уровня механизации работ;

– исключение дорожный рабочих из технологических процессов.

Технологический процесс ликвидации ямочности включает оконтуривание выбоины, устройство, очистку и подгрунтовку карты, заполнение карты ремонтной смесью и ее уплотнение. Наиболее продолжительными из них являются устройство карты и уплотнение ремонтного материала. Процесс нарезки карты уже сегодня возможен без участия дорожного рабочего – выполняется при помощи навесного фрезерного оборудования на трактор. Сокращение времени на заделку карты возможно за счет использования готовых изделий. Для ремонта асфальтобетонных покрытий такими изделиями выступают асфальтобетонные плиты [3], для цементобетонных – рулонные бетонные материалы [4]. Асфальтобетонные плиты до сих пор не нашли широкого применения, потому что они рассматривались обычно как материал для устройства нижних слоев покрытий в районах с коротким строительным сезоном. При ямочном ремонте они могут выступать в роли своеобразной пломбы, фиксирующейся на битумный или битумно-полимерный клей. Внедрение описанного технологического решения сдерживается затруднениями, связанными с формированием карты строго определенных размеров с незначительными отклонениями.

Ямочный ремонт цементобетонных покрытий затруднен необходимостью набора прочности ремонтного раствора на неорганическом вяжущем. В качестве пломбы для цементобетонного покрытия можно использовать геосинтетический цементно-композитный мат (продукция Concrete Canvas). Гибкий тонкий композиционный геоматериал, содержащий цементную смесь, при гидратации способен образовывать прочный слой бетона. Область применения гибкого бетона на сегодняшний день включает укрепление дна и стенок водотоков, защиту склонов, устройство обваловывания, восстановление бетонных конструкций и пр. Материал показывает хорошие эксплуатационные качества при работе во влажной среде, что актуально и для дорожных покрытий. Еще одним положительным аспектом гибкого бетона является возможность нарезки геомата на фигуры разного очертания и площади.

Наиболее эффективным путем снижения уровня травматизма, связанного с производством дорожных работ по содержанию, можно назвать полную автоматизацию. Разработка робота-комбайна силами исключительно дорожников невозможна и требует участия отрасли машиностроения, специалистов в области информационных технологий и пр.

**Список литературы**

1 ТКП 636-2019. Обустройство мест производства работ при строительстве, реконструкции, ремонте и содержании автомобильных дорог и улиц населенных пунктов = Падрыхтоўка месцаў правядзення работ пры будаўніцтве, рэканструкцыі, рамонце і ўтрыманні аўтамабільных дарог і вуліц населеных пунктаў. – Введ. 01.03.20. – Минск : М-во транспорта и коммуникаций РБ, 2019. – 108 с.

2 **Балбуцкий, И. Г.** Структура экономических последствий дорожно-транспортных происшествий / И. Г. Балбуцкий // Молодежь и научно-технический прогресс : сб. докладов XVI Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Губкин, 6 апр. 2023 г. В 2 т. – Губкин-Старый Оскол : Ассистент плюс, 2023. – С. 462–463. – EDN VCRGRX.

3 **Габец, П. Д.** Производство асфальтобетонных плит для роботизированной заделки выбоин / П. Д. Габец // Наука – транспортной инфраструктуре : материалы III Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, студентов и учащихся колледжей, Гомель, 21 марта 2025 г. – Гомель : БелГУТ, 2025. – С. 21–22. – EDN ZRISKC.

4 **Ямалиев, И. Я.** Использование технологии «бетонное полотно» для интенсификации работ при возведении бетонных конструкций / И. Я. Ямалиев // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2019. – № 3. – С. 54–69. – DOI: 10.25558/VOSTNII.2019.13.3.004. – EDN YPXFRF.

УДК 625.142.44

## ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРОЧНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ШПАЛ

*С. А. ГНЕЗДИЛОВ*
*АО «БетЭлТранс» (АО «БЭТ»), г. Москва, Российская Федерация*

Бетонные и железобетонные конструкции, эксплуатируемые в промышленных, гражданских и сельскохозяйственных сооружениях, могут быть подвержены влиянию агрессивной среды. Прочность и долговечность конструкций зависит от стойкости как бетона, так и арматуры. Степень воздействия определяется наличием и концентрацией агрессивных агентов, температурой и влажностью [1].

Железобетонные шпалы и брусья работают в сложных условиях, связанных как со сменой сезона (осадки в виде снега и дождя), так и периодическим замораживанием, оттаиванием в межсезонье. При этом за календарный год переход среднесуточной температуры воздуха через 0 °С с одновременным увлажнением подрельсового основания может происходить более 50 раз.

Попадание химически активного груза на путь может происходить как в месте погрузки-разгрузки, сортировки, так и при транспортировке, при этом разные материалы по-разному влияют на железобетонное подрельсовое основание.

АО «БЭТ» совместно с ООО «Институт ВНИИжелезобетон» провело исследование влияния агрессивных сред на прочностные свойства бетона, используемого при производстве железобетонного подрельсового основания (шпал и брусьев стрелочных переводов) [2].

Первой основной экспериментальной агрессивной средой выбран 5%-й водный раствор хлорида калия. Хлористый калий КС1 является концентрированным калийным удобрением, самым распространенным на территории РФ, а также может быть приобретен в чистом техническом состоянии по ГОСТу.

Водный раствор хлорида калия использовали исходя из предположения, что просыпанное удобрение под действием таяния снега, дождя, а также естественной влажности воздуха и балласта покрывало железобетонное основание, вызывая в нем необратимые химические процессы. Концентрация среды (водный раствор, 5%-й по массе) была назначена согласно методу испытания бетона на морозостойкость [3].

Для сравнения с хлористым калием на первом этапе эксперимента были включены вода и 5%-й водный раствор хлорида натрия (поваренная соль) (стандартные первый, второй и третий (ускоренный) методы по [3], [4]).

Образцы разных размеров и форм испытывали одновременно. Их изготовили из материала, используемого при серийном производстве шпал и брусьев для стрелочных переводов, по технологическим режимам виброуплотнения и тепловлажностной обработки, применяемым на филиалах АО «БЭТ». Внешний вид образцов контролировали после каждого цикла. В зависимости от интенсивности разрушения образцы с испытаний снимали и проводили их замораживание-оттаивание по первому методу, если разрушение образцов наступало слишком быстро, по третьему – если слишком поздно.

Отдельные серии образцов прошли до 27 циклов испытаний по второму методу. Нарушение прочности либо отсутствовало, либо было незначительным.

Значимое разрушение не наблюдалось несмотря на жесткость условий замораживания-оттаивания образцов.

Действующим веществом выбрали минеральные удобрения и мазут (нефть и нефтепродукты). Общий набор агрессивных сред дополнительно к хлориду натрия (ЧДА согласно [5]) к следующему этапу стал следующим: хлорид калия ЧДА [6], сульфат аммония, двойной суперфосфат, мазут.

Испытания проводились в рамках апробирования методики, разработанной согласно [4] в части изготовления образцов и определения прочностных характеристик, [3] в части режима проведения испытаний, назначения количества циклов замораживания-оттаивания, трактовки результатов.

Изменение прочности на растяжение при изгибе в основных образцах относительно контрольных, хранившихся в камере нормального твердения и в воде, следующее:

– раствор NaCl – снижение прочности на 36 %;
– раствор КО – снижение прочности на 29 %;
– кашица КС1 – снижение прочности на 60 %;
– кашица сульфата аммония – снижение прочности на 16 %;
– кашица двойного суперфосфата – снижение прочности на 15 %;
– мазут при +50 °С – снижение прочности на 13 %;
– мазут от –50 до +50 °С – снижение прочности на 8 %.

Насыщение образцов проходило перед циклами замораживания-оттаивания при полном погружении в агрессивную среду на 48 ч, замораживание – при –50(±2) °С, оттаивание – при +20(±2) °С.

Основные образцы-призмы в ходе испытания должны находиться в горизонтальном положении, перед началом попеременного замораживания-оттаивания их насыщают агрессивной средой.

Выводы.

1 Агрессивная среда на основе хлорида натрия и хлорида калия оказывает большее воздействие на бетон, чем другие исследованные в рамках настоящей работы. Причина этого может быть в том, что суперфосфат и сульфат аммония реагируют с цементом, образуют нерастворимые соединения кальция, и таким образом происходит поверхностное разрушение бетона. Глубина такого разрушения недостаточна для существенного влияния на прочность образцов на растяжение при изгибе.

2 Мазут оказывает большее негативное воздействие на бетон при длительном хранении образцов в данной среде при +50 °С, чем при замораживании-оттаивании от –50 до +50 °С в той же среде. Это, возможно, обусловлено тем, что образцы не насыщаются водой и не происходит промотирования процессов разрушения за счет замерзания жидкости в порах бетона.

3 К агрессивным средам можно отнести кашицу КС1, испытания в которой показали существенно большее разрушение бетона образцов, чем в стандартной среде 5%-го раствора хлорида натрия в воде.

4 При столь значительном снижении прочности бетонного камня на растяжение при изгибе до 3,1 МПа (при минимальном значении в 5,5 МПа) произойдет в целом и снижение прочности шпалы или бруса стрелочного перевода, что не допустимо и требует наличия специальной защиты (нанесение специальных покрытий/пропиток на поверхность бетона, либо включение в состав бетона специальных ингибирующих добавок).

5 Условия эксплуатации во взаимодействии с агрессивными к бетону средами высокой концентрации не относятся к типовым и, как следствие, к железобетонному подрельсовому основанию должны выдвигаться дополнительные требования по защите от коррозии и химического воздействия. В противном случае, незащищенная конструкция значительно сокращает свой срок службы (ресурс), который может оказаться даже ниже гарантийного.

**Список литературы**

1 **Баженов, Ю. М.** Технология бетона : учеб. пособие / Ю. М. Баженов. – 2-е изд., перераб. – М. : Высш. шк., 1987. – 415 с.

2 Отчет по результатам выполненного исследования и по разработке методики ускоренной оценки агрессивного воздействия вешества на бетон / ООО «Институт ВНИИжелезобетон». – М., 2022.

3 ГОСТ 10060-2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости. – Введ. 01.01.2014 ; изм. 16.12.2021. – М. : Стандартинформ, 2018. – 19 с.

4 ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – Введ. 01.07.2013 ; изм. 01.06.2018. – М. : Стандартинформ, 2018. – 36 с.

5 ГОСТ 4233-77. Реактивы. Натрий хлористый. Технические условия. – Введ. 01.01.1978 ; изм. 01.07.2008. – М. : Стандартнформ, 2008. – 19 с.

6 ГОСТ 4568-95. Калий хлористый. Технические условия. – Введ. 01.07.1997 ; изм. 01.10.2001. – М. : Изд-во стандартов, 2001. – 16 с.

УДК 656.2.053

## ВЛИЯНИЕ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЙ ОБ ОГРАНИЧЕНИИ СКОРОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА

*Е. Н. ГРИНЬ*
*Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва*

Выполнение задач, стоящих перед железнодорожным транспортом по росту объемов перевозок и скоростей движения, требует новых подходов к оценке роли инфраструктуры в организации перевозочного процесса.

Основными факторами, определяющими роль инфраструктуры в современных условиях эксплуатации, являются: постоянное увеличение доли вагонов с осевой нагрузкой 25 тс, рост количества тяжеловесных поездов, рост грузонапряженности на основных направлениях сети и сокращение объемов ремонтных работ.

В настоящее время около 30 % магистральных линий обеспечивает выполнение свыше 80 % всех перевозок. Следствием этого является рост количества поездов и, как результат, сокращение межпоездных интервалов. Численной характеристикой этого фактора может служить показатель плотности поездопотока (среднее количество поездов), однако, к сожалению, в официальной статистике этот показатель не используется.

Результатом совокупности действия этих факторов является рост количества отказов технических средств инфраструктуры. Основными причинами отказов на сети в 2024 году явились неудовлетворительное содержание рельсовой колеи – 42 %, остродефектные (ОДР) и дефектные рельсы (ДР) – 20 %, отказы рельсовых цепей – 13 %.

Отказ технических средств железнодорожного пути вызывает задержку не только проходящего состава, но и задерживает часть последующих за ним. Вследствие чего возникают незапланирован-

ные потери от невыполнения эксплуатационной работы и потери от увеличения объемов работ на устранение отказов.

Для проведения работ по техническому обслуживанию пути на перегонах и станциях с целью обеспечения безопасности движения поездов, а также с целью обеспечения безопасности работников выдаются предупреждения об ограничении скорости.

На дорогах сети действует ежегодно более тысячи предупреждений об ограничении скорости движения, выдаваемых по различным причинам, что оказывает существенное влияние на пропускную способность железных дорог. Динамика изменения количества предупреждений с 2017 по 2024 год по сети представлена на рисунке 1.

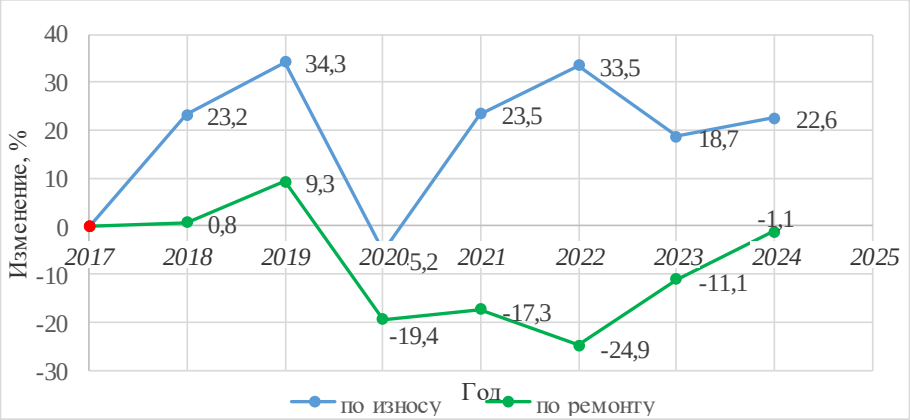



Рисунок 1 – Изменение количества предупреждений по износу и ремонту пути по отношению к 2017 году

Данные, приведенные на рисунке 1, говорят о том, что с 2017 по 2019 год количество предупреждений об ограничении скорости возрастало, причем в 2020 году общее количество предупреждений резко сократилось. Следует отметить, что после незначительного роста в 2021 году количество предупреждений до 2024 года оставалось практически на одном уровне, а в 2024 году наблюдается рост количества предупреждений как по износу и дефектности элементов пути и сооружений, так и по ремонту и содержанию пути, искусственных сооружений.

Доля предупреждений об ограничении скорости движения поездов, выдаваемых по износу и дефектности элементов пути и сооружений, составляет порядка 51,4 %; по ремонту, содержанию пути и сооружений, строительным работам, в ходе которых происходит ослабление пути или возникает опасность движения поездов, составляет 46,6 %.

Рост числа предупреждений ограничений скорости движения поездов по путейским причинам приводит к потерям в перевозочной работе железнодорожного транспорта. Так, за период 2024 года по путейским причинам допущено 29 127,4 ч потерь поездо-часов, что на 13 % ниже к уровню 2023 года (2023 год – 33 462,1 ч).

Необходимо выяснить, какие факторы вызывают рост количества предупреждений и связанных с ними потерь в перевозочной работе.

Одной из причин роста количества предупреждений и связанных с ними потерь в перевозочной работе является увеличение протяженности железнодорожного пути с рельсами и стрелочными переводами, пропустившими сверхнормативный тоннаж в условиях устойчивого роста грузонапряженности. Если в 2003 году протяженность пути со сверхнормативной наработкой тоннажа составила порядка 14,0 тыс. км, то к 2024 году она достигла 23, 1 тыс. км. Фактически выполняемые объемы капитального ремонта пути в 2024 году уменьшились в 3,5 раза по сравнению с 2003 годом.

Эксплуатация пути, пропустившего сверхнормативный тоннаж приводит к резкому увеличению числа и продолжительности предупреждений по износу и дефектности элементов верхнего строения пути.

Как показал анализ статистических данных, наибольшее влияние на эксплуатационную работу имеют: ограничения скорости поездов, выдаваемые по причине дефектности рельсов, – 65,4 %; стрелочных переводов, в том числе крестовин, – 13,5 %; шпал – 8,8 %, скреплений – 5,3 % и дефектности земляного полотна – 4,7 %.

Физическая суть проблемы состоит в накоплении повреждений, ведущих к снижению длительной усталостной прочности элементов верхнего строения пути.

Одним из важных факторов, повлиявших на увеличение количества предупреждений в 2024 году, явилось повышение загрузки вагонов до 80 т.

Каждое из выдаваемых предупреждений об ограничении скорости движения поездов характеризуют три основные параметра: длина участка пути, на котором действует предупреждение, продолжительность предупреждения и величина снижения скорости по сравнению с установленной.

Анализ действующих предупреждений по ограничению скорости движения поездов с 2017 по 2024 год, показал, что наибольшее количество предупреждений по времени действия составляют предупреждения, действующие более 10 суток (порядка 32 % в среднем по сети) и действующие от 1–3 суток (порядка 23 % от общего количества предупреждений).

При этом на некоторых железных дорогах доля действующих предупреждений более 10 суток составляет порядка 50 % от всех предупреждений, действовавших на дороге в 2024 году.

Основными причинами предупреждений, действующих более 10 суток, являются: обкатка пути после выполнения ремонтно-путевых и строительных работ, дефектность земляного полотна и искусственных сооружений, а также дефектность элементов верхнего строения пути и загрязненность балласта.

Следует отметить, что в 2024 году, по сравнению с 2022 годом, доля предупреждений после выполнения ремонтно-путевых и строительных работ по сети дорог возросла на 32 %, что в большинстве случаев является следствием не увеличения объема ремонта пути, а следствием ухудшения организации и качества выполнения работ.

Доля временных предупреждений по ограничению скорости движения, действующих 1–3 суток, в 2024 году по сравнению с 2022 годом увеличилась на 7,5 %. Основными причинами данного вида действующих предупреждений являются: дефектность рельсов, шпал, скреплений и металлических частей стрелочных переводов.

Анализ распределения предупреждений по установленным скоростям, по путейским причинам на сети дорог показал, что наибольшую долю составляет ограничение скорости 60 км/ч. Процент предупреждений, ограничивающих скорость 60 км/ч, с 2017 года по 2024 год в среднем по сети составляет 51,8 %.

Часть предупреждений, ограничивающих движение со скоростью 60 км/ч, с 2021 года по 2024 год на большинстве дорог сети увеличилась в среднем на 43 %. Анализ причин ограничения скорости 60 км/ч показал, что значительная часть данных ограничений скорости была выдана: по обкатке пути после выполнения ремонтных работ, по состоянию балластного слоя, дефектности рельсов и металлических частей стрелочных переводов, а также по содержанию рельсовой колеи.

При оценке влияния предупреждения, выданного по причине обкатки пути, на перевозочный процесс основными являются анализ скорости движения поезда по участку и анализ дополнительных затрат, вызванных предупреждениями для различных групп и классов пути в зависимости от грузонапряженности и скорости [1].

Например, если техническая скорость на перегоне в соответствии с тяговыми расчетами и нормативным графиком движения поездов составляет $v_{тех}$ = 43,5 км/ч, а установленное ограничение на этом перегоне $v_{огр}$ = 60 км/ч, то корректировка скорости по ограничению не требуется.

Продолжительность действия ограничений скорости 60 км/ч в среднем составляет: 14 суток по неудовлетворительному состоянию балластного слоя; 28 суток по дефектности рельсов.

Процент предупреждений, ограничивающих скорость 40 км/ч, также имеет тенденцию к увеличению на ряде дорог сети в 2024 году и составляет порядка 110 % по сравнению с 2021 годом. Наибольшее количество предупреждений со скоростью 40 км/ч действовало на дорогах, имеющих значительное протяжение участков с просроченным капитальным ремонтом и высокими осевыми нагрузками на отдельных направлениях дороги.

Основными причинами ограничения скорости 40 км/ч являются ограничения, выдаваемые по причине выполнения работ по текущему содержанию пути: замена дефектных элементов верхнего строения пути, работы по содержанию рельсовой колеи, работы по содержанию стыковых зазоров и устранению ступенек в стыках, работы по шлифовке и наплавке рельсов и металлических частей стрелочных переводов, а также по причине работы путевых машин. Значительная часть этих работ

выполняется «под поездами», а не в специальные технологические «окна», что сильно влияет на скорости движения поездов.

Протяженность одного предупреждения с 2017 по 2019 год увеличилась на 21,5 %. С 2020 года наметилась тенденция уменьшения протяженности одного предупреждения по сети и держится примерно на одном уровне.

Наибольшую длину имеют предупреждения, ограничивающие скорость движения 15 км/ч и 25 км/ч, затем идут предупреждения со скоростью 60 км/ч. В среднем по сети наименьшую длину (0,68 км) имеют предупреждения, ограничивающие скорость движения более 60 км/ч.

На основе анализа данных, приведенных выше, можно сделать следующие выводы:

– наибольше количество предупреждений по времени действия приходится на предупреждения, действующие более 10 суток. Количество их увеличилось за рассматриваемый период на 58 %;

– большую часть составляют предупреждения с ограничением скорости 60 и 40 км/ч, доля которых составляет в среднем по сети 51,8 и 13,8 %, соответственно;

– количество предупреждений со скоростью 15 и 25 км/ч за рассматриваемый период держится приблизительно на одном уровне по сети;

– протяженность одного предупреждения для каждой скорости остается практически постоянной.

Это относится и к распределению предупреждений по скоростям по дорогам. Однако следует отметить, что для каждой дороги характерны свои особенности.

Необходимо обратить внимание на тенденцию увеличения в 2024 году числа и протяженности ограничений скорости по сравнению с 2020 годом – на 30,8 и 15,7 % соответственно. При этом имеются дороги с резким ростом числа ограничений скорости, влияющим на общее количество ограничений скорости по сети.

При оценке влияния предупреждений об ограничении скоростей движения на показатели перевозочного процесса в современных условиях эксплуатации необходимо учитывать соотношение скоростей пропуска поездов на участке действия предупреждения с технической скоростью движения.

Анализ отчетных данных показывает, что во многих случаях скорости по предупреждениям превышают техническую скорость, особенно на участках с высокой плотностью поездопотока.

Этот факт необходимо учитывать при классификации предупреждений ограничений скорости по влиянию их на перевозочный процесс для уточнения очередности их устранения.

**Список литературы**

1 **Певзнер В. О.** Классификация путей в зависимости от потерь, возникающих при выдаче предупреждений / В. О. Певзнер, Т. И. Громова // Железнодорожный транспорт в современных условиях : сб. науч. тр. / под ред. В. М. Богданова, Г. В. Гогричиани. – М. : Интекст, 2000. – 183 с.

УДК 625.11

## ПОВЫШЕНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

*Н. В. ДОВГЕЛЮК, Е. М. МАСЛОВСКАЯ, Л. П. КОНОНОВИЧ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

На некоторых эксплуатируемых линиях технически возможна организация скоростного пассажирского движения путем модернизации и реконструкции постоянных устройств дороги.

Такой подход подтверждается тем, что для модернизации постоянных устройств требуются гораздо меньшие капитальные вложения, чем для строительства специализированной высокоскоростной магистрали. Целесообразность строительства такой магистрали оправдывается, как показал зарубежный опыт, в том случае, если высокоскоростная магистраль сооружается для массовых пассажирских перевозок с высокими скоростями движения, которые не могут быть реализованы на эксплуатируемых линиях со смешанным движением поездов [1, 2].

Первенцем высокоскоростного пассажирского движения в странах СНГ является железнодорожная магистраль Москва – Санкт-Петербург, на которой обращаются электропоезда ЭР 200 со

скоростями 200 км/ч. Условиями, аналогичными этой линии, обладают еще два направления: Москва – Горький и Брест – Москва. На магистрали Минск – Брест скорость на отдельных участках достигает 160 км/ч. На остальных магистральных направлениях повышение скоростей движения значительно затруднено, так как достаточно сложные условия плана и профиля, высокая загруженность грузовыми перевозками [3].

Для организации скоростного движения решающее значение имеет план линии. На железной дороге Москва – Санкт-Петербург сравнительно легкие топографические условия. Поэтому радиусы кривых запроектированы 3000–3500 м. На магистрали Брест – Москва наибольший радиус 2000 м. Такие кривые не требовали устройства переходных кривых. Однако большинство кривых имеют радиусы 600–1000 м.

В соответствии с этим важнейшим вопросом для эксплуатируемых линий является определение характера реконструкции постоянных устройств без больших капитальных вложений и в относительно короткие сроки. Модернизации и реконструкции подлежат следующие постоянные устройства: план и профиль; верхнее строение пути; устройства сигнализации и связи; устройства энергоснабжения; пересечения железной дороги с другими путями сообщения; стрелочные переводы, пассажирские платформы; искусственные сооружения, земляное полотно; системы сервисного обслуживания пассажиров.

Одним из основных параметров железнодорожной линии, существенно влияющим на безопасность движения поездов, является возвышение наружного рельса. Вопросам определения возвышения наружного рельса уделено большое внимание в трудах профессора Шахунянца Г. М. Возвышение наружного рельса зависит от вида поездов, типов вагонов и локомотивов, среднесуточного количества поездов каждой категории, веса и скорости движения поездов. При этом учитывается влияние силы тяги и сопротивления движению, сила ветра и необходимость одинакового износа рельсовых нитей.

Таким образом, проблема повышения скоростей движения поездов в нашей стране требует подхода, учитывающего вышеперечисленные особенности.

С целью информационного обеспечения устанавливается зависимость износа рельсов от радиусов кривых. Строится график зависимости износа от радиуса кривой, напоминающий гиперболу, которая выражается уравнением

$$U = a_0 + \frac{a_1}{R}.$$

Параметры уравнения гиперболы $a_0$ и $a_1$ находятся из системы нормальных уравнений

$$na_0 + a_1 \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R} = \sum_{i=1}^{n} U,$$

$$a_0 \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R} + a_1 \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R^2} = \sum_{i=1}^{n} \frac{U}{R}.$$

Вычисление искомых промежуточных величин производится с помощью таблицы 1.

Составив по данным таблицы систему уравнений и решив ее, получим

$$10a_0 + 0{,}0248a_1 = 69{,}1;$$
$$0{,}0248a_0 + 0{,}0000775a_1 = 0{,}243;$$
$$a_0 = -4{,}194;\ a_1 = 4475.$$

Окончательно уравнение зависимости износа от радиусов кривых будет иметь вид

$$U = \frac{4475}{R} - 4{,}19.$$

Задаваясь различными значениями $R$ и подставляя их в формулу, получим ряд значений дополнительного износа рельсов в кривых. Расчеты сведены в таблицу 1.

*Таблица 1* – **Дополнительный износ рельсов в кривых**

| Радиус кривой, м | Износ, мм²/млн тонн брутто | Теоретический радиус, м | Теоретический износ, мм²/млн тонн брутто | Невязка, Δ |
|---|---|---|---|---|
| 200 | 18,50 | 200 | 18,19 | 0,31 |
| 250 | 13,15 | 250 | 13,71 | –0,56 |
| 300 | 10,75 | 300 | 10,73 | 0,02 |
| 350 | 9,00 | 350 | 8,60 | 0,40 |
| 400 | 7,30 | 400 | 7,00 | 0,30 |
| 500 | 4,65 | 500 | 4,76 | –0,11 |
| 600 | 3,10 | 600 | 3,27 | –0,17 |
| 700 | 1,60 | 700 | 2,20 | –0,60 |
| 800 | 0,75 | 800 | 1,40 | –0,65 |
| 1000 | 0,30 | 1000 | 0,29 | 0,01 |
| | | | | ∑Δ = –1,05 |

Выполненное исследование показало, что зависимость износа рельсов от радиусов кривых носит гиперболический характер. Коэффициенты гиперболы $a_0$ = 4,19; $a_1$ = 4475.

Особое значение имеет проблема нормирования соотношения скоростей движения пассажирских и грузовых поездов. Впервые остро встала она в конце 80-х гг. XX в., когда на повестке дня стояла интенсификация перевозочного процесса. Повышение скоростей движения пассажирских поездов с жестко нормированным (а часто установленным субъективно) временем хода потребовало увеличения скоростей движения по всем перегонам и соответствующего переустройства кривых с увеличением возвышения наружного рельса. Ввод на этом этапе в обращение тяжеловесных поездов, имеющих в своем составе вагоны с осевой нагрузкой до 26 т, привел к ограничению скоростей движения грузовых поездов и, естественно, потребовал уменьшения возвышения наружного рельса в кривых. В результате таких действий произошло нарушение равновесия в системе «путь – подвижной состав» и повышение износа как верхнего строения пути, так и подвижного состава.

**Список литературы**

1 Государственная программа «Транспортный комплекс», подпрограмма «Железнодорожный транспорт» на 2021–2025 годы : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 23.03.2021 г. № 165 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. – URL : https://pravo.by/document/?guid=11031&p0=C22100165 (дата обращения : 24.09.2025).

2 Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 года : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 11 дек. 2013 г. № 1066 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. – URL : https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=C21301066 (дата обращения : 24.09.2025).

3 **Турбин, И. В**. Изыскания и проектирование железных дорог : учеб. для вузов / И. В. Турбин. – М. : Транспорт, 1989. – 479 с.

УДК 625.11

## ВОЗМОЖНОСТЬ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ УЧАСТКА «ЖЛОБИН – МОГИЛЕВ» БЕЛОРУССКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

*Н. В. ДОВГЕЛЮК, И. С. ТРУШКО, П. Н. БАРАБОЛКИН*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

По Белорусской железной дороге в 2024 году перевезено более 100 млн тонн грузов. Погрузка составила почти 75 млн тонн с ростом на 2,7 %, в том числе во внутриреспубликанском сообщении – на 6,8 %. Был поставлен рекорд по контейнерным перевозкам – свыше 1,6 млн ДФЭ. Контейнерные поезда в сообщении с Китаем курсируют по нашей магистрали с 2009 года.

В 2025 году БЖД наращивает объемы перевозки грузов для Китая. За 2021 год в КНР из нашей страны был отправлен 151 контейнерный поезд, в 2024 году – уже более 1,5 тысячи. Более 90 % объема международных перевозок БЖД приходится на ЕАЭС и Китай.

В связи со сложившейся обстановкой на границе с ЕС основные потоки экспортных грузов (нефтепродукты, удобрения, черные металлы, лесные грузы и др.) уже переориентированы на

маршруты с задействованием транспортно-логистической инфраструктуры дружественных стран на Востоке и Юго-Востоке.

14 марта в Москве под председательством российской стороны состоялось первое Совещание руководителей железных дорог государств-членов Евразийского экономического союза. В нем приняли участие главы магистралей России, Казахстана, Кыргызстана, Армении и Беларуси. Стороны подвели итоги работы в 2024 году, определили перспективы дальнейшего взаимодействия железных дорог государств – членов ЕАЭС, обсудили совместные логистические проекты, в том числе развитие перевозок по международным транспортным коридорам и применение цифровых технологий, а также подписали ряд документов, которые регламентируют проведение подобных встреч в новом формате, а также план работы на 2025–2026 годы.

Начальник государственного объединения «Белорусская железная дорога» Валерий Веренич в своем выступлении отметил, что заметен потенциал роста объемов перевозок грузов с каждой железной дорогой государств – членов ЕАЭС, а также по международным коридорам «Север – Юг», «Восток – Запад» и в рамках инициативы «Один пояс, один путь».

Перевозки из Беларуси развиваются в направлении портов северо-запада России. Важное значение приобретает коридор «Север – Юг», по которому белорусские грузы следуют в Иран, Индию и Пакистан. Это направление перспективно для белорусского бизнеса.

Благодаря сотрудничеству с такими странами, как Россия, Китай, Казахстан, Иран, Азербайджан, Кыргызстан, Туркменистан, Узбекистан, увеличен объем перевозок белорусских экспортных грузов.

С учетом изменения вектора важнейших грузопотоков на перспективу до 2040 года было предложено для рассмотрения несколько вариантов расширения географии движения поездов на электротяге. Наиболее перспективный – строительство соответствующей инфраструктуры по направлению Жлобин – Могилев – Орша – Витебск с дальнейшим выходом на северо-запад России.

Исследована возможность электрификации участка Жлобин – Могилев Белорусской железной дороги. Участок обслуживается Могилевской дистанцией пути. Участок входит в состав IX международного транспортного коридора, проходящего по территории Республики Беларусь. По данному участку перевозится, в числе прочих грузов, щебень из карьера Микашевичи, а также Петриковского и Нежинского месторождений.

Согласно плану электрификации Белорусской железной дороги на 2030 год, планируется электрифицировать все грузонапряженные участки дороги. В первую очередь проект электрификации предусматривает реконструкцию продольного профиля и плана для исключения элементов, отклонившихся от СТН в течение эксплуатации.

Тяговые расчеты выполнены для локомотивов 2ТЭ10М, ВЛ80к и БКГ-1, где было установлено, что разница во времени при прохождении участка электровозами и тепловозом не значительна, но электрическая тяга, в отличие от тепловой, более экономична. Удельный расход топлива в условном исчислении при тепловой тяге в грузовом движении составляет примерно 43 кг на 10 тыс. тонно-километров брутто, при электрической тяге электроэнергия, приведенная к топливу, составляет 34,5 кг, это на 8,5 кг меньше. На форуме по использованию мирного атома в Москве Президент Республики Беларусь объявил, что планируется строительство второй БелАЭС на востоке страны, после чего использование электропоездов станет еще выгоднее. Электроэнергия будет обеспечивать кроме нашей страны, приграничные районы Российской Федерации, Луганскую и Донецкую народные республики.

Строительные работы при сооружении контактной сети на станциях и перегонах выполняет СУ № 2 ОАО «Дорстроймонтажтрест». Строительное управление базируется на станции Светлогорск, от которой будут производиться монтажные работы.

На рассматриваемом участке Жлобин – Могилев (ПК510-ПК1015) частично выполняется установка опорных конструкций контактной сети методом «с поля», производится комплектом машин и механизмов на гусеничном и автомобильном ходу строительно-монтажного поезда № 354 на участках с высотой насыпей не более 3,0 м и глубиной выемок – 2,5 м и, если имеется возможность для подъезда машин к месту установки опор.

При исключении возможности работы «с поля», опорные конструкций контактной сети монтируются комплектом машин и механизмов на рельсовом ходу строительно-монтажного поезда № 367, работающих в «окно» с занятием существующего пути, т. е. методом «с пути».

Все анкерные участки контактной подвески на перегонах – компенсированные с рессорными струнами, а на станциях – полукомпенсированные. Их монтаж осуществляет электромонтажный поезд г. Жлобина. Все строительно-монтажные работы выполняются во время установленного «окна» или в одну рабочую смену.

Анализируя план участка железнодорожного пути, а также наличие грунтовых дорог, мостов и железобетонных труб, выявляют участки, на которых в первую очередь возможна установка опор контактной сети методом «с поля» или «с пути».

При устройстве опорных конструкций контактной сети в объем строительных работ включают разработку котлованов на полную глубину (II категория грунта), установку фундаментов и опор с последующей регулировкой и засыпкой котлованов, вибропогружение или установку в котлованы анкеров, монтаж оттяжек, погрузку и транспортирование строительных конструкций с линейной комплектовочной базы.

Количество промежуточных, анкерных опор и опорных устройств определяется на каждом отдельном участке в зависимости от максимально принятой величины пролета между опорами. В состав монтажных работ включается монтаж несущего, контактного проводов развернутой длиной 76,69 км. На перегонах анкеровка выполняется компенсированная с помощью 58 сдвоенных компенсаторов со штангами и грузами, а на станциях – полукомпенсированная с помощью 66 компенсаторов. На участке Жлобин – Могилев выполняется 128 индивидуальных заземлений опор. На выполнение монтажных работ требуется 404 рабочих дня.

По результатам разработки суммарного графика производства работ определено, что на участке Жлобин – Могилев (с 35 по 86 км) устанавливаются 1038 опор контактной сети, где из них 385 шт. методом «с поля» и 651 шт. методом «с пути». Также устанавливаются 59 одиночных оттяжек для средней анкеровки и 119 двойных для главной анкеровки; 138 жестких поперечин на станциях. На выполнение строительных работ с учетом косвенных операций требуется 149 рабочих дней.

**Список литературы**

1 Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 года : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 11 дек. 2013 г. № 1066 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. – URL : https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=C21301066 (дата обращения : 24.09.2025).

УДК 625.731.8.033.3+625.731.8.042(043.3)

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

*Е. М. ЖУКОВСКИЙ*
*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

С развитием теории надежности её элементы также начинают использовать при проектировании дорожных одежд в результате включения данных положений в ВСН 46-83 [1]. Согласно данному документу (пункт 3.9) под надежностью понимают вероятность безотказной работы конструкции в течение всего периода между капитальными ремонтами. Количественным показателем надежности, согласно пункту 3.9 Инструкции [1], служит уровень надежности, представляющий собой отношение протяженности прочных, не требующих капитального ремонта конструкций, к общей протяженности участка с данным значением запаса прочности.

Надежность в технике, согласно пункту 1.1 [2], представляет собой свойство объекта сохранять во времени значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств.

Для автомобильных дорог (исключая искусственные сооружения на них) основными свойствами надежности являются безотказность и долговечность. Поскольку на дорогах ремонтные меро-

приятия осуществляются перманентно, а проведение ремонтов в целом не вызывает существенных нарушений условий движения, то свойство ремонтопригодности для дорог не является критическим, в отличие от мостов и других искусственных сооружений на дорогах.

Так, под надежностью автомобильной дороги профессор Р. И. Моисеенко понимает способность удовлетворять всем условиям прочности дорожной одежды в любой момент эксплуатации при случайных величинах нагрузок, сопротивлений материалов и геометрических размеров [3, с. 5].

В Республике Беларусь вместо понятия «надежность автомобильной дороги», которое согласно статье 1 [4] представляет собой комплексное сооружение, используют понятие «надежность дорожных одежд», под которым понимают способность дорожной конструкции в целом сохранять заданные эксплуатационные характеристики (ровность, прочность, шероховатость) в течение расчетного срока службы [5, с. 15].

Дорожные одежды в Республике Беларусь, как и в других странах СНГ, проектируют с учетом критериев надежности, в соответствии с пунктом 6.1.7 [6]. При этом в соответствии с [6] основным критерием надежности является коэффициент надежности Р.

Коэффициент надежности, согласно пункту 3.10 [6], представляет собой разность значений общей площади участка и процента дефектности в конце срока службы дорожной одежды.

В Республике Беларусь согласно [6], основные характеристики надежности дорожных одежд – коэффициент надежности и срок службы, которые по своей сути являются параметрами безотказности (коэффициент надежности представляет собой вероятность безотказной работы) и долговечности (срок службы). Однако в процессе разработки нормативной документации утрачен первоначальный смысл данных показателей, неправильное использование которых приводит к преждевременному отказу дорожных покрытий. Причем и в новой редакции ТКП «Автомобильные дороги. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования» [7], проект которого ожидает утверждения, не была произведена гармонизация используемой терминологии с общепринятыми положениями теории надежности.

В конечном итоге такое положение приводит к снижению долговечности нежестких дорожных одежд уже на стадии их проектирования. Так, согласно [6], для некоторых категорий дорог с капитальным и облегченным покрытием так называемый требуемый коэффициент упругого прогиба принимается равным или менее 1,0. Это означает, что упругий прогиб дорожной одежды должен быть равным или даже менее, чем требуемый для данных условий.

Впервые эмпирическая зависимость, связывающая величину надежности автомобильных дорог с фактическим коэффициентом прочности, была установлена профессором Н. Н. Ивановым [8, с. 180]. Исследования, проведенные в Донском государственном техническом университете [9], показали, что в целом сохраняется вид зависимости, полученной под руководством профессора Н. Н. Иванова [8, с.180], но при этом значения надежности для аналогичных коэффициентов прочности значительно ниже.

Индекс безотказной работы β в зависимости от коэффициента прочности $K_{пр}$ для случая равенства коэффициентов вариации общего и требуемого модулей упругости можно найти, согласно [10], по формуле

$$\beta = \frac{K_{пр} - 1}{C_E \sqrt{K_{пр}^{\ 2} + 1}}.$$

Вероятность безотказной работы $P(t)$ можно найти через функцию Лапласса, при известном индексе надежности β:

$$P(t) = 0{,}5 + \Phi(\beta).$$

Таким образом видно, что при значении коэффициента прочности 1,0 и менее индекс безотказной работы будет принимать значения 0 и менее, а в таком случае вероятность безотказной работы (коэффициент надежности в терминологии действующего и предлагаемого ТКП) будет принимать значения менее 0,5, что существенно отличается от установленных данными документами требуемых значений коэффициентов надежности.

Следовательно, в настоящее время необходимо либо кардинальным образом выполнить пересмотр представленных в ТКП 45-3.03-112-2008 (02250) «Автомобильные дороги. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования» значений коэффициентов надежности и требуемых коэффициентов запаса прочности, либо использовать при расчете нежестких дорожных одежд современные, более сложные методы, например, совместный термо-гидромеханический подход, который подразумевает взаимное влияние температурного, гидравлического и механического (напряженно-деформированного) полей на прочность и деформативность дорожной конструкции.

**Список литературы**


1 ВСН 46-83. Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа. – М. : Минтрансстрой СССР, 1985. – 157 с.

2 ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. – Введ. 01.03.2017. – М. : Стандартинформ, 2016. – 24 с.

3 **Моисеенко, Р. П.** Лекции по теории надежности автомобильных дорог : учеб. пособие / Р. П. Моисеенко. – 2-е изд., испр. и доп. − Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2022. – 154 с.

4 Об автомобильных дорогах и дорожной деятельности : Закон Республики Беларусь от 2 декабря 1994 г. № 3434-XII : ред. от 05.01.2022 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь, 19.03.2001, 2/463. – URL : https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=V19403434 (дата обращения : 23.08.2025).

5 **Веренько, В. А.** Надежность дорожных одежд : учеб. пособие / В. А. Веренько. – Минск : БГПА, 2002. – 120 с.

6 ТКП 45-3.03-112-2008 (02250). Автомобильные дороги. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования. – Введ. 19.11.2008. – Минск : БелдорНИИ, 2008. – 114 с.

7 Проект ТКП Автомобильные дороги. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования. – URL : https://www.mintrans.gov.by/images/2025/05-05-25-6.pdf (дата обращения: 14.09.2025).

8 Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд / под ред. Н. Н. Иванова. – М. : Транспорт, 1973. – 328 с.

9 Оценка надежности дорожной одежды на стадии эксплуатации / А. Н. Тиратурян, А. А. Симакова, И. В. Бодров, М. В. Фарниева // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 4 (47). – С. 196. – URL : https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-nadezhnosti-dorozhnoy-odezhdy-na-stadii-ekspluatatsii/viewer (дата обращения : 27.08.2024).

10 **Жуковский, Е. М.** Обеспечение надежности автомобильных дорог с нежесткими дорожными одеждами на стадии проектирования / Е. М. Жуковский // Автомобильные дороги и мосты. – 2024. – № 2. – С. 15–24.


УДК 624.9

## УСТРОЙСТВО ПАССИВНОЙ ЗАЩИТЫ ПУТЕЙ ПОДВОЗА И ЭВАКУАЦИИ ОТ ОГНЕВЫХ УДАРОВ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ


*В. В. ЗИКРАТЬЕВ*

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

*В. Ю. ПИСКУН*

*Внутренние войска Министерства внутренних дел Республики Беларусь, г. Минск*


Габариты искусственной системы пассивной защиты (ИСПЗ) (рисунок 1) зависят от габаритов вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ), перемещающихся по путям подвоза и эвакуации (ППиЭ), а также самих ППиЭ.

Для дальнейших расчетов габариты ИСПЗ будут приняты в соответствии с рисунком 2. Следует отметить, что конструктивные решения варианта ИСПЗ, представленного в данной работе, обеспечивают пассивную защиту автомобильных дорог, относимых в соответствии с таблицей 1 СН 3.03.04-2019 «Автомобильные дороги» к VI классу дорог низшей категории и ко II–V классам обычных дорог, в то время как организация пассивной защиты дорог I класса требует дополнительной проработки и не является предметом рассмотрения данной работы.

Технологически ИСПЗ состоит из секций, таких как типовая, торцевая и проездная.

Рассмотрим подробнее технологические решения каждой из секций ИСПЗ.

Типовая секция (рисунок 3) является основной составляющей ИСПЗ и используется на прямолинейных (в том числе и поворотах) участках ППиЭ. Торцевая секция используется в концевых участках ППиЭ, ее основным отличием от типовой секции является наличие противоосколочного элемента (шторы, завесы) в осях 1/А-Е на въезде (выезде) из нее.

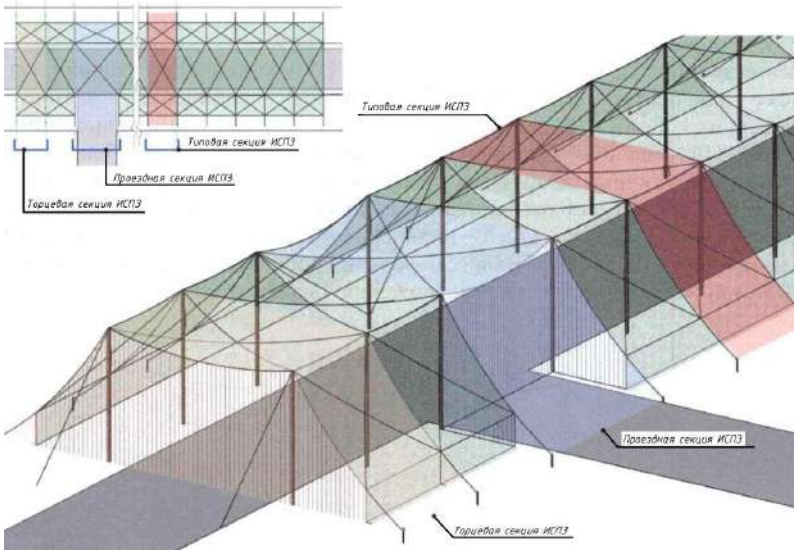



Рисунок 1 – Общий вид ИСПЗ

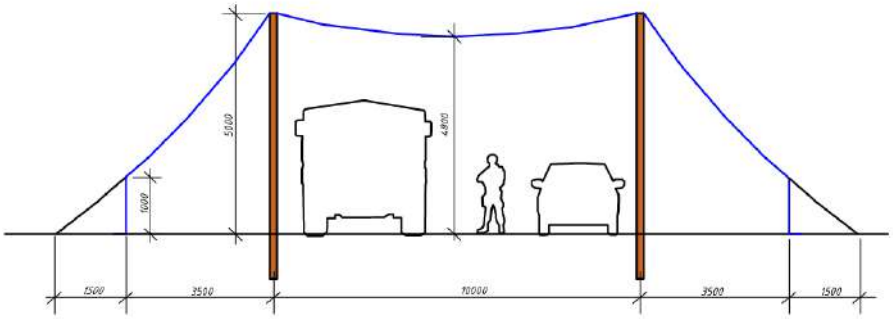



Рисунок 2 – Типовой разрез ИСПЗ

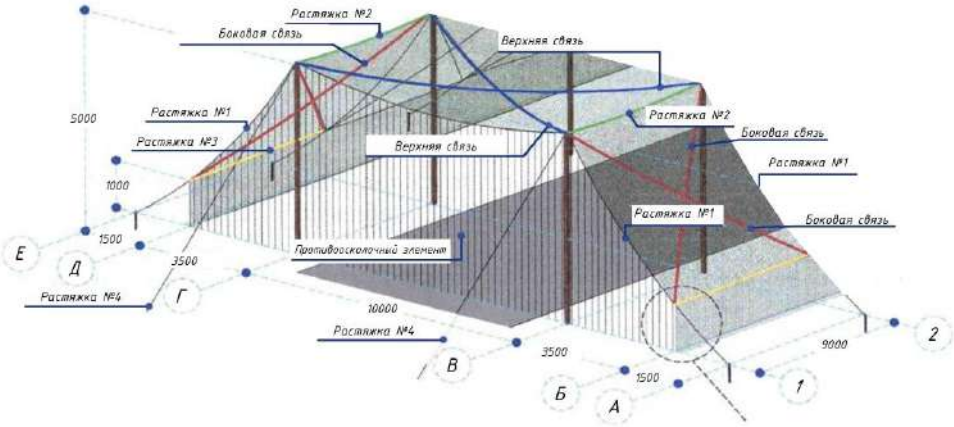



Рисунок 3 – Общий вид типовой, торцевой и проездной секций ИСПЗ

Проездная секция используется для устройства перекрестков различной конфигурации. При этом при наличии перекрестков с круговым движением целесообразно использовать типовую секцию. Отличием проездной секции от типовой является наличие противоосколочного элемента (шторы, завесы) в осях В/1-2 или Г/1-2 (в месте устройства перекрестка), а также более широкий шаг стоек каркаса в тех же осях (при необходимости).

Основу каркаса ИСПЗ составляют стойки из лесоматериалов и пиломатериалов, растяжки и связи из стальной проволоки, а также необходимые метизы. Основу защитных элементов, как уже было сказано выше, составляют полимерные сетки и ткани из композитных материалов

Рассмотрим подробнее конструктивные решения ИСПЗ.

Стойки каркаса монтируются с продольным типовым шагом до 9 000 мм в скважины глубиной до 1 000 мм, пробуренные с использованием ручного мотобура. Диаметр скважин должен ориентировочно соответствовать характеристикам стоек каркаса.

Стойки каркаса целесообразно изготавливать из древесины хвойных пород, при этом эмпирическим путем установлено, что для обеспечения несущей способности достаточным условием является применение четверти бревна диаметром от 200 до 240 мм. Требования к размерам лесоматериалов принимаются в соответствии с СТБ 2187-2011 «Лесоматериалы круглые. Классификация по размерам», требования к сорту лесоматериалов отсутствуют, требования к качеству лесоматериалов принимают в соответствии с СТБ 2316-2-2013 «Лесоматериалы круглые хвойных пород. Сортировка по качеству. Часть 2. Сосна» в объеме, достаточном для обеспечения несущей способности ИСПЗ. Применение в качестве стоек древесины хвойных пород обусловлено её дешевизной и повсеместным распространением на территории Республики Беларусь.

Для соединения растяжек, связей и стоек в единый каркас при одновременном обеспечении несущей способности ИСПЗ и его ремонтопригодности достаточно использования шпилек резьбовых М10 по DIN 975 с классом прочности 4,8 и рым-гаек М10 по DIN 582 (рисунок 4). Применение в качестве метизов шпилек и рым-гаек позволяет проводить мероприятия по устройству каркаса без специализированного оборудования и обеспечивает возможность донатяжения растяжек и связей.

Для придания каркасу достаточной прочности и жесткости, а также в целях последующего монтажа защитных покрытий применяются растяжки и связи (см. рисунок 4). Растяжки и связи целесообразно устраивать из стальной термически необработанной оцинкованной проволоки диаметром до 3 мм со значением временного сопротивления к разрыву около 120 кгс/мм$^2$. Требования к характеристикам проволоки принимают в соответствии с ГОСТ 3282-74 «Проволока стальная низкоуглеродистая общего назначения. Технические условия». Крепление растяжек и связей осуществляется путем создания узлов (скруток) либо путем использования брусков и гвоздей. Применение в качестве растяжек именно проволоки позволит обеспечить необходимую устойчивость к механическим повреждениям, обусловленных поражающими факторами взрыва (осколочное воздействие, фугасное и кумулятивное действие).

Защитное покрытие целесообразно устраивать из полимерных шпалерных сеток с размерами ячейки от 100×100 мм до 150×150 мм (рисунок 5) и нахлестом полотен до 200 мм. Возможно также применение полимерных сеток из лесок, при этом необходимо использовать леску с толщиной нити не менее 0,5 мм, а в случае, если невозможно обеспечить поставку материалов с такими характеристиками, необходимо устраивать защитные покрытия в несколько слоев. Требования к полимерным сеткам в связи с отсутствием в Республике Беларусь соответствующего стандарта целесообразно принять в соответствии с ГОСТ Р 55732-2013 «Оборудование горно-шахтное. Крепь горных выработок. Сетка полимерная для ограждения горных выработок. Технические условия».

Соединение полотен сеток между собой осуществляется вязальной проволокой, скотчем либо хомутами-стяжками с шагом не более 700 мм, также для ускорения процесса возможно использование нейлоновых фиксаторов и садового степлера.

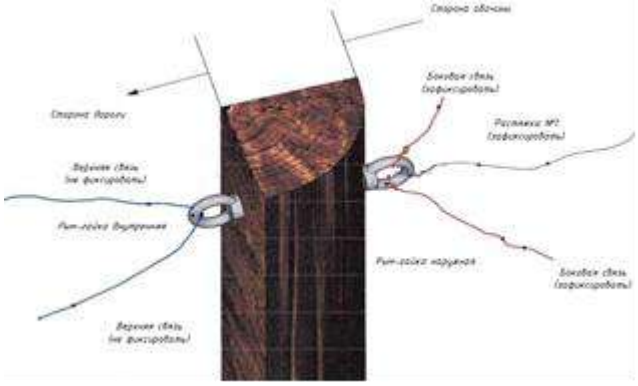


Рисунок 4 – Схема крепления метизов и протяжки связей через них

Рисунок 5 – Полимерная шпалерная сетка

Противоосколочные элементы (шторы, завесы) целесообразно устраивать из плетеных полипропиленовых шнуров неярких цветов диаметром от 5 до 8 мм с сердечником (рисунок 6). Требования к характеристикам шнуров принимают в соответствии с ГОСТ 30454-97 «Шнуры плетеные. Общие технические условия». Шаг крепления шнуров целесообразно принять до 200–300 мм, а края резов – обжечь.

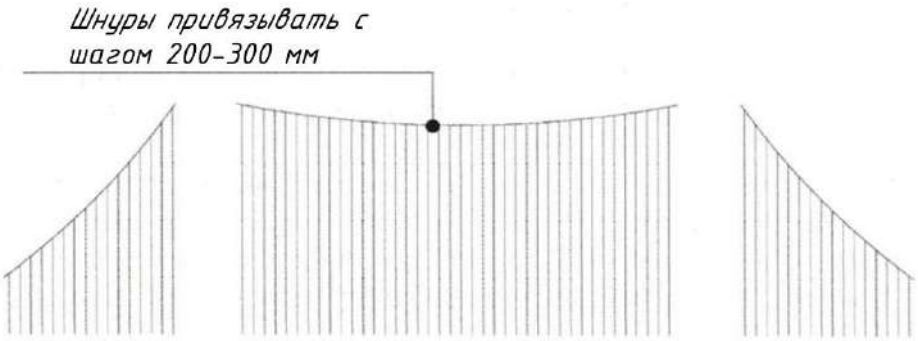



Рисунок 6 – Схема устройства противоосколочного элемента (шторы, завесы)

Применение стальных сеток и стальных изделий в качестве защитных и противоосколочных элементов при устройстве ИСПЗ ППиЭ нецелесообразно по причине их высокой стоимости, повышения эксплуатационных нагрузок на каркас ИСПЗ, а также в связи с возможностью образования вторичных поражающих элементов.

Учитывая простоту конструктивных решений ИСПЗ, монтаж может быть осуществлен силами военнослужащих, в том числе срочной службы. Рассмотрим подробнее возможные организационные решения по монтажу ИСПЗ.

Работы по монтажу ИСПЗ целесообразно осуществлять подразделением до 20 человек, разделенных на 6 расчетов.

Расчет № 1 (группа руководства) отвечает за планирование, организацию и руководство работами, охрану и оборону, а также связь с вышестоящим командованием.

Расчет № 2 (группа подготовки и доставки, до 4 человек) отвечает за наличие, предварительную подготовку и доставку необходимых изделий для монтажа ИСПЗ.

Расчет № 3 (группа монтажа стоек, до 4 человек) отвечает за бурение скважин и установку стоек каркаса ИСПЗ.

Расчет № 4 (группа монтажа растяжек и связей, до 4 человек) отвечает за монтаж растяжек, связей и их закрепление на стойках каркаса.

Расчет № 5 (группа монтажа защитных покрытий, до 4 человек) отвечает за монтаж защитных покрытий, их крепление к стойкам и растяжкам.

Расчет № 6 (группа охраны, до 4 человек) отвечает за безопасность проведения работ. В состав данной группы целесообразно включать военнослужащих, оснащенных средствами радиоэлектронной борьбы (РЭБ) и приборами наблюдения.

Работы целесообразно проводить в 10 этапов.

*Этап № 1.* Рекогносцировка, оценка ориентировочных объемов работ, подготовка материалов.

Рекогносцировка и оценка ориентировочных объемов работ может быть проведена по карте, с использованием геоинформационных систем, а также при выезде на местность путем реальных промеров. При этом особое внимание необходимо обратить на протяженность ППиЭ, близость леса к ППиЭ, высоту насыпи и выемки, тип обочины, наличие перекрестков, кюветов, мостов и гидротехнических сооружений, пересечение ППиЭ инженерными коммуникациями, возможность использования мощностей местной промышленной и экономической базы.

*Этап № 2*. Провешивание трассы.

На выбранном участке ППиЭ расчетами № 1 и № 3 проводится провешивание трассы под стойки, которое осуществляется путем забивки кольев с установленным шагом до 9 000 мм, при этом целесообразно использовать шаблон.

*Этап № 3*. Бурение скважин под стойки каркаса.

После провешивания участка трассы расчетом № 3 осуществляется бурение скважин необходимой глубины и диаметра. Рекомендуется бурение минимум 16 скважин в целях создания необходимого фронта работ для расчета № 4.

*Этап № 4.* Подготовка стоек каркаса к монтажу.

После завершения работ по бурению расчетами № 3 и № 4 проводится подготовка стоек каркаса к монтажу, которая включает в себя:

– размещение стоек на обочине вдоль ППиЭ двумя блоками по 4 стойки на каждой обочине;

– протяжку растяжек через рым-гайки на стойках каркаса.

*Этап № 5.* Монтаж стоек каркаса.

После подготовки блока стоек расчетами № 3 и № 4 проводится их монтаж в проектное положение и уплотнение грунта в скважине, при монтаже обеспечивается протяжка растяжки № 2 через рым-гайки, а также установка одной стойки следующего блока.

*Этап № 6.* Монтаж растяжек № 2.

После монтажа стоек расчетом № 4 проводится окончательная протяжка и натяжение растяжки № 2 через все опоры секции (рисунок 7), при этом окончательная фиксация растяжки № 2 на стойке следующей секции не производится для обеспечения возможности настройки всего блока стоек (при необходимости).

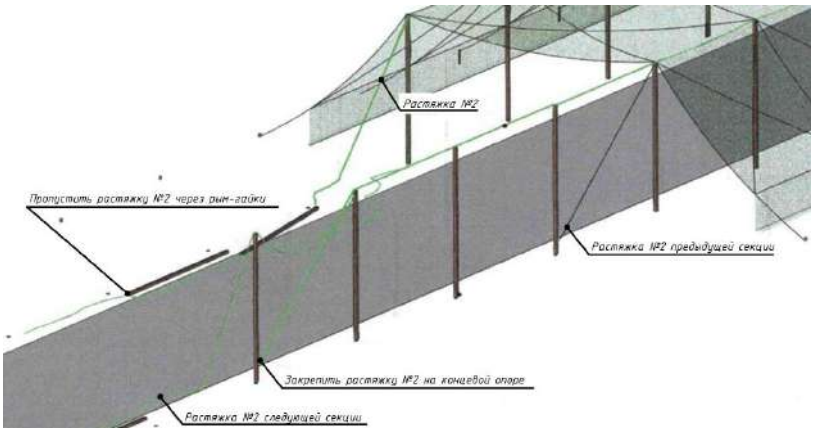



Рисунок 7 – Схема монтажа растяжек № 2

*Этап № 7.* Монтаж растяжек № 1.

После монтажа растяжек № 2 расчетом № 4 проводится протяжка и крепление растяжки № 1, при этом на растяжке № 1 целесообразно сделать загибы для удобства последующего монтажа растяжки № 3. Растяжка № 1 крепится к земле с помощью заостренных кольев.

*Этап № 8*. Монтаж растяжек № 3.

После монтажа растяжек № 1 расчетом № 4 проводится протяжка и закрепление растяжки № 3 к растяжкам № 1 (рисунок 8), обеспечивая тем самым точки для крепления в последующем защитных покрытий.

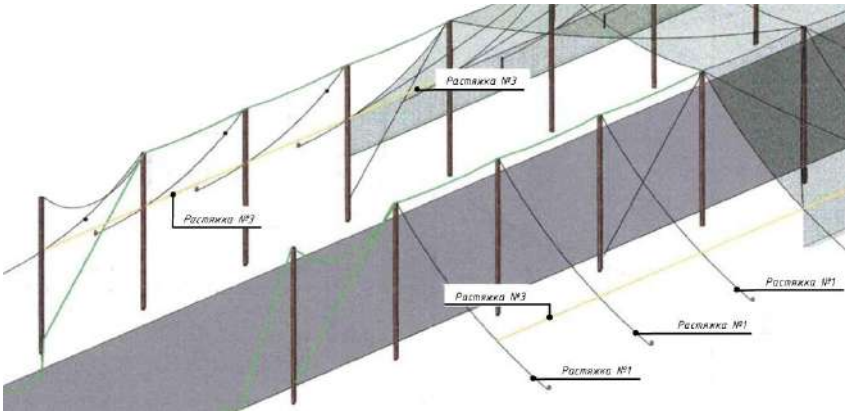



Рисунок 8 – Схема монтажа растяжек № 3

*Этап № 9.* Монтаж связей.

После монтажа растяжек расчетом № 4 проводится протяжка и закрепление верхних и боковых связей к стойкам (рисунок 9), обеспечивая тем самым несущую способность каркаса от эксплуатационных нагрузок и точки для крепления в последующем защитных покрытий.

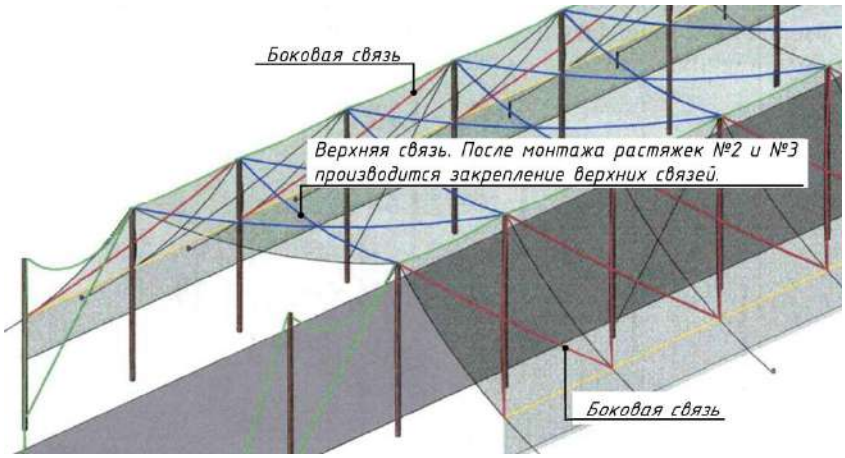



Рисунок 9 – Схема монтажа связей

*Этап № 10.* Монтаж защитных покрытий.

После монтажа связей и растяжек расчетом № 5 проводится разматывание полотен полимерных сеток и их закрепление к растяжкам и связям, при этом разматывание полотен целесообразно осуществлять снизу вверх.

Следует отметить, что в целях технико-экономического обоснования предлагаемых конструктивных и организационных решений по устройству ИСПЗ авторами была проведена работа по разработке сметной документации с целью определения ориентировочной потребности в финансовых и трудовых ресурсах, строительных материалах, машинах и механизмах на 100 м защищаемого прямолинейного участка ППиЭ. Расчет производился в соответствии с требованиями постановления Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь от 19.04.2023 № 39 «О порядке определения сметной стоимости строительства, пусконаладочных работ и составления сметной документации на основании нормативов расхода ресурсов в натуральном выражении» [2] исходя из следующих исходных данных и допущений:

– расчет цены осуществлен в ценах на 1 июня 2025 года для Гомельской области в зоне № 2 (сельское строительство);

– стоимость отдельных материалов взята исходя из данных ГИС «Госстройпортал», часть – из анализа розничных цен в сети Интернет;

– выбор видов работ осуществлен путем подбора работ, ближайших по составу работ, с использованием теоретических коэффициентов к нормам затрат труда рабочих и механизмов;

– в цену работ и их трудоемкость и не входят стоимость и трудозатраты:

- по распиловке круглых лесоматериалов, однако их доставка к месту производства работ учтена в виде средств на доставку грузов 4 класса на дальность до 20 км;

- сборке и монтажу противоосколочных элементов (шторы, завесы);

- разборке покрытия дорог (их обочин) перед устройством скважин;

– в цену работ не входит приобретение используемого при монтаже оборудования;

– ко всем выполняемым работам, независимо от их вида и принадлежности разным сборникам, применены единые нормы общехозяйственных и общепроизводственных расходов, а также плановой прибыли (для дорожного строительства);

– затраты, связанные с применением прогнозных индексов цен в строительстве, не учитывались;

– в цене учтены затраты на использование временных (титульных) зданий для проживания рабочих;

– в цену работ входят все обязательные налоги и отчисления.

Принимая во внимание вышеизложенные сведения, общая цена устройства 100 м ИСПЗ составила 5 803,00 белорусских рубля, а общие ориентировочные трудозатраты – 72,32 чел·ч. Вместе с тем, в случае выполнения работ силами военнослужащих в расчет стоимости допустимо включение только стоимости материальных ресурсов в размере 2 639,00 рублей без НДС и без учета средств на транспортные расходы.

Также дополнительно представлен расчет материалов и изделий для устройства типовой секции, а также перечень оборудования, необходимого для его монтажа (таблицы 1, 2).

*Таблица 1* – **Перечень оборудования, необходимого для монтажа ИСПЗ, для одного подразделения**

| Оборудование | Количество, ед. |
|---|---|
| 1 Мотобур, шнек диаметром от 200 до 240 мм | 1 |
| 2 Стремянка до 5,5 м | 1 |
| 3 Степлер садовый | 2 |
| 4 Плоскогубцы и пассатижи | 2 |
| 5 Большая саперная лопата | 2 |
| 6 Топор плотничный | 2 |
| 7 Молоток | 2 |
| 8 Киркомотыга | 2 |

*Таблица 2* – **Расчет материалов и изделий, необходимых для монтажа типовой секции ИСПЗ**

| Материалы и изделия | Количество | Единица измерения |
|---|---|---|
| 1 Лесоматериалы круглые хвойных пород, длина 6 000 мм, диаметр до 240 мм (четверть) | 0,27 (4) | $м^3$ (ед.) |
| 2 Бруски обрезные хвойных пород, 50 × 50 × 1000 мм (для крепления растяжек) | 2 | ед. |
| 3 Гвозди строительные, до100 мм | 0,4 | кг |
| 4 Шпилька резьбовая оцинкованная М10 DIN975, 1000 мм | 0,5 | ед. |
| 5 Рым-гайка оцинкованная М10 DIN582 | 8 | ед. |
| 6 Проволока стальная низкоуглеродистая термически необработанная оцинкованная, диаметр до 3 мм | 71 | м.п. |
| 7 Полимерная шпалерная сетка с ячейкой до 150 × 150 мм | 259 | $м^2$ |
| 8 Хомут-стяжка нейлоновый | 50 | ед. |
| 9 Плетеный полипропиленовый шнур неярких цветов диаметром от 5 до 8 мм с сердечником (для торцевой или проездной секции) | 390 | м.п. |

Следует, однако, отметить, экологические риски использования ИСПЗ. Согласно информации, опубликованной в открытых источниках СМИ Российской Федерации и Украины, массированное использование ИСПЗ в период гнездования и развития птиц может приводить к их запутыванию и гибели в защитных покрытиях, в связи с чем для снижения экологических последствий при проведении мероприятий боевой подготовки рекомендуется ограничить применение ИСПЗ в зонах, относящихся к особо охраняемым природным территориям в соответствии с законодательством Республики Беларусь.

Как показывает история и накопленный опыт, залогом успеха на поле боя является качественное и своевременное материально-техническое обеспечение боевых действий, которое на сегодняшний день невозможно без обеспечения защиты ППиЭ, а также ВВСТ и транспортных средств подвоза от огневого воздействия с использованием БПЛА.

Совокупность решений, предложенных авторами, позволяет запланировать и осуществить полный комплекс инженерных мероприятий по пассивной защите ППиЭ, а внедрение их в практику учебно-боевой деятельности войск позволит существенно уменьшить потери личного состава и ВВСТ при сохранении темпа ведения боевых действий.

**Список литературы**

1 СП 542.1325800.2024. Свод правил. Защитные ограждающие конструкции от беспилотных летательных аппаратов. Правила проектирования : утв. и введен в действие приказом Минстроя России от 25.12.2024 N 910/пр2 // КонсультантПлюс. Россия. – URL : https://www.consultant.ru/ (дата обращения : 03.09.2025).

2 О порядке определения сметной стоимости строительства, пусконаладочных работ и составления сметной документации на основании нормативов расхода ресурсов в натуральном выражении : постановление Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь, 19.04.2023 г. № 39 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь, 19.03.2001, 8/40166. – URL : https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=W22340166 (дата обращения : 03.09.2025).

УДК 658.512.6:625.17

# ПРОИЗВОДСТВЕННО-НОРМАТИВНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ – СОВРЕМЕННОЕ НАПРАВЛЕНИЕ СБАЛАНСИРОВАННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ В ПУТЕВОМ ХОЗЯЙСТВЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

*А. Н. КОВАЛЕНКО*
*Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва*

Применяемые в настоящее время методы планирования материально-трудовых ресурсов на техническое обслуживание пути на дистанциях пути в ОАО «РЖД» не в полной мере учитывают современные подходы сбалансированного их распределения.

При планировании ресурсов на техническое обслуживание железнодорожного пути применяется Методика планирования расходов на текущую эксплуатацию пути, утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» от 30.12.2008 г. № 2897р (далее – предшествующая Методика), в которой при планировании материально-трудовых ресурсов применяется нормативно-целевой метод, утвержденный распоряжением ОАО «РЖД» от 04.02.2014 г. № 266р (в редакции распоряжения ОАО «РЖД» от 02.09.2016 г. № 1806р), который базируется на отчетно-статистической информации по результатам фактического выполнения ранее запланированных показателей.

Практика распределения материально-трудовых ресурсов нормативно-целевым методом в недостаточной мере позволяет учитывать особенности работы конкретных предприятий в планируемом периоде, таких как: возможное изменение штата и/или квалификации работников, совмещение профессий, применение передовых приемов, повышающих производительность труда, местные особенности технологических процессов выполнения работ.

В результате запланированное распределение материально-трудовых ресурсов на техническое обслуживание железнодорожного пути не в полной мере стимулирует материальную заинтересованность непосредственных исполнителей и причастных работников в росте производительности труда.

Недостатком имеющихся методов планирования также является ограниченность возможностей оперативного управления трудовыми ресурсами, в частности, сложности учёта изменения штатного расписания, совмещения профессий, применения стимулирующих выплат за повышение производительности труда и т. д..

Для современной системы ведения путевого хозяйства особенностью является специализация и классификация путей, утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» от 31.12. 2015 г. № 3188р (далее – распоряжение от 31 декабря 2015 г. № 3188), которая обусловливает необходимость внесения изменений распределения материально-трудовых ресурсов.

Целью исследования является разработка системы производственно-нормативного планирования материально-трудовых ресурсов на техническое обслуживание железнодорожного пути, в том числе при строительстве новых и реконструкции существующих железных дорог в зависимости от классификации и специализации железнодорожных линий на линейном, региональном территориальном и центральном уровнях, направленной на адресное их использование.

Основные задачи в соответствии с поставленной целью состоят в следующем:

– разработка системы производственно-нормативного планирования материально-трудовых ресурсов на техническое обслуживание железнодорожного пути на линейном, региональном, территориальном и центральном уровнях;

– разработка коэффициентов учёта современной классификации железнодорожных линий, их специализация и классификация путей, направленных на адресное производственно-нормативное планирование использования материально-трудовых ресурсов по техническому обслуживанию железнодорожного пути;

– разработка методики планирования трудовых и материальных ресурсов в зависимости от классификации и специализации железнодорожных линий на линейном, региональном, территориальном и центральном уровнях планирования.

Выполненная работа реализована в Методике планирования расходов на текущую эксплуатацию железнодорожных путей и сооружений в зависимости от классификации железнодорожных

линий, утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 21.08.2017 г. № 1692р (далее – Методика). Разработанная новая Методика включает новые подходы к сбалансированному распределению материально-трудовых ресурсов по статьям расходов, учитывающих возможности их оперативного адресного управления.

Разработаны алгоритмы применения данной методики и выполнен практический расчет для дистанции пути.

Рассмотренные предложения по учету коэффициентов риска при планировании материально-трудовых ресурсов на техническое обслуживание железнодорожного пути направлены на их дальнейшее уточнение.

Перспективой дальнейшего развития системы планирования материально-трудовых ресурсов при организации технического обслуживания железнодорожного пути является применение факторного анализа и оценки уровня влияния риск-факторов на состояние объектов планирования, что является основой риск-ориентированного подхода при осуществлении контрольно-ревизионной деятельности ОАО «РЖД» в области безопасности движения.

**Список литературы**

1 **Коваленко, А. Н.** Производственно-нормативное планирование при управлении ресурсами железнодорожной инфраструктуры / Н. И. Коваленко, А. Н. Коваленко // Путь и путевое хозяйство. – 2021. – № 2. – С. 37–39.

2 Сокращение затрат на текущую эксплуатацию пути в зависимости от классификации железнодорожных линий / Б. А. Волков, Н. И. Коваленко, А. Ю. Добрин, А. Н. Коваленко // Путь и путевое хозяйство. – 2019. – № 6. – С. 15–19.

3 О методике планирования расходов на текущую эксплуатацию пути / Б. А. Волков, Н. И. Коваленко, А. Ю. Добрин, А. Н. Коваленко // Путь и путевое хозяйство. – 2018. – № 5. – С. 23–26.

4 **Коваленко, А. Н.** Современные особенности бюджетирования в путевом комплексе / А. Н. Коваленко // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации земляного полотна, железных дорог. Секция 2. Железнодорожный путь для высокоскоростного и тяжеловесного движения. – М. : МИИТ, 2019.

5 **Коваленко, А. Н**. Предложения технического обслуживания малоинтенсивных железных дорог в современных условиях / Н. И. Коваленко, А. Н. Коваленко // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : тр. XV междунар. науч.-техн. конф. – М. : МИИТ, 2017. – С. 240–241.

УДК 625.765

## К ВОПРОСУ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕГО РЕМОНТА МЕСТНЫХ ПРОЕЗДОВ И ПОДЪЕЗДНЫХ ДОРОГ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЯЖУЩЕГО В ВИДЕ НЕФТЕШЛАМА

*А. В. КОРОНЧИК, Е. М. ЖУКОВСКИЙ*
*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Республика Беларусь имеет развитую улично-дорожную сеть, в целях её сохранения и поддержания в удовлетворительном транспортно-эксплуатационном состоянии авторами рассматривается направление проведения текущего ремонта местных проездов, подъездных и грунтовых дорог с устройством покрытия из композиции органического вяжущего в виде нефтешлама и асфальтогранулята (асфальтобетонного лома).

Многолетние исследования и наблюдения авторов [1–3], отражают необходимость комплексного подхода к изучению положительных свойства отходов нефтеперерабатывающей промышленности, в частности – нефтешлама, образующегося в результате промывки емкостей на НПЗ, а также цистерн транспортного комплекса железной дороги.

Подходы, описанные в [4], в части предложения использовать органоминеральную смесь на основе нефтешлама, могут быть применены при разработке научно-практических основ технологии получения и применения нового материала, с заданными свойствами, обеспечивающего увеличение срока службы дорожных покрытий, что является актуальной научно-технической задачей и соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности Республики Беларусь на 2026–2030 годы (Указ Президента Республики Беларусь от 01.04.2025 № 135).

Проведенные исследования подтверждены результатами двухлетней эксплуатации восстановленного покрытия. На рисунке 1 представлена схема отбора керна из асфальтобетонного покрытия, отремонтированного с применением нового материала в 2023 году, а также сам керн, отобранный в 2025 году.

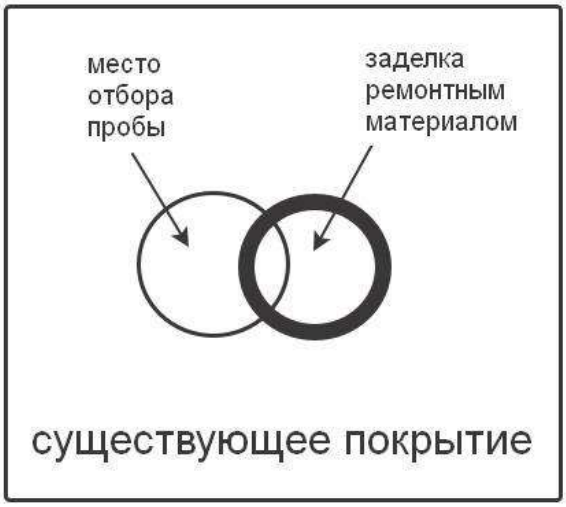


Рисунок 1 – Схема отбора керна из покрытия в месте заделки ремонтным материалом и отобранный керн

Применяемая органоминеральная смесь представляет собой композицию из минеральных материалов определенного зернового состава, отходов очистки нефтяных резервуаров (нефтешлама) и специальных добавок. Нефтешламы обладают рядом ценных свойств, среди которых способность разжижать битумную пленку на поверхности старого асфальтогранулята, что улучшает адгезию и повышает прочность сцепления компонентов дорожного покрытия. Кроме того, нефтешламы характеризуются высокой когезионной способностью, что способствует формированию более однородной и устойчивой структуры материала.

В последние годы в мировой практике дорожного строительства активно развиваются направления, связанные с использованием вторичных ресурсов и промышленных отходов в качестве компонентов дорожных материалов. Это обусловлено стремлением к повышению экологической устойчивости и экономической эффективности.

Конкретных данных о точном количестве асфальтогранулята, произведенного или используемого в Беларуси в 2025 году, в открытых источниках нет. Однако известно, что этот материал широко применяется для ремонта и строительства дорог, площадок, стоянок и подъездных путей по всей стране. Его предлагают в неограниченных объемах для строительных и производственных компаний, что свидетельствует о значительных запасах и производственных мощностях.

Применение чистого асфальтогранулята без добавок имеет ряд особенностей и сложностей. Основные трудности связаны с неоднородностью состава материала, который получают из старого асфальтобетона, он может содержать различные типы битума, минеральные наполнители и загрязнения, что усложняет контроль качества и предсказуемость его свойств при добавлении в новый асфальтобетон. При этом необходимо обеспечить совместимость старого и нового битума, так как старый битум может быть окислен и менее эластичен, что ухудшает адгезию и долговечность покрытия. При низких температурах битум в грануляте недостаточно размягчается, что может привести к расслоению или неравномерному уплотнению. Слишком высокое содержание асфальтогранулята в смеси (обычно ограничивается 16–20 % от общего объема) может снизить прочность и устойчивость асфальтобетона к деформациям. Производство качественного асфальтобетона с асфальтогранулятом требует точного контроля температуры, времени перемешивания и уплотнения. Несоблюдение технологии может привести к неравномерному распределению материала и снижению срока службы покрытия.

Авторы предлагают использовать положительные свойства нефтяного шлама и асфальтогранулята, а также накопленный опыт для создания материалов с заданными свойствами на основе промышленных отходов. Научная идея заключается в том, что вторичные ресурсы промышленности и

материалы, образующиеся в жизненном цикле автомобильной дороги (асфальтобетонный лом, асфальтогранулят), при определенной технологической обработке могут быть использованы для создания дорожных материалов с заданными потребительскими свойствами.

Новизна научной идеи состоит в комплексном подходе к использованию различных видов вторичных ресурсов одновременно для устройства и ремонта автомобильных дорог. На международном уровне подобные исследования часто ведутся разрозненно по отдельным видам отходов, тогда как предлагаемая концепция объединяет нефтешламы и асфальтобетонный лом (асфальтогранулят) в единой технологии.

Результаты исследования направлены на создание новых композиционных материалов для устройства и ремонта автомобильных дорог, а также разработку технологий эффективного применения вторичных ресурсов при строительстве и восстановлении дорожных оснований и покрытий. Научная значимость проекта заключается в получении актуальных данных о возможностях комплексного использования вторичных ресурсов в дорожном строительстве, что способствует развитию теории материаловедения в области транспортной инфраструктуры.

**Список литературы**

1 Современный ремонтный материал для устранения ямочности на дорожных покрытиях / Е. М. Жуковский, А. В. Корончик, С. Е. Кравченко, Д. В. Глинский [и др.] // Минск – Шанхай – Чанчунь: стратегия прорывного сотрудничества : сб. материалов науч.-практ. конф., Минск, 21 апр. 2022 г. / Белорус. национал. техн. ун-т. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 122–124.

2 **Жуковский, Е. М.** К вопросу утилизации нефтяных шламов / Е. М. Жуковский, А. В. Корончик, Я. А. Добрынович // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 160-летию БЖД, Гомель, 24–25 нояб. 2022 г. – Гомель, 2022. – С. 253–254.

3 **Корончик, А. В.** Современные материалы для обеспечения конструктивно-технологической безопасности автомобильных дорог и улиц населенных пунктов / А. В. Корончик, Е. М. Жуковский // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию БелИИЖТа – БелГУТа (Гомель, 16–17 нояб. 2023 г.) : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель, 2023. – С. 389–391.

4 **Жуковский, Е. М.** Восстановление дорожного покрытия после отбора проб / Е. М. Жуковский, А. В. Корончик, С. Е. Кравченко // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2023. – № 2. – С. 38–40.

УДК 625.161.7

## МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ И ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ НА ПЕРЕСЕЧЕНИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ И ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

*Р. М. КУРТИКОВ*
*Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва*

Пересечения автомобильных и железных дорог в одном уровне необходимо отнести к числу наиболее актуальных проблем в России. Связано это с тем, что в зонах одноуровневых пересечений автомобильных и железных дорог наблюдаются огромные транспортные заторы, которые приводят к ухудшению экологической обстановки, к значительным экономическим потерям, а также увеличению количества дорожно-транспортных происшествий, влекущих гибель людей, разрушению элементов транспортной инфраструктуры и других видов ущерба (порчу локомотивов и вагонов, автотранспортных средств и т. п.).

Суммарный прямой ущерб от одного ДТП на переезде порою измеряется десятками миллионов рублей, но самое важное – гибнут люди (рисунок 1).

В соответствии с требованиями Национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» к 2030 г. смертность в результате дорожно-транспортных происшествий должна стремиться к нулевому уровню. В связи с чем необходима разработка высокоэффективных мероприятий и технических решений, способствующих увеличению пропускной способности и безопасности движения автотранспорта на железнодорожных переездах.

Состояние безопасности дорожного движения на одноуровневых железнодорожно-автомобильных пересечениях находится под постоянным вниманием Правительства РФ, Федерального агентства железнодорожного транспорта и ОАО «Российские железные дороги».

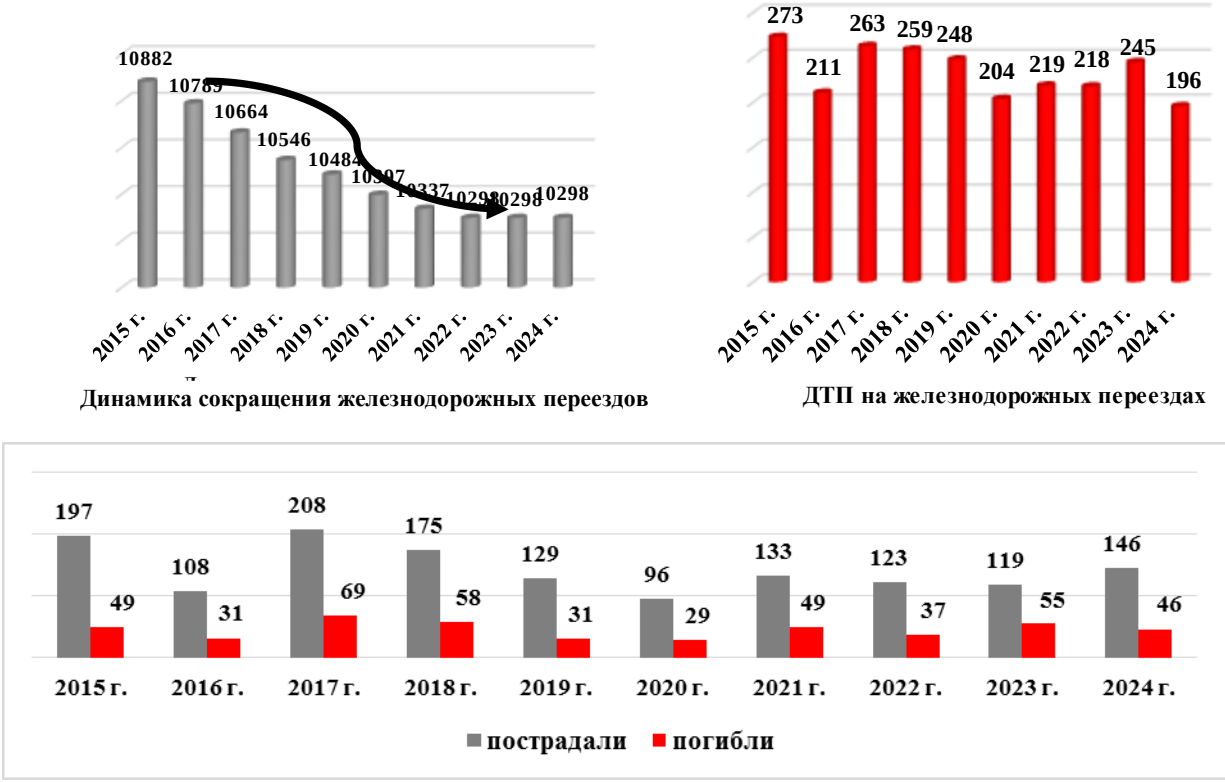



Рисунок 1 – Состояние безопасности дорожного движения на железнодорожных переездах РФ

В настоящее время имеются проблемы, возникающие при пересечении автомобильных и железных дорог в одном уровне. На многих железнодорожных переездах наблюдаются существующие недостатки в их эксплуатации:

– наличие просадок или выбоин на подъезде к переезду;
– в зоне железнодорожных переездов рельсы проседают более чем на 3 см;
– многие переезды не в полном объеме оборудованы необходимыми дорожными знаками;
– отсутствие либо светофорной, либо звуковой сигнализации;
– отсутствие работающего наружного освещения;
– настилы переездов повреждены и требуют проведения капитального ремонта.

По причине неудовлетворительного содержания переездов фактическая скорость движения по ним автомобильного транспорта составляет 10 км/ч.

В зарубежных странах активно внедряют стратегию ликвидации переездов с заменой на строительство путепроводов и не предусмотрен контроль скорости подвижного состава при приближении к переезду на неохраняемых и необслуживаемых переездах. Устройства безопасности дополнительно сосредоточены на переездах, оборудованных АПС, относящихся к категории охраняемых.

Результаты проведенного анализа положительного зарубежного опыта решения проблем, имеющих место на пересечениях автомобильных и железных дорог, позволяют рекомендовать для внедрения в российских условиях: применение на железных дорогах предикторов, как в Великобритании; применение на железнодорожных путях специальных ворот, как в Швеции; установку в асфальтовое покрытие на подъездах к железнодорожному переезду, специальных световых сигналов, увеличивающих внимание водителей, как в Нидерландах; устройство на уровне покрытия проблесковых огней; наличие специальных программ пересечения автомобильных и железных дорог в одном уровне; жесткие санкции к нарушителям правил проезда на железнодорожном переезде; применение более эффективной световой сигнализации (Германия).

Для обеспечения безопасности и управления движением транспортных средств на железнодорожных переездах России используются различные виды технических устройств в зависимости от категории и места расположения переезда.

На отечественных железных дорогах для повышения уровня безопасности движения поездов надо переходить на цифровые технологии.

Реализация данного проекта позволит снизить риски возникновения дорожно-транспортных происшествий на железнодорожных переездах, повысить производительность труда (безлюдная технология), снизить влияние человеческого фактора, сэкономить фонд оплаты труда и средства на строительство и эксплуатацию здания для дежурного по переезду, а также повысить безопасность пересечения железнодорожных путей общественным транспортом.

Одной из разработанных и внедренных новых информационных технологий является установка камер Mobotix на переездах, которые записывают происходящее в зоне железнодорожного переезда и по направленному Wi-Fi-каналу передают на специальные видеотерминалы, которые расположены в кабине локомотива [3, 4].

Для обеспечения безопасности на железнодорожном переезде имеется проект «Интеллектуальная система защиты переездов». В его основу входит принцип взаимодействия с Глобальной навигационной спутниковой системой (ГЛОНАСС) [6, 7].

Также для обеспечения безопасности движения предлагается устанавливать на железнодорожных переездах мониторы, информирующие о времени закрытия и открытия переезда, благодаря чему водители автомобильного транспорта смогут спланировать свои маршруты и тем самым сократить время в пути [6].

Оценка эффективности организации железнодорожно-автомобильных пересечений должна проводиться с учетом экономических и социальных потерь для всех участников дорожного движения.

Социально-экономические потери на железнодорожных переездах состоят из следующих слагаемых (таблица 1).

*Таблица 1* – **Социально-экономические потери от ДТП на железнодорожных переездах**

| Прямые потери | Косвенные потери |
|---|---|
| Затраты на медицинскую помощь, выплаты пенсий и пособий пострадавшим | Затраты на содержание, использование структур в регулировании движения |
| Порча и утрата груза | Затраты, связанные с заторами движения и простоями транспортных средств |
| Затраты на восстановление железнодорожного и автомобильного транспорта | Потери, связанные с нарушение сроков доставки грузов и пассажиров |
| Затраты на восстановление дороги, дорожных сооружений и т. д. | Нарушение ритмичности работы предприятий, взаимные штрафы за срыв графиков перевозок и т. д. |

Аварийность на железнодорожных переездах в России имеет высокие показатели и является одной из острейших социально-экономических проблем.

В среднем за год на 100 железнодорожных переездах насчитывается 2–3 дорожно-транспортных происшествия с весьма тяжкими последствиями.

Во многих странах, в том числе и в России, развитие железнодорожных переездов за счет строительства путепровода (тоннеля) происходит не тогда, когда становится экономически и социально целесообразным, а когда переезд не обеспечивает пропуск объемов транспортного потока (рисунок 2).

Рисунок 2 – Организация комплексных пересечений автомобильных и железных дорог, предусматривающих организацию проезда легкового и автомобильного транспорта по тоннельному путепроводу

По данным специалистов, замену переездов путепроводами экономически целесообразно при интенсивности движения на железной дороге 70–80 пар поездов в сутки и 5 000–6 000 автомобилей в сут-

ки. На практике не стоит строить путепроводы везде и сразу. Нужно смотреть на интенсивность движения автомобилей и поездов и планы по развитию железнодорожных перевозок. Где-то можно даже оставить переезд.

Тем не менее, в ряде случаев строительство путепроводов на сегодняшний день не имеет альтернативы.

Однако можно предложить вариант комплексного пересечения автомобильного транспорта через железнодорожный переезд, которое предусматривает:

– проезд легкового транспорта (которого в транспортном потоке 70–80 %) по облегченному путепроводу, т. е. строительство путепровода с применением конструкций из композитных материалов;

– проезд грузового транспорта и автобуса (которых в составе транспортных потоков 20–30 %) через железнодорожный переезд.

Современный уровень развития технологий полимерных композиционных материалов (ПКМ) позволяет использовать их в самых ответственных сооружениях транспортной инфраструктуры [8].

В связи с быстрым ростом городов и с увеличением количества транспортных средств и грузопотоков, все чаще возникает необходимость в строительстве подземных сооружений: путепроводов в городских стесненных условиях, при пересечении железнодорожных и автодорожных магистралей, пешеходных переходов и других искусственных сооружений мелкого заложения закрытым способом.

Актуальным является выбор способа строительства подобных объектов, который решал бы поставленные задачи и при этом не требовал больших экономических затрат.

При проведении оценки потерь от снижения скорости транспортных средств особую значимость имеет критерий снижения производительности автотранспортных средств, который состоит из следующих факторов:

– уменьшение объемов перевозимого грузовыми автотранспортными средствами груза;

– уменьшение объемов, перевозимых легковыми автомобилями и автобусами пассажиров;

– увеличение затрат времени в пути пассажиров легковых автомобилей и автобусов.

На территории Российской Федерации функционирует двухполосная дорога, где ширина проезжей части переезда должна быть равна ширине проезжей части автомобильной дороги, но не менее 6 м [1].

Необходимо рассмотреть вариант расширения проезжей части (увеличение количества полос) для движения автотранспорта через железнодорожные переезды.

В связи с увеличением автомобильного транспорта двухполосная дорога на железнодорожном переезде приводит к образованию заторов. Следовательно, пропускная способность автомобильного движения на пересечении автомобильных и железных дорог низкая.

В случае расширения проезжей части на железнодорожном переезде пропускная способность увеличится в 2 раза минимум (рисунок 3).

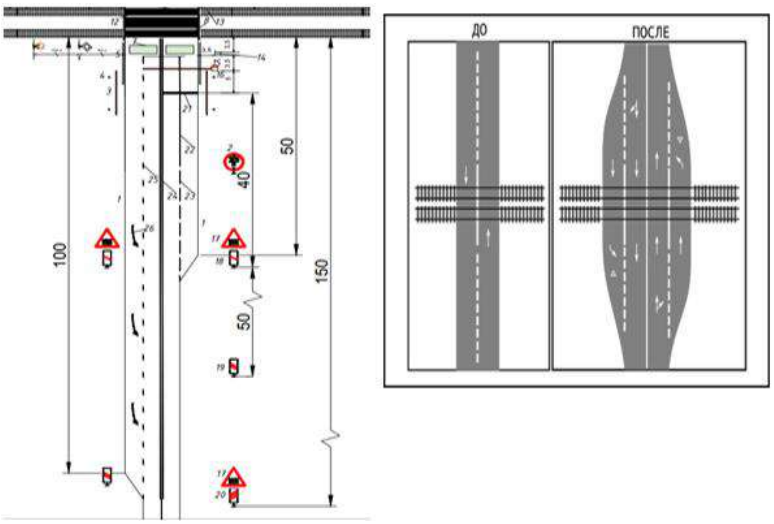



Рисунок 3 – Схема расширения проезжей части (увеличение количества полос) для движения автотранспорта через железнодорожные переезды

Расширение проезжей части подъездов необходимо организовать на пересечениях автомобильных (3 и 4 категории) и железных дорог, где расчетная интенсивность движения автотранспорта составит 2000–6000 ед. /сут.

При устройстве 4-полосных железнодорожных переездов и подъездов решается проблема высоконагруженных автотранспортом регионов. Экономия средств, поскольку бюджет задачи несопоставим со строительством путепроводов, позволяет временно исключить из планов по строительству.

Такой подход позволяет на загруженных трассах в два раза увеличить пропускную способность железнодорожных переездов.

**Список литературы**


1 Об утверждении Условий эксплуатации железнодорожных переездов : приказ Министерства транспорта РФ от 31 июля 2015 г. № 237 // Министерство транспорта Российской Федерации. – URL : https://mintrans.gov.ru/documents/2/4395 (дата обращения : 22.09.2025).

2 Оценка уровня безопасности на железнодорожных переездах в странах – членах ЕЭК ООН и других отдельных странах и стратегические рамки по повышению безопасности на ж.д. переездах // Европейская экономическая комиссия ООН. – URL : https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2017/wp1/ECE-TRANS-WP1- 2017-4r.pdf (дата обращения : 22.09.2025).

3 **Ивашевский, М. Р.** Системы видеонаблюдения на железнодорожном транспорте / М. Р. Ивашевский // Мир транспорта. – 2019. – Т. 17, № 5 (84). – С. 298–314.

4 **Паринова, О. В.** Актуальность применения систем фото- и видеофиксации для оборудования железнодорожных переездов / О. В. Паринова, А. С. Яковлева // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2020. – Т. 1. – С. 128–131.

5 Комплексный учет параметров объектов инфраструктуры железной дороги, железнодорожного подвижного состава и автомобильного транспорта для обеспечения безопасности движения на переездах / Д. В. Ефанов, Г. В. Осадчий, Д. Г. Плотников [и др.] // Автоматика на транспорте. – 2018. – Т. 4, № 2. – С. 167–194. – ISSN 2412-9186.

6 **Васьков, Т. И.** К вопросу об обеспечении безопасности на железнодорожных переездах посредством использования системы GPS/ГЛОНАСС / Т. И. Васьков, А. А. Воробьев // Магистратура – автотранспортной отрасли : материалы IV Всероссийской межвузовской конференции ; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – СПб., 2020. – С. 234–239.

7 **Демьянов, В. В.** Состояние проблемы и методы обеспечения безопасности движения на железнодорожных переездах / В. В. Демьянов, О. Б. Имарова, М. Э. Скоробогатов // Вестник ИрГТУ. – 2018. – Т. 22, № 4. – С. 215–230.

8 Мосты из композитных материалов GFRP (Glass-Fiber-Reinforced- Polymer). – URL : https://www.cantat-associates.com/ru/мосты-из-композитных- материалов (дата обращения : 22.09.2025).


УДК 625.143.51:621.793

## ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ПРУЖИННЫХ ПРУТКОВЫХ КЛЕММ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ РЕЛЬСОВЫХ СКРЕПЛЕНИЙ

*А. С. ЛАПУШКИН*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Пружинные прутковые клеммы представляют собой критически важные элементы рельсовых скреплений в современной железнодорожной инфраструктуре. Эти компоненты отвечают за надежное крепление рельсов к подрельсовым основаниям, обеспечивая при этом возможность температурного расширения и сжатия путей. В условиях интенсивной эксплуатации железных дорог России, характеризующихся значительными перепадами температур, повышенной влажностью, воздействием противогололедных реагентов и динамическими нагрузками от подвижного состава, защита от коррозии становится ключевым фактором обеспечения долговечности и безопасности пути.

Эксплуатационные нагрузки на пружинные клеммы носят комплексный характер: они включают не только постоянные вибрационные воздействия, но и агрессивное влияние окружающей среды. Исследования показывают, что в условиях сурового российской климата, особенно в регионах с повышенной влажностью и в зимний период при использовании химических реагентов, непокрытые металлические поверхности подвергаются ускоренной коррозии, что приводит к снижению прочности и упругих свойств клемм. Коррозионные процессы усугубляются механическими

напряжениями, что в конечном итоге может привести к хрупкому разрушению ответственных элементов скрепления со всеми вытекающими последствиями для безопасности движения.

Отечественная нормативная база для пружинных прутковых клемм включает несколько ключевых документов (таблица 1). ОСТ 32.156-2000 «Клеммы пружинные прутковые для крепления рельсов. Технические условия» прямо указывает, что «клеммы по согласованию сторон могут иметь защитное антикоррозийное покрытие. Вид покрытия согласовывается предприятием-изготовителем с заказчиком». Этот стандарт устанавливает также требования к материалам – клеммы должны изготавливаться из стали марки 40С2 или других марок со схожими механическими свойствами, с твердостью после термической обработки от 42 до 48 HRC.

Более современным нормативным документом является ГОСТ 33186-2014, который распространяется на пружинные прутковые клеммы промежуточных скреплений, применяемые для крепления железнодорожных рельсов. Этот стандарт устанавливает технические требования к материалам (стали марок 60С2А, 40С2 и 42С2-ПВ) и технологии производства, включая необходимость термической обработки – закалки и отпуска. Хотя в данном стандарте не детализируются конкретные виды защитных покрытий, он создает основу для обеспечения качества всей продукции.

*Таблица 1* – **Основные нормативные документы для пружинных прутковых клемм**

| Наименование документа | Дата введения | Ключевые положения |
|---|---|---|
| ОСТ 32.156-2000 | 1 февраля 2001 г. | Установление технических требований к клеммам, возможность нанесения защитного покрытия по согласованию с заказчиком |
| ГОСТ 33186-2014 | 1 июля 2015 г. | Современные требования к материалам и технологии производства пружинных клемм |

Критерии выбора защитных покрытий для пружинных прутковых клемм определяются условиями их эксплуатации (таблица 2). Покрытие должно не только обеспечивать эффективную барьерную защиту от влаги и агрессивных сред, но и сохранять свои свойства в широком температурном диапазоне, выдерживать механические воздействия (вибрацию, трение), не нарушая при этом функциональности клеммы. Особое внимание уделяется адгезии покрытия к основному металлу и его равномерности, поскольку любое повреждение защитного слоя может стать очагом локальной коррозии.

Технологический процесс нанесения покрытий требует тщательной подготовки поверхности. Исследования показывают, что оптимальные результаты достигаются при использовании гальванических методов (цинкование, кадмирование) и современных полимерных покрытий. Перед нанесением покрытия клеммы подвергаются пескоструйной обработке для удаления окалины и повышения адгезии, а также обезжириванию. Важным этапом является пассивация нанесенного цинкового покрытия, которая значительно повышает его коррозионную стойкость.

Система контроля качества защитных покрытий включает несколько этапов. Визуальный осмотр позволяет выявить нарушения сплошности покрытия – наплывы, потеки, неокрашенные участки. Для количественной оценки толщины покрытия используются магнитные толщиномеры, позволяющие быстро и точно измерить толщину слоя без разрушения детали. Особое внимание уделяется контролю качества в зонах концентрации напряжений – в местах изгибов и сопряжений различных элементов клеммы.

*Таблица 2* – **Сравнительная характеристика защитных покрытий для пружинных клемм**

| Тип покрытия | Преимущества | Недостатки | Сфера применения |
|---|---|---|---|
| Цинкование | Высокая коррозионная стойкость, катодная защита, относительная дешевизна | Ограниченная стойкость в сильноагрессивных средах | Стандартные условия эксплуатации |
| Полимерные покрытия | Отличная химическая стойкость, широкий диапазон толщин, эстетичный вид | Более высокая стоимость, сложность ремонта | Агрессивные среды, особо ответственные участки пути |
| Комбинированные покрытия (цинк + полимер) | Максимальная защита, сочетание катодной и барьерной защиты | Высокая стоимость и трудоемкость нанесения | Условия крайне агрессивных сред, прибрежные регионы |

Для испытания защитных свойств покрытий применяются солевые камеры, в которых образцы подвергаются воздействию тумана солевого раствора в течение регламентированного времени. Эти испытания позволяют прогнозировать многолетнюю эксплуатацию в агрессивных условиях и оценить прогнозируемый срок службы покрытия. Дополнительно проводятся испытания на адгезию методом решетчатого надреза, термоциклирование и испытания на стойкость к механическим воздействиям.

Современные исследования в области защиты пружинных клемм направлены на разработку составов с повышенными барьерными свойствами. Одним из перспективных направлений является использование нанодисперсных наполнителей в полимерных матрицах, создающих более извилистый путь для проникновения агрессивных агентов к поверхности металла. Другим направлением является разработка покрытий с индикаторными свойствами, меняющих цвет при повреждении или достижении определенной степени износа, что упрощает процедуры технического обслуживания.

Значительный потенциал имеет внедрение технологий компьютерного моделирования для прогнозирования поведения защитных покрытий в различных условиях эксплуатации. Использование программно-вычислительных комплексов, таких как SolidWorks и Ansys Workbench, позволяет анализировать напряженно-деформированное состояние клемм с покрытиями и оптимизировать их форму и состав защитного слоя. Эти методы позволяют создавать принципиально новые конструкции клемм, в том числе в виде пружин кручения, обладающие улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Защитные покрытия для пружинных прутковых клемм представляют собой необходимое звено в обеспечении долговечности и надежности рельсовых скреплений. Современные технологии позволяют эффективно противостоять коррозии и другим деградационным процессам, продлевая срок службы этих критически важных элементов железнодорожной инфраструктуры. Дальнейшее развитие в этой области связано с созданием интеллектуальных покрытий с функцией самовосстановления и диагностики, а также с разработкой комплексных систем защиты, учитывающих особенности конкретных условий эксплуатации. Внедрение таких решений будет способствовать повышению безопасности и снижению эксплуатационных затрат на содержание железнодорожного пути в суровых климатических условиях России.

УДК 625.17

## ЗАДАЧИ ПУТЕВОГО ХОЗЯЙСТВА БЕЛОРУССКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

*Н. В. МАМСИКОВ, С. В. КОРИК*
*Белорусская железная дорога, г. Минск*

*П. В. КОВТУН*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

На долю путевого хозяйства приходится более четверти стоимости основных фондов Белорусской железной дороги, шестая часть эксплуатационных расходов, в нем занята шестая часть работников железнодорожного транспорта.

Содержание путевого хозяйства и ремонт железнодорожных магистралей обеспечивают 27 предприятий, в том числе 20 дистанций пути, 6 дистанций защитных лесонасаждений, государственное предприятие «Ремпуть Белорусской железной дороги», в которых по состоянию на 01.01.2025 работает около 10 000 чел.

В настоящее время перед путевым хозяйством Белорусской железной дороги в связи с внешними и внутренними факторами, оказывающими значительное влияние на его деятельность, стоит острая необходимость принятия мер, направленных на повышение эффективности работы. Основными влияющими факторами являются:

– нехватка кадров в связи с изменениями на рынке труда;

– наличие участков пути с просроченным ремонтом, вызванное снижением объемов ремонтов железнодорожного пути в течение последних 30 лет, а также превышением требуемыми норматив-

ными объемами ремонта железнодорожных путей и искусственных сооружений финансовых и технических возможностей Белорусской железной дороги;

– снижение объемов закупки новых рельсов;

– высокий процент физического износа специального железнодорожного подвижного состава и автотракторной техники, а также их моральное старение;

– изменение условий эксплуатации железнодорожных путей, вызванное переориентацией грузопотоков, необходимостью повышения скоростей движения пассажирских поездов для поддержания конкурентоспособности и привлекательности железнодорожных перевозок за счет сокращения времени нахождения пассажиров в пути следования. Непрогнозируемое изменение условий эксплуатации железнодорожных путей приводит к затруднению долгосрочного планирования ремонтных программ.

Данные факторы требуют изменения подходов к системе ведения путевого хозяйства Белорусской железной дороги в целом.

Для эффективного достижения целей устойчивого развития путевого хозяйства выбраны следующие основные направления, которые условно можно сгруппировать по отдельным областям:

– нормативно-техническое обеспечение;

– организационная структура путевого хозяйства;

– усиление инфраструктуры и укрепление материально-технической базы путевого хозяйства;

– ресурсосберегающие технологии;

– инновационная деятельность, технологический суверенитет и снижение импортозависимости;

– совершенствование технологий производства работ по ремонту и текущему содержанию железнодорожных путей и искусственных сооружений;

– цифровая трансформация и автоматизация производственных процессов.

Стратегической целью путевого хозяйства Белоруской железной дороги является обеспечение эффективной и устойчивой его работы, поддержание надежного и технически исправного состояния путевых объектов инфраструктуры, гарантирующего безопасность движения поездов. Стратегическая цель реализуется в рамках следующих приоритетов:

1 Совершенствование конструкции, повышение надежности работы и усиление железнодорожного пути и искусственных сооружений.

2 Укрепление материально-технической базы путевого хозяйства.

3 Совершенствование подходов к планированию ремонтных работ и организации текущего содержания пути и искусственных сооружений.

4 Оптимизация расходов за счет совершенствования технологических процессов, применения ресурсосберегающих и инновационных технологий, позволяющих при безусловном обеспечении безопасности движения поездов снизить трудо- и ресурсоемкость содержания железнодорожных путей.

Совершенствование конструкции, повышение надежности работы и усиление железнодорожного пути и искусственных сооружений будет обеспечено за счет увеличения доли железнодорожных путей и стрелочных переводов на железобетонном основании, расширения полигона укладки бесстыкового пути, в том числе со сверхдлинными рельсовыми плетями, снижения импортозависимости за счет освоения производства материалов верхнего строения пути на предприятиях Республики Беларусь, внедрения новых конструкций, направленных на повышение безопасности движения поездов, таких как контррельсы в кривых малого радиуса, а также контррельсы для защиты остряков стрелочных переводов и других мероприятий.

Укрепление материально-технической базы направлено на своевременное обновление морально устаревшего и физически изношенного специального железнодорожного подвижного состава и автотракторной техники.

Совершенствование подходов к планированию ремонтных работ будет осуществляться за счет совершенствования нормативной базы, регламентирующей систему ведения путевого хозяйства, в части межремонтных сроков, критериев назначения работ, перехода к назначению работ по фактическому состоянию.

Совершенствование организации текущего содержания пути и искусственных сооружений планируется осуществить за счет пересмотра административного деления дистанций пути и перехода на машинизированное текущее содержание железнодорожного пути.

Оптимизировать расходы планируется за счет применения ресурсосберегающих и инновационных технологий, освоения и внедрения новых технологий восстановления рельсов и металлических элементов стрелочных переводов, расширения полигона укладки малообслуживаемых конструкций железнодорожного пути, применения безлюдных технологий, включая вывод персонала из «опасной зоны» путем внедрения технологического подогрева стрелочных переводов.

Прогнозируется, что при благоприятном влиянии внутренних и внешних факторов, результаты от реализации направлений указанных приоритетов позволят к 2030 году обеспечить:

– безопасность движения поездов;

– поддержание доли участков главных железнодорожных путей с просроченным ремонтом на уровне не более 2,5 %;

– увеличение протяженности бесстыкового пути: на главных путях – до 70 %; на станционных путях – до 12 %;

– увеличение протяженности главных путей на железобетонном основании – до 99,9 %, а станционных – до 80 %;

– увеличение протяженности главных путей с рельсовым скреплением типа СБ – до 50 %;

– продление жизненного цикла железнодорожного пути – на 20 %;

– переход на машинизированное текущее содержание железнодорожного пути всеми дистанциями пути;

– снижение среднесписочной численности работников путевого хозяйства за счет внедрения нового специального железнодорожного подвижного состава – не менее чем на 650 чел.;

– снижение трудоемкости выполняемых работ за счет внедрения нового специального железнодорожного подвижного состава – порядка 1,5 млн чел·ч;

– увеличение доли стрелочных переводов на главных и приемоотправочных путях, оборудованных системами принудительной очистки стрелочных переводов, – до 100 %;

– снижение количества дефектных рельсов, эксплуатируемых в железнодорожных путях, – на 30 %.

При внедрении мероприятий, определенных соответствующими программными документами Белорусской железной дороги, предусматривается проводить мониторинг и оценивать эффект, полученный от их реализации.

УДК 625.17

## ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНИЗИРОВАННОГО ТЕКУЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ПУТИ НА БЕЛОРУССКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ

*Н. В. МАМСИКОВ, А. А. КРАВЧЕНКО*
*Белорусская железная дорога, г. Минск*

*П. В. КОВТУН*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Развитие транспортного комплекса приобретает статус приоритетной задачи государственной деятельности. Путевое хозяйство – одна из основных отраслей железнодорожного транспорта, в которую входят железнодорожный путь со всеми сооружениями, а также комплекс производственных подразделений и хозяйственных предприятий, предназначенных для обеспечения бесперебойной работы пути, его текущего содержания и ремонта. Основным назначением путевого хозяйства является содержание пути и путевых устройств в постоянной исправности, чтобы обеспечивать безопасное и плавное движение поездов с наибольшими скоростями, установленными для данного направления. Достигается это текущим содержанием пути, своевременным выявлением и предупреждением неисправностей пути, устранением их причин, а также усилением и ремонтом пути. Главным фактором оптимизации расходов путевого хозяйства является применение ресурсосберегающих технологий, позволяющих продлевать ремонтные сроки и снижать трудоемкость текущего содержания пути. В экономическом плане перспектива развития путевого хозяйства должна сводиться к увеличению расходов на ремонтные работы и к планомерному снижению расходов на те-

кущее содержание, поскольку рубль, вложенный в содержание пути, дает меньшую отдачу на снижение общих расходов, чем тот же рубль, вложенный в ремонт.

Достижение основных целей развития и обновления путевого хозяйства будет обеспечиваться соответствующими основными направлениями в области технической, технологической, кадровой, финансовой и инвестиционной политики государственного объединения «Белорусская железная дорога», а также выполнением комплекса соответствующих мероприятий.

Наиболее эффективным решением проблемы содержания пути является начавшийся переход к машинизированному выполнению работ. С помощью существующих машин можно выполнить до 70 % общего объема летних путевых работ. Основа машинизированного содержания пути – это технологические «окна».

Переход на технологию машинизированного текущего содержания железнодорожного пути базируется на следующих основных принципах:

– перераспределение имеющейся и закупка новой путевой техники;

– укрупнение путевых бригад с увеличением участков обслуживания;

– оснащение путевых бригад с учетом увеличения участков обслуживания автомобильным транспортом;

– укомплектование путевых бригад современным механизированным инструментом;

– вывод работников путевого хозяйства из опасной зоны за счет применения систем принудительной очистки стрелочных переводов;

– распределение функций контроля и содержания железнодорожного пути за счет введения в штат контролеров состояния железнодорожного пути.

Изменение подходов к текущему содержанию железнодорожного пути позволяет:

– компенсировать снижающуюся штатную численность монтеров пути за счет увеличения оперативности доставки персонала к местам производства работ, применения современного механизированного инструмента и замещения ручного труда технологическими комплексами (путевыми машинами, системами принудительной очистки стрелочных переводов);

– обеспечить более высокий уровень охраны труда при выполнении работ по текущему содержанию железнодорожного пути за счет уменьшения вероятности их выполнения с отступлением от технологий производства работ из-за недостатка персонала;

– повысить мобильность путевых бригад и оперативность устранения выявляемых неисправностей;

– повысить результативность выявления неисправностей железнодорожного пути и контроля за их устранением.

Эффективность и ожидаемые результаты от реализации мероприятий поэтапного перевода дистанций пути на технологию машинизированного содержания выражаются в следующем.

1 Обеспечение автомобилями повышенной проходимости, аккумуляторным инструментом и пересмотр административного деления дистанций пути позволяют повысить производительность труда при содержании железнодорожного пути, обеспечить соблюдение технологических процессов и требований безопасности производства работ, равнозначную нагрузку на руководителей среднего звена, а также снизить эксплуатационные затраты на содержание железнодорожного пути.

2 В связи с укрупнением путевых бригад и увеличением участков их обслуживания закупка автомобилей повышенной проходимости позволит обеспечить оперативность выполнения неотложных работ, повысить мобильность работников путевого хозяйства, улучшить условия работы монтеров пути, вывести их из опасной зоны при следовании к месту производства работ и обратно за счет доставки автотранспортом. Расчетный срок окупаемости автомобилей повышенной проходимости составляет 2,2 года.

3 Закупка специального подвижного состава обусловлена необходимостью замещения ручного труда и направлена на решение вопросов с укомплектованностью кадрами организаций путевого хозяйства, сокращение расходов на эксплуатацию самортизированной и морально устаревшей путевой техники, повышение производительности труда. Согласно стратегии развития Белорусской железной дороги к 2040 году замещение ручного труда технологическими комплексами в путевом хозяйстве планируется на уровне 80 %. Для выполнения данного индикативного показателя предусматривается приобретение современного высокопроизводительного специального подвижного состава со сроком окупаемости в диапазоне от 4,4 до 14,1 года, исключая снегоуборочную технику,

срок окупаемости которой составляет 34,9 года при сроках эксплуатации на Белорусской железной дороге более 50 лет. Основное количество планируемого к закупке специального подвижного состава имеет срок окупаемости менее 9 лет при сроке его фактической эксплуатации порядка 40 лет.

4 Экономическая эффективность применения аккумуляторного инструмента показывает, что годовые расходы на его содержание более чем в сорок раз меньше по сравнению с инструментом, имеющим привод от двигателя внутреннего сгорания, а его стоимость в четыре раза меньше при практически одинаковых технических характеристиках.

5 Оборудование централизованных стрелочных переводов технологическим подогревом с системой дистанционного управления, диагностики и мониторинга (далее – электрообогрев) позволит обеспечить вывод работников путевого хозяйства из опасной зоны производства работ. Срок окупаемости электрообогрева без учета стоимости работ по очистке снега рабочим персоналом составляет 1,2 года и достигается за счет отсутствия необходимости организации круглосуточных дежурств монтеров пути.

Каждое из обозначенных направлений имеет достаточную экономическую эффективность и позволит значительно снизить эксплуатационные расходы за счет оптимизации штатной численности.

Как видно, современная тенденция постоянно развивающихся технологических процессов диктует условия не только по совершенствованию подходов в эксплуатационной деятельности, но и определяет необходимость в развитии материально-технической базы путевого хозяйства.

Реализация указанных направлений предусматривает следующие задачи:

– оптимизация расходов за счет совершенствования технологических процессов, применения ресурсосберегающих и инновационных технологий, позволяющих при безусловном обеспечении безопасности движения поездов снизить трудо- и ресурсоемкость содержания железнодорожных путей при увеличении производительности труда;

– укрепление материально-технической базы, направленное на своевременное обновление морально устаревшего и физически изношенного специального железнодорожного подвижного состава и автотракторной техники, в том числе для обеспечения мобильности путевых бригад в условиях увеличения зоны обслуживания и нехватки кадров в связи с изменениями на рынке труда.

УДК 625.8

## ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДРЕНИРУЮЩИХ АСФАЛЬТОБЕТОНОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

*М. С. МОРДАС, З. А. ИСАЕНЯ, Е. М. ЖУКОВСКИЙ*
*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Обеспечение безопасности дорожного движения – одна из ключевых задач транспортной отрасли. В Республике Беларусь, как и за рубежом, большинство автомобильных дорог имеют асфальтобетонное покрытие. Состояние данного покрытия предопределяет безопасность дорожного движения. В связи с этим работы в области повышения надежности автомобильных дорог являются перспективным научным направлением.

Во время выпадения осадков вода скапливается на поверхности дорожного покрытия, создавая для водителей опасные условия движения по автомобильным дорогам, которые подразумевают собой потерю сцепления колеса с покрытием из-за неспособности шины отводить большое количество воды. Это приводит к аквапланированию, снижению видимости на дорогах и увеличению количества брызг от проезжающих автомобилей, что снижает общую безопасность движения на объектах транспортной инфраструктуры.

С конца 1960-х годов в дорожном строительстве получил распространение дренирующий асфальтобетон, применяемый в качестве покрытия автомобильных дорог поверх плотного асфальтобетона. Данное покрытие имеет систему открытых пор в количестве 15–25 % от минеральной части асфальтобетона. Благодаря высокой пористости, попадающая на покрытие вода не застаивается, а

по системе пор уходит вглубь слоя и отводится на обочину. При использовании этой технологии исключается появление пленки воды на поверхности покрытия, а также технология не позволяет проникать воде в нижние слои основания, что исключает снижение прочности всей конструкции. Коэффициент сцепления данного покрытия на 30 % выше, что является одним из важных критерием безопасного движения по автомобильным дорогам [1].

Данное покрытие используют при строительстве автомобильных дорог (в настоящее время в Республике Беларусь дренирующий асфальтобетон не применяется) с целью повышения коэффициента сцепления при выпадении осадков. Во время движения автотранспорта по дренирующему асфальтобетону со скоростью 100 км/ч коэффициент сцепления снижается на 20 %, а по плотному асфальтобетону – на 50 %. Дренирующий асфальтобетон рассчитан на эксплуатацию в покрытии автомобильной дороги в течение 15 лет [2].

Дренирующие асфальтобетонные смеси представляют собой эффективное решение для повышения безопасности объектов транспортной инфраструктуры. Их ключевая особенность – высокая проницаемость, позволяющая эффективно отводить воду с поверхности автомобильной дороги.

При исследовании возможности применения дренирующих асфальтобетонов на объектах транспортной инфраструктуры, таких как автомобильные дороги, внутридворовые территории, пешеходные дорожки, тротуары и аэродромы, был использован метод анализа литературных источников и технических нормативных правовых актов по теме исследования. Также в лаборатории были изготовлены образцы дренирующего асфальтобетона и проведены испытания для определения их физико-механических свойств.

По результатам испытаний можно сделать вывод, что образцы дренирующего асфальтобетона соответствуют пределу прочности на сжатие высокопористому асфальтобетону марки II по нормативному документу Республики Беларусь СТБ 1033-2016 «Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон» [3]. А также показатели физико-механических свойств дренирующего асфальтобетона соответствуют нормативным требованиям для высокопористых асфальтобетонов, таким как водонасыщение, набухание и остаточная пористость.

Применение дренирующих покрытий показало свою эффективность в различных климатических условиях. Однако существует ряд факторов, влияющих на долговечность таких покрытий. Основные проблемы связаны с пониженной коррозионной устойчивостью и склонностью к трещинообразованию. Использование дренирующих асфальтобетонов в Республике Беларусь затруднено в связи с большим количеством температурных циклов, во время которых содержащие влагу грунтовые частицы увеличиваются и разрушают структуру дренирующего асфальтобетона.

Для повышения срока службы рекомендуется использование модифицированных битумов и специальных добавок, улучшающих эксплуатационные характеристики материала.

С целью обеспечения оптимальных свойств дренирующего асфальтобетона используют битум, устойчивый к температурным колебаниям, и щебень различных фракций (5–20 мм) для повышения прочности и долговечности покрытия. При укладке дренирующего асфальтобетона на аэродромах необходимо нижний слой покрытия выполнять из плотного асфальтобетона, который не пропускает воду в слои основания, а также соблюдать поперечные уклоны для эффективного отвода воды к обочинам аэродрома.

Ключевые преимущества использования дренирующих асфальтобетонов:

1 Высокая пористость материала, которая способствует эффективному отводу воды.

2 Повышение безопасности за счет уменьшение риска аквапланирования и скольжения на взлетно-посадочных полосах аэродромов и автомобильных дорогах.

3 Улучшение видимости во время выпадения осадков. Уменьшение количества брызг от впереди идущих автомобилей повышает общую видимость на дороге.

4 Повышение сцепления. Улучшенные сцепные качества покрытия особенно важны в условиях влажной погоды.

5 Снижение уровня шума. Особая текстура поверхности способствует уменьшению шума от взаимодействия шин с покрытием.

6. Снижение риска водной эрозии и разрушения покрытия.

7 Высокая стойкость к колееобразованию из-за высокого содержания щебня в составе асфальтобетонной смеси [4].

Применение покрытий с дренирующим асфальтобетоном целесообразно на элементах обустройства городских улиц и внутридворовых территориях, где недопустимо движение тяжелых транспортных средств, на автомобильных дорогах, имеющих наименьший продольный уклон, а также на элементах аэродромов с нежесткими дорожными одеждами. Это позволит ускорить отвод воды с поверхности покрытия, избежать эффекта аквапланирования, снизить затраты на обслуживание аэродрома за счет уменьшения риска водной эрозии, а также увеличить безопасность полетов благодаря улучшению дренажных свойств покрытия.

Использование дренирующих асфальтобетонов – перспективное направление для повышения безопасности транспортной инфраструктуры. Правильный выбор состава и технологии укладки позволяет создать долговечное и эффективное покрытие, улучшающее общие условия движения.

**Список литературы**

1 **Ширяев, Н. И.** Применение дренирующих асфальтобетонных смесей и асфальтобетонов в верхних слоях покрытия автомобильной дороги / Н. И. Ширяев, А. С. Ефимочкин // Строительство и архитектура-2017. Дорожно-транспортный факультет : материалы науч.-практ. конф., Ростов-на-Дону, 28–30 нояб. 2017 г. / Министерство образования и науки; Донской государственный технический университет, Академия строительства и архитектуры. – Ростов н/Д : Донской гос. техн. ун-т, 2017. – С. 13–17.

2 **Порин, В. О.** Особенности производства, устройства и преимущества дренирующих асфальтобетонов / В. О. Порин, С. А. Чудинов // Материалы XIX Всероссийской (национальной) научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2023. – С. 674–677.

3 **Дьяков, К. А.** Дренирующие асфальтобетоны. Опыт и перспективы применения / К. А. Дьяков, Р. М. Черсков, Е. В. Зинченко // Строительные материалы. – 2013. – №. 5. – С. 4–7.

4 **Мордас, М. С.** Оценка эффективности применения базальтового волокна в дренирующем асфальтобетоне / М. С. Мордас, Е. М. Жуковский // V Бетанкуровский международный инженерный форум : сб. тр., Санкт-Петербург, 29 нояб. – 1 дек. 2023 г. В 2 т. – СПб. : Петерб. гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I, 2023. – С. 53–56.

УДК 625.745.21

## ОСОБЕННОСТИ СООРУЖЕНИЯ ВОДОПРОПУСКНЫХ ТРУБ НА АВТОДОРОГАХ МЕТОДОМ ПРОДАВЛИВАНИЯ

*М. Ю. НИКИТЕНКО, Г. В. АХРАМЕНКО, Е. А. ГУЛЕВИЧ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Одним из ключевых элементов, обеспечивающих надежную и долговечную эксплуатацию автомобильных дорог, являются водопропускные сооружения. Актуальность устройства и содержания водопропускных сооружений обусловлена необходимостью защиты транспортных коммуникаций от эрозии, подтоплений и просадок, которые могут привести к значительным материальным потерям и угрозе безопасности дорожного движения. В условиях изменения климата, увеличения интенсивности осадков и расширения дорожной сети растет потребность в эффективных, экономически обоснованных и экологически безопасных решениях в области водоотведения.

К числу наиболее распространённых видов традиционных водопропускных сооружений относятся трубы (железобетонные, металлические, асбестоцементные), мостовые конструкции малых пролётов, а также лотки и каналы. Их строительство обычно включает этапы подготовки основания, укладки элементов сооружения, устройства дренажных систем и последующей засыпки грунтом с уплотнением. Технологии, применяемые при этом, отличаются относительной простотой, доступностью материалов и отработанными нормативами. Несмотря на длительную историю применения, традиционные методы не всегда отвечают современным требованиям по скорости возведения, экологической устойчивости и ресурсоэффективности.

Цель применения метода продавливания – обеспечить устройство водоотводных коммуникаций без разрушения существующих объектов, с минимальными нарушениями окружающей среды и транспортной инфраструктуры. Это особенно актуально при строительстве и реконструкции автомобильных дорог, железнодорожных путей, в условиях городской застройки, а также при пересечении водотоков.

Преимущества метода продавливания включают:

– минимальное вмешательство в действующую инфраструктуру, что позволяет избежать перекрытия движения транспорта и сохранять целостность дорожного полотна;

– сокращение сроков строительства за счёт высокой механизации и отсутствия необходимости в масштабных земляных работах;

– экономическая эффективность при выполнении работ в условиях ограниченного пространства;

– снижение экологических рисков, поскольку метод не требует открытой выемки и минимизирует нарушение природного ландшафта;

– высокая точность работ, особенно при использовании современных систем навигации и контроля;

– повышенная безопасность, как для строителей, так и для участников дорожного движения.

Основные механизмы и оборудование, используемые в технологии продавливания, следующие:

– гидравлические домкраты высокой мощности;

– установки направленного бурения (в зависимости от технологии);

– ограждающие конструкции (стартовые и приемные котлованы);

– навигационные системы и устройства контроля уклона;

– лебёдки и подающие системы для труб или сборных элементов.

Основные этапы технологии продавливания включают подготовку, бурение, продавливание, монтаж.

Подготовка площадки и устройство стартового котлована:

– выполняется разработка грунта;

– устраивается бетонное или металлическое основание, устанавливаются направляющие и домкратная система;

– обеспечивается водоотведение и укрепление стен котлована.

Проходка и бурение:

– в зависимости от грунта и диаметра трубы может использоваться буровая установка для проходки;

– возможно бурошнековое удаление грунта или вытеснение его при продавливании.

Продавливание трубы (или секций):

– секции конструкции подаются в котлован и поочередно продавливаются в грунт;

– стыки уплотняются герметизирующими материалами;

– контролируются направление и уклон при помощи лазерного или оптического оборудования.

Монтаж и окончательные работы:

– устраивается приемный котлован;

– проверяются целостность и герметичность конструкции;

– проводятся обратная засыпка, уплотнение и восстановление поверхности [1].

Сравнение метода продавливания и открытого способа представлено в таблице 1.

Современные методы строительства, включая бестраншейные технологии, всё чаще рассматриваются не только с технической и экономической точки зрения, но и с позиций устойчивого развития, защиты окружающей среды и минимизации социального воздействия. Это и минимизация вмешательства в природные ландшафты (сохранение растительного покрова, минимизация нарушения экосистем и мест обитания животных), и снижение уровня шума и загрязнения.

*Таблица 1* – **Сравнение метода продавливания и открытого способа**

| Параметр | Метод продавливания | Открытый способ |
|---|---|---|
| Сроки выполнения работ | Сокращённые сроки за счёт отсутствия масштабных земляных работ | Более длительные сроки из-за рытья котлованов, выемки грунта и восстановления |
| Стоимость | Более высокая прямая стоимость (оборудование, механизация), но сниженные косвенные затраты | Ниже затраты на материалы и технику, но выше расходы на восстановление поверхности |
| Влияние на дорожное движение | Практически отсутствует – движение сохраняется | Требуется перекрытие участка дороги, организация объездов |
| Экологическое воздействие | Минимальное: нет необходимости вскрытия почвы, сохраняется ландшафт | Существенное: выемка грунта, нарушение растительности и дренажных систем |
| Область применения | Оптимален в условиях плотной городской застройки, под дорогами | Применим в открытых, свободных от застройки и коммуникаций территориях |
| Безопасность выполнения работ | Более высокая: работы ведутся в контролируемых условиях | Зависит от глубины и устойчивости котлована, погодных условий |
| Точность и контроль | Высокая точность прокладки благодаря навигационному оборудованию | Менее точный метод, зависит от квалификации рабочих и условий на площадке |

С учетом региональных особенностей Республики Беларусь (наличие болотистой или переувлажненной местности) метод продавливания имеет целый ряд регионально значимых преимуществ:

– отсутствие необходимости осушения больших территорий, что важно для сохранения гидробаланса болот;

– снижение риска просадок и нарушений торфяных массивов, благодаря минимальному объёму земляных работ;

– возможность устройства дренажных и водоотводных систем без вскрытия поверхности, особенно актуально при пересечении мелиоративных каналов.

Таким образом, в условиях стремительного развития транспортной инфраструктуры метод продавливания водопропускных сооружений приобретает особую актуальность для Республики Беларусь. Эта технология, относящаяся к бестраншейным методам строительства, позволяет решать комплекс задач, связанных с прокладкой трубопроводов под автомобильными дорогами без вскрытия дорожного полотна. Применение метода продавливания способствует сохранению целостности покрытия, снижению затрат на восстановление, повышению безопасности дорожного движения и минимизации социального дискомфорта для населения.

Особое значение метод приобретает при строительстве и реконструкции инженерных коммуникаций в малых населённых пунктах и на региональных дорогах, где даже кратковременное перекрытие движения может привести к транспортной изоляции и затруднению доступа к социально значимым объектам. Благодаря возможности выполнения работ без остановки движения, технология продавливания позволяет обеспечить непрерывность транспортных потоков, что особенно важно в условиях ограниченной дорожной сети.

**Список литературы**

1 Методические рекомендации по способам бестраншейной прокладки труб дорожных водопропускных : ОДМ 218.3.083-2016: изд. на основании распоряжения Федерального дорожного агентства от 15.02.2017 № 255-р. – М. : Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), 2021. – 92 с.

УДК 504.61:625.748

# ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ РЕКОНСТРУКЦИИ ДОРОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ В КОНТЕКСТЕ УСТОЙЧИВОГО АВТОДОРОЖНОГО СЕРВИСА

*М. Ю. НИКИТЕНКО, Е. Д. СТРОЕВ, Е. А. ГУЛЕВИЧ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В условиях роста транспортной активности и стремительного развития дорожной инфраструктуры вопросы устойчивости автодорожного сервиса приобретают особую значимость. Реконструкция автомобильных дорог, как один из ключевых инструментов модернизации транспортной сети, неизбежно сопровождается воздействием на окружающую среду. Нарушение природного баланса, изменение ландшафта, загрязнение атмосферного воздуха и водных ресурсов – всё это формирует спектр экологических последствий, требующих системной оценки.

Современные подходы к проектированию и реконструкции дорожных объектов всё чаще опираются на принципы устойчивого развития, предполагающие баланс между технической эффективностью, социальной приемлемостью и экологической безопасностью. В этом контексте экологическая оценка становится неотъемлемым элементом инженерного анализа, позволяющим интегрировать природоохранные критерии в процесс принятия проектных решений.

Оценка экологических последствий реконструкции автодорожной инфраструктуры требует системного подхода, сочетающего инженерные, экологические и социальные параметры. Методологическая основа исследования базируется на принципах устойчивого развития, нормативных требованиях и современных инструментах анализа воздействия на окружающую среду [1].

Устойчивость автодорожного сервиса в условиях Гомельской области определяется с учётом следующих региональных факторов:

– климатические особенности: высокая влажность, сезонные перепады температур, наличие болотистых участков;

– экологическая чувствительность территорий: близость к охраняемым природным зонам (например, заказник «Выдрица»), лесным массивам и водоёмам;

– социальная структура: преобладание сельских населённых пунктов, высокая зависимость от автодорожной доступности;

– инфраструктурная уязвимость: наличие участков с низким уровнем технической оснащённости и слабой системой водоотведения.

Эти особенности требуют адаптации проектных решений и оценки устойчивости по следующим критериям (таблица 1).

*Таблица 1* – **Критерии оценки устойчивости автодорожного сервиса**

| Критерий | Описание |
|---|---|
| Экологическая устойчивость | Сохранение природных экосистем, снижение загрязнений воздуха и воды |
| Техническая адаптивность | Возможность реконструкции без разрушения природного баланса |
| Социальная приемлемость | Удовлетворение потребностей местного населения, снижение дискомфорта |
| Экономическая эффективность | Рациональное использование ресурсов при минимизации экологических затрат |
| Региональная интеграция | Учёт природных и демографических особенностей Гомельской области |

Для оценки последствий реконструкции в условиях Гомельской области применяются комбинированные методы:

1) качественные методы:

– экологическое картирование: выделение зон с повышенной чувствительностью (болота, леса, водоёмы);

– SWOT-анализ проектных решений: выявление рисков, связанных с нарушением водного режима и биоразнообразия;

– экспертные интервью: сбор мнений специалистов по экологии, дорожному строительству и местных жителей;

– контент-анализ проектной документации: проверка соответствия экологическим нормам и региональным ограничениям;

2) количественные методы:

– расчёт выбросов при строительных работах: моделирование загрязнения воздуха от техники и материалов;

– оценка шумового воздействия: особенно актуальна для участков, проходящих рядом с сельскими школами и больницами;

– геопространственный анализ нарушенных территорий: с использованием геоинформационной системы (ГИС) для оценки площади вмешательства;

– индексы экологической устойчивости: интегральные показатели, учитывающие совокупное воздействие на воздух, воду и почву.

Схема методологического подхода к оценке экологических последствий реконструкции дорожных объектов в условиях Гомельской области представлена на рисунке 1.

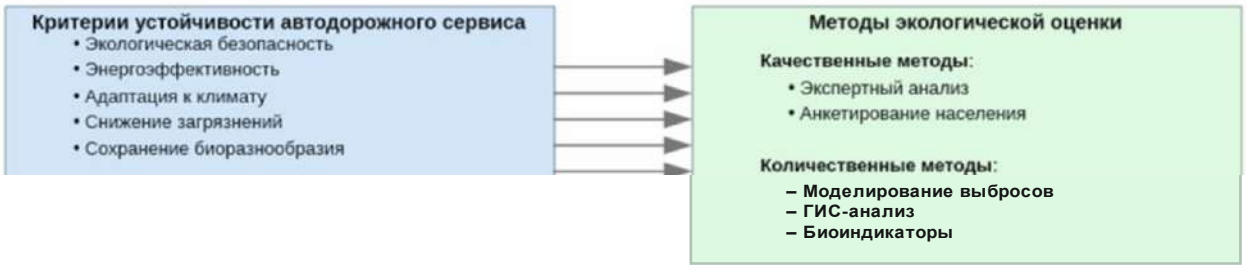



Рисунок 1 – Схема методологического подхода к оценке экологических последствий реконструкции дорожных объектов в условиях Гомельской области

Эффективная экологическая оценка реконструкции дорожных объектов невозможна без применения современных инструментов визуализации и структурирования информации. Они позволяют

не только систематизировать сложные данные, но и представить их в наглядной форме, способствующей принятию обоснованных проектных решений (таблица 2).

*Таблица 2* – **Инструменты визуализации и структурирования данных**

| Инструмент | Назначение | Примеры применения в Гомельской области |
|---|---|---|
| ГИС-технологии | Пространственный анализ зон воздействия, моделирование сценариев реконструкции | Выделение болотистых участков, визуализация близости к охраняемым территориям |
| Таблицы и диаграммы | Представление комплексных индикаторов, сравнение альтернативных решений | Сравнение вариантов покрытия по выбросам, шуму и нарушению экосистем |
| Матричные модели | Сопоставление проектных решений с экологическими последствиями | Оценка влияния типа освещения и водоотведения на загрязнение и биоразнообразие |

Экологическая оценка реконструкции дорожных объектов представляет собой ключевой инструмент обеспечения устойчивости автодорожного сервиса. Она позволяет не только выявить потенциальные риски для окружающей среды, но и интегрировать природоохранные меры в инженерные решения на ранних этапах проектирования. В условиях Гомельской области, где природные ландшафты обладают высокой чувствительностью, а социальная структура требует бережного подхода к инфраструктурным изменениям, экологическая составляющая становится неотъемлемой частью комплексного анализа.

Применение качественных и количественных методов оценки способствует формированию сбалансированных проектных решений, ориентированных на долгосрочную экологическую и социальную устойчивость. Визуализация данных, использование ГИС-технологий и учёт региональных особенностей позволяют повысить точность прогнозов и обоснованность проектных решений [2].

Перспективы дальнейших исследований связаны:

– с разработкой интегральных индексов устойчивости, адаптированных к региональным условиям;

– совершенствованием нормативной базы с учётом междисциплинарного подхода;

– внедрением цифровых платформ для мониторинга экологических последствий в реальном времени;

– расширением участия местных сообществ и экспертов в процессе экологической оценки.

Таким образом, экологическая оценка становится не просто формальной процедурой, а стратегическим инструментом устойчивого развития дорожной инфраструктуры, способствующим гармонизации интересов инженерии, экологии и общества.

**Список литературы**

1 Методические рекомендации по охране окружающей среды при строительстве и реконструкции автомобильных дорог. – М. : Гос. дорож. науч.-исслед. ин-т (Союздорнии), 1999. – 77 с.

2 **Стебеков, Д. Е.** Оценка воздействия экологического риска на окружающую среду при проектировании, строительстве и эксплуатации автомобильных дорог / Д. Е. Стебеков, Н. В. Меллер // StudNet : науч.-образов. журн. студентов и преподавателей. – 2021. – № 3. – Т.4.

УДК 625.174

## ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К СНЕГОЗАДЕРЖАНИЮ НА СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДАХ

*Е. В. НИКИТИН*
*Белорусская железная дорога, г. Гомель*

*П. В. КОВТУН*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В современных экономических реалиях к качеству перевозочного процесса на всех видах транспорта (и в том числе на железной дороге) предъявляются новые, более высокие требования. На первый план выходят пожелания клиентов к сокращению времени нахождения в пути и комфортности поездки при безусловном соблюдении безопасности движения поездов, в том числе и в зимний период. Обеспечение бесперебойного и безопасного движения поездов в зимний период

является критически важной задачей для железных дорог во всем мире. Снег, гололед и метели создают комплекс серьезных рисков, которые необходимо оперативно решать и устранять.

На Белорусской железной дороге к основным особенностям текущего содержания пути в зимний период относятся: выполнение мероприятий по предупреждению заносимости пути и стрелочных переводов снегом во время метелей и снегопадов; необходимость обеспечения нормальной работы централизованных стрелочных переводов в условиях заносимости снегом и обледенения.

Защита железнодорожных путей от снежных заносов осуществляется с помощью стационарных и переносных конструкций, естественных преград и механизированной очистки. К стационарным средствам относятся защитные лесонасаждения и снегозащитные заборы (постоянные и переносные щиты), а к естественным – естественные леса. Механизированные методы включают применение снегоочистительных машин типа СМ-2Б и снегоочистителей двухпутных плужных модернизированных типа СДП-М2, а на станциях применяют ранцевые воздуходувки, пневматическую обдувку и технологический подогрев стрелочных переводов.

Ручная очистка хотя и необходима в критических ситуациях, но все же она является оперативной защитой и ее действие заканчивается сразу, как только место работ переместилось. Она требует мобилизации значительных человеческих ресурсов, подвергает персонал опасности и не может успевать за интенсивными осадками.

Технологический подогрев эффективен непосредственно на стрелочном переводе, но крайне энергозатратен. Сильный ветер, характерный для зимних бурь, значительно снижает его эффективность, выдувая тепло. Кроме того, он бесполезен против снежных заносов на самом пути.

Безопасность в зимний период не может обеспечиваться исключительно оперативными мерами, такими как расчистка уже выпавшего снега. Она требует постоянно активных, инженерных решений, которые предотвращают саму возможность возникновения проблемы снежных заносов. Именно здесь такая технология и конструкция, как аэродинамическая щеточная система, демонстрирует свою стратегическую важность. Она не борется со снегом, а перенаправляет воздушные потоки так, чтобы снег не накапливался в критических зонах стрелочного перевода. Работая в синергии с подогревом, она делает его работу в 4–6 раз эффективнее, обеспечивая безопасность даже в экстремальных условиях.

Аэродинамическая щеточная система представляет собой инженерное решение для пассивной защиты стрелочных переводов от неблагоприятных погодных условий – снежных заносов. Её применение основано на следующих ключевых принципах и преимуществах:

– аэродинамический принцип действия: в отличие от механического удаления снега, система использует энергию ветра, создаваемого движущимся поездом или естественными потоками. Специально расположенные щёточные пучки создают контролируемую турбулентность, которая поднимает воздушный поток над путем. Это формирует аэродинамический поток, уносящий снег за пределы критической зоны стрелочного перевода. Лабораторные испытания в аэродинамической трубе [4, 5] подтвердили эффективность даже при экстремальных углах атаки ветра;

– круглогодичная эксплуатация и долговечность: система не требует сезонного монтажа/демонтажа. Она рассчитана на постоянное нахождение на пути, не мешая проведению контрольных измерений геометрических параметров или механической уборке снега машинами СМ. Мировой опыт показывает, что тестовые установки функционируют, требуя лишь минимального обслуживания.

Аэродинамическая щеточная система позволяет сократить энергопотребление систем электрического обогрева стрелочных переводов. Мировой опыт показывает экономию до 75 % энергии. Это достигается за счет того, что аэродинамический поток формирует воздушные зоны, которые минимизируют охлаждающее воздействие ветра на рельсы и позволяют теплу от обогревателей оставаться в целевой зоне, а не рассеиваться.

Аэродинамическая щеточная система не является экспериментальной разработкой. Это зрелая, проверенная технология, которая предлагает фундаментально иной, аэродинамический подход к решению проблемы. При этом мировой опыт доказывает свою эффективность в течение более чем десяти лет.

Несмотря на более высокие первоначальные затраты по сравнению с простыми методами, система обеспечивает быструю окупаемость за счет: сокращения затрат на электроэнергию для подогрева (до 75 %); снижения расходов на ручной труд и техническое обслуживание; уменьшение слу-

чаев отказов и как следствие уменьшение времени отставания поездов от графика движения, что является критически важным фактором для железной дороги.

Аэродинамическая щеточная система представляет собой перспективное, экономически выгодное и технически обоснованное решение для повышения устойчивости железнодорожной инфраструктуры. Её внедрение становится наиболее целесообразным в условиях снижения укомплектованности кадрами путевого хозяйства, где надежность является абсолютным приоритетом. Система оптимально работает в синергии с традиционным подогревом, превращая его из энергозатратного средства в высокоэффективный инструмент.

Таким образом, инвестиции в современные системы защиты инфраструктуры – это не просто статья расходов, а прямые инвестиции в безопасность, надежность и экономическую эффективность железнодорожных перевозок. Стабильность движения в зимний период является ключевым показателем зрелости и технологического развития транспортной системы любой страны.

**Список литературы**

1 СТП 09150.56.010-2005. Текущее содержание железнодорожного пути. Технические требования и организация работ : утв. приказом Нач. Бел. ж. д. от 29.06.2006 г. № 221Н. – Минск : Бел. ж. д., 2006. – 283 с.

2 СТП БЧ 56.306-2014. Снегоборьба. Порядок организации и проведения : утв. приказом Нач. Бел. ж. д. от 10.12.2014 г. № 1274НЗ. – Минск : Бел. ж. д., 2014. – 75 с.

3 СТП 09150.56.168-2012. Системы принудительной очистки стрелочных переводов. Общие требования и организация технического обслуживания : утв. приказом Нач. Бел. ж. д. от 02.04.2012 г. № 325НЗ. – Минск : Бел. ж. д., 2012.

4 TurbFly Protection – Sand and Snow-free Points on Both Low-Speed and High-Speed Rails // Railway technology. – URL : https://www.railway-technology.com/contractors/overhaul/osborninternational/ (date of access: 08.09.2025).

5 Щётки SnowProtec – система защиты стрелок от снега для обычных и высокоскоростных путей // Инруском. – URL : http://inrail.ru/catalog/50/95 (дата обращения: 08.09.2025).

УДК 625.143.482.033

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА УГОН ОСТРЯКОВ И СЕРДЕЧНИКОВ КРЕСТОВИН НА СКОРОСТНЫХ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДАХ И В УРАВНИТЕЛЬНЫХ СТЫКАХ

*Н. Р. НОСОВ*
*Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва*

На железных дорогах России скоростное движение до 200 км/ч реализовано на полигоне Октябрьской железной дороги. Чтобы реализовать такую скорость, требуется обеспечить укладку бесстыкового пути на всем его протяжении, в том числе на станциях.

Для компенсации удлинений рельсов при работе в разных температурных диапазонах на станциях скоростных линий требуется установка уравнительных стыков совместно с уравнительными пролетами между стрелочными переводами, данные устройства служат для защиты стрелочных переводов от температурного удлинения плетей, а также для охраны подвижных частей стрелочного перевода [2–3]. Стрелочные переводы в свою очередь должны быть вварены в путь. Данные мероприятия по обеспечению безопасности работ на бесстыковом пути можно рассмотреть в рамках работ по техническому обслуживанию пути [1].

Для определения причин, влияющих на угон остряков и сердечников крестовин, а также угон в уравнительных ставках, был осуществлен анализ их работы на полигоне Октябрьской дирекции инфраструктуры. Были проведены выездные замеры контрольных сечений стрелочных переводов и стыков уравнительных на станции Боровенки, наблюдения проходили с августа по декабрь.

Наблюдаемые объекты стрелочных переводов и уравнительных стыков (далее – ВСП) на трех станциях представлены в таблице 1.

*Таблица 1* – **Наблюдаемые объекты ВСП**

| Название | Проект | Количество, шт. |
|---|---|---|
| Уравнительный стык | СП848 | 2 |
| Стрелочный перевод | 2956 | 2 |

В стрелочных переводах проекта 2956 и уравнительных стыках СП848 по проектам используется шурупно-дюбельное скрепление (рисунок 1).

По проведенным замерам были составлены графики зависимостей смещения подвижных частей ВСП от температуры, за точку отсчета был взят промер, совершенный в августе, на определенные места элементов ВСП были нанесены специальные метки для отслеживание смещений. Данные зависимости позволят определить надежность работы элементов ВСП.

**Исследования по ст. Боровенка.** Наблюдаемый температурный диапазон при проведении замеров на рельсах от 25 °С в августе и до –3,7 °С в декабре. Наиболее подробный температурной перепад представлен на рисунке 2.

Рисунок 1 – Узел шурупно-дюбельного скрепления с упругой клеммой Skl

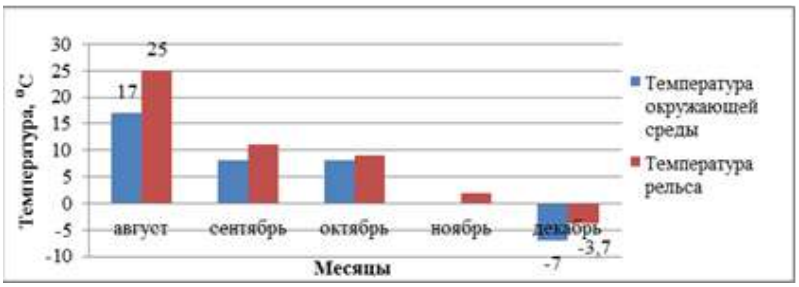



Рисунок 2 – Распределение температур на ст. Боровенка

Для начала рассмотрим смещения на стрелочном переводе № 1 (рисунок 3).

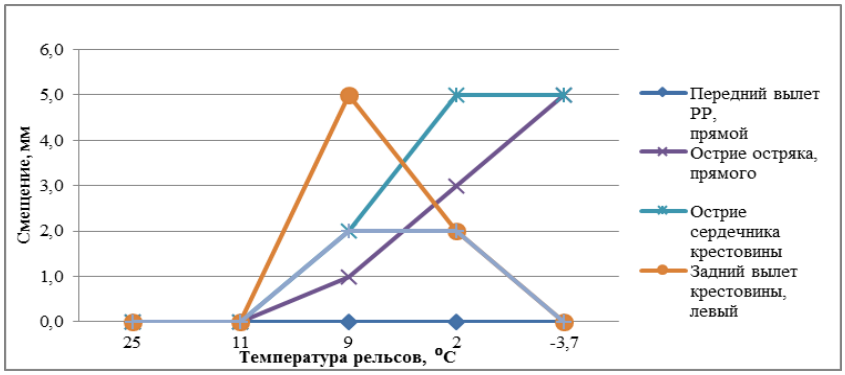



Рисунок 3 – Смещение основных элементов стрелочного перевода № 1 проекта 2956

На стрелочном переводе № 1 выявлен незначительный угон остряков стрелочных переводов и сердечников крестовин с максимальным значением 5 мм. Данные перемещения незначительны и не влияют на безопасность движения.

Рассмотрим смещения от температуры основных элементов стрелочного перевода № 2 (рисунок 4).

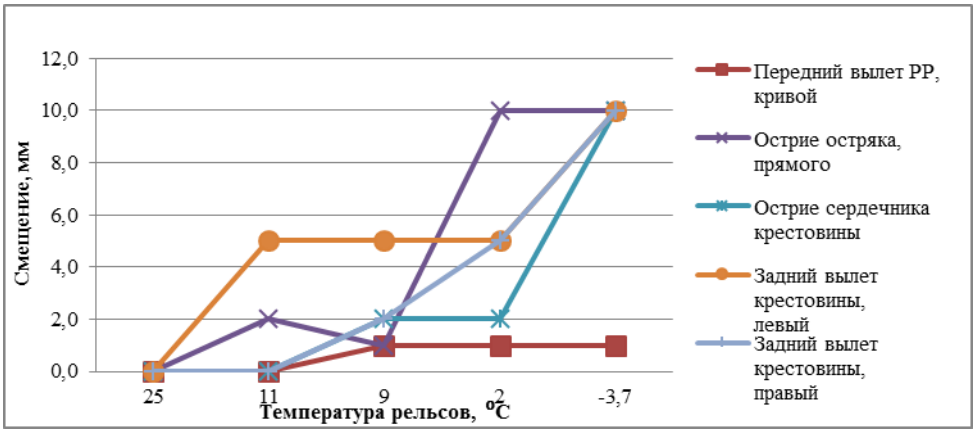



Рисунок 4 – Смещение основных элементов стрелочного перевода № 2 проекта 2956

На стрелочном переводе № 2 наблюдаются колебания роста смещения острия остряка прямого, острия сердечника до 10 мм, резкий прирост заднего вылета крестовины левый, правый до 10 мм.

Далее рассмотрим уравнительный стык № 1 проекта СП848 (рисунок 5).

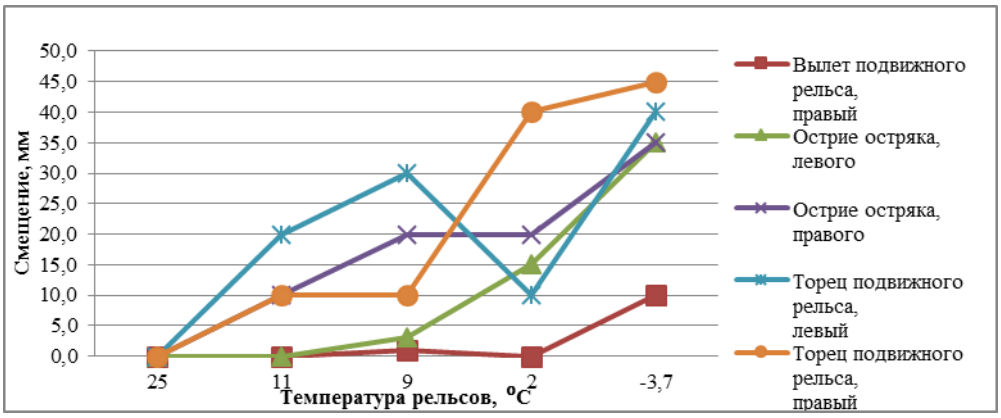



Рисунок 5 – Смещение основных сечений уравнительного стыка № 1 проекта СП848

На уравнительном стыке № 1 наибольшее смещение показал торец подвижного рельса правого до 45 мм. Выявлено значительное смещение остряков, приближающееся к максимальному конструктивному перемещению.

Рассмотрим уравнительный стык № 2 проекта СП848 (рисунок 6).

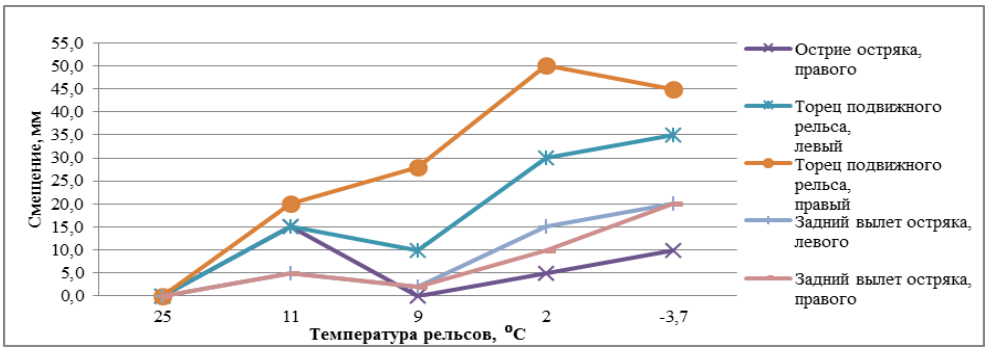



Рисунок 6 – Смещение основных сечений уравнительного стыка № 2 проекта СП848

На уравнительном стыке № 2 наибольшее смещение показал торец подвижного рельса правого до 50 мм. Также прослеживается значительное смещение торца подвижного рельса, приближающееся к максимальному конструктивному перемещению.

**Выявленные неисправности при осмотре элементов стрелочных переводов и уравнительных стыков.** При проведенном осмотре были выявлены схожие по характеру неисправности на всех наблюдаемых объектах ВСП, которые могли бы повлиять на подвижки элементов стрелочных переводов и уравнительных стыков:

– снятие противоугонных элементов стрелочного перевода;

– укладка нескольких шпал с другим видом скреплений;

– неподвижные остряки уравнительного стыка не вварены;

– неподвижные остряки уравнительного стыка вварены с нарушением технологии сварки;

– величина установочного размера между торцами подвижного рельса и остряка менее допускаемой величины по обеим нитям, предположительно из-за нарушения технологии укладки и сварки стыков.

**Выводы по результатам**. Все выявленные причины угона элементов переводов стрелочных и стыков уравнительных можно разбить на две категории:

1 Конструкционные:

– недостаточное максимальное перемещение (±50 мм), заложенное в конструкции стыка уравнительного СП848 для защиты элементов стрелочного перевода;

– недостаточное максимально допустимое восприятие переводными и замыкающими устройствами перемещений рельсовых элементов стрелочного перевода;

– отсутствие возможности скольжения в узлах рельсовых скреплений в заднем вылете подвижного рельса для перемещения свободного конца примыкающей плети.

2 Технологические и эксплуатационные:

– использование разнотипных скреплений, а также нарушение эпюры шпал;

– отсутствие или частичное снятие (вырезка) противоугонных элементов крестовин и остряков стрелочных переводов;

– не все стыки сварены или сварены с нарушением технологии;

– нарушение стыкового зазора, смещение по эпюре вплоть до первого болтового отверстия накладки стыка.

**Список литературы**

1 Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 г. № 2540/р : вступ. в силу 01.07.2017 // КонсультантПлюс.Россия : справ. правовая система (дата обращения : 29.09.2025).

2 ГОСТ 33535-2015. Соединения и пересечения железнодорожный путей. Технические условия (ст. 3.15). – Введ. 29.09.2015. – М. : Стандартинформ, 2015. – 85 с.

3 **Блажко, Л. С.** Требования безопасности к конструкции уравнительного стыка для высокоскоростных железнодорожных линий / Л. С. Блажко, В. Б. Захаров, Е. В. Черняев // Известия ПГУПС. – 2016. – № 4. – С. 443–450.

УДК 625.172

## НОВЫЕ АСПЕКТЫ В СИСТЕМЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПУТИ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ

*В. О. ПЕВЗНЕР, Р. А. БАРОНАЙТЕ, В. О. ШАРОВА*
*Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (АО «ВНИИЖТ»)*
*г. Москва, Российская Федерация*

Создание в России высокоскоростной магистрали со скоростями движения до 400 км/ч неизбежно потребует разработки новых подходов в системе оценки состояния пути и планирования на базе этой оценки работ по техническому обслуживанию пути и ремонтам.

С точки зрения методов оценки состояния пути на высокоскоростных линиях, следует отметить, что за рубежом (согласно европейскому стандарту EN 13848) уже давно оцениваются неровности в диапазонах длин волн D0 (до 3 м), D1 (3–25 м), D2 (25–70 м), D3 (70–200 м), D4 и D5 (до 500 м), причем рекомендуется выполнять оценку и контроль конкретного диапазона в зависимости от скоростей движения:

– диапазон D2(25–70 м) – для скоростей движения 160–250 км/ч;

– диапазон D3(70–200 м) – для скоростей больше 250 км/ч.

На отечественных железных дорогах, в основном, оцениваются отдельные неровности: короткие и средние длиной до 30 м при скоростях движения до 140 км/ч.

Были попытки оценить длинные неровности (в диапазоне длин 70–200 м), но без учета сочетаний длинных и коротких неровностей. Результаты ранее проведенных исследований АО «ВНИИЖТ» показали [1, 2], что именно сочетания различных по длине неровностей и периодичность их повторения в основном оказывают влияние на динамику подвижного состава при высокоскоростном движении.

Также до сих пор отсутствует совместная оценка состояния геометрии рельсовой колеи и состояния конструкции пути, а есть отдельные оценки ГРК и конструкции (по Комплексной оценке состояния пути (КОСП), утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» № 2536р от 14.12.2009 г., и видеоконтролю, согласно распоряжению ЦДИ-283р от 03.04.2021 г.), не увязанные между собой.

Выделение из зарегистрированных вертикальных неровностей их длинноволновой составляющей позволит изучить возможные причины их появления и разработать технические решения по их устранению. Это можно сделать, используя методы спектрального анализа.

Идея применения методов спектрального анализа параметров геометрии рельсовой колеи (далее – ГРК) не нова. Эти методы уже успешно применяются практически на всех ведущих железных дорогах мира, в Европе, США, Японии, Китае и пр. [3]. На них уже не только разработаны методы и средства получения оценок спектральных плотностей мощности (далее – СПМ) для различных параметров ГРК, но и разработаны, утверждены и успешно применяются нормативы на допустимые (максимальные) значения СПМ для различных диапазонов длин неровностей (от 1 до 100 м и более).

Сравнение нормативов, которые применяются для оценки СПМ вертикальных неровностей на скоростных железных дорогах США (класс 6, до 177 км/ч), Китая (до 200 км/ч) и Германии [3], а также построенной в ходе проведенных исследований СПМ вертикальных неровностей для Октябрьской ж. д. (скоростная линия Санкт-Петербург – Москва) позволило установить (рисунок 1), что значения СПМ вертикальных неровностей Октябрьской ж. д. в диапазоне длин волн от 20 м (гармоника № 37) до 95 м (гармоника № 8) находятся на предельных допустимых граничных значениях или превосходят предельные допустимые граничные значения СПМ вертикальных неровностей для железных дорог Германии и США, но не превышают допустимые граничные значений СПМ вертикальных неровностей для железных дорог Китая (для скоростей до 200 км/ч).

Рассмотренный выше пример наглядно демонстрирует дополнительные возможности в оценке состояния железнодорожного пути, которые предоставляют методы спектрального анализа состояния ГРК. Перспективность такого метода анализа очевидна еще и потому, что спектральный анализ позволяет оценить длинноволновые составляющие неровностей, не рассматриваемые при традиционных (амплитудных) методах оценки ГРК для обычных скоростей движения.

Таким образом, учитывая возрастание роли длинных неровностей в оценке показателей взаимодействия пути и подвижного состава с ростом скоростей движения, представляется необходимым:

– разработать дополнения к существующей инструкции по оценке состояния пути на участках со скоростями движения до 250 км/ч;

– для скоростей 250–400 км/ч разработать новую отдельную инструкцию на базе совместной оценки состояния геометрии рельсовой колеи и состояния конструкции пути, а также сочетаний длинных и коротких неровностей, которая должна быть готова до начала эксплуатации новой линии Санкт-Петербург – Москва.

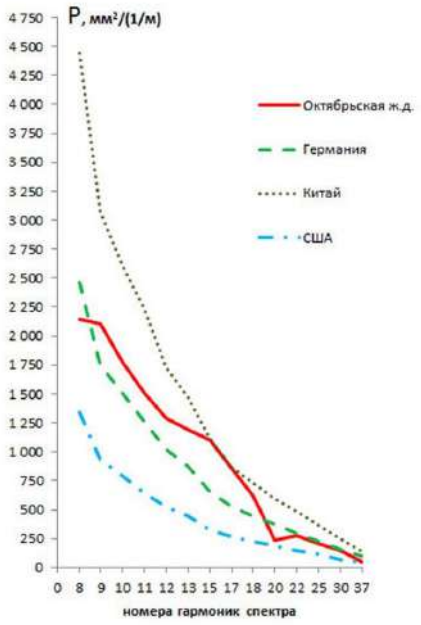



Рисунок 1 – Границы допустимых нормативных значений СПМ вертикальных неровностей для железных дорог США, Китая, Германии и усредненная СПМ для Октябрьской ж. д. (скоростная линия Санкт-Петербург – Москва)

Определение потребности в работах по техническому обслуживанию пути и ремонтам в условиях ВСМ может выполняться на базе численных методов оценки стабильности состояния пути по ГРК и состоянию конструкции верхнего строения пути [4]. Для этого в ходе эксплуатационных наблюдений за состоянием пути в увязке с состоянием конструкции хотя бы на действующей скоростной линии Санкт-Петербург – Москва необходимо определить: какие виды работ можно проводить в рамках текущего содержания пути (на локальных участках), а в каком случае потребуется назначать ремонт на широких фронтах.

Для оценки стабильности безбалластного пути в условиях высокоскоростного движения на первом этапе может быть использован способ, основанный на оценке динамики изменения во времени (по тоннажу) площадей спектров неровностей в различных диапазонах длин. Критерием оценки стабильности при таком подходе будет служить интенсивность изменения площадей спектров неровностей различной длины во времени (по тоннажу). Для получения численных значений таких критериев необходимо провести комплексные исследования по оценке влияния параметров неровностей пути, включая их амплитуды и длины, на участке пути и интенсивности их изменения в увязке с показателями динамики подвижного состава.

Разработки новых подходов потребует также порядок организации работ по техническому обслуживанию пути в условиях высокоскоростной магистрали (ВСМ).

Зарубежный опыт организации работ на ВСМ основан на главном тезисе – выход работников на путь во время движения высокоскоростных поездов запрещен.

Поэтому, основываясь на отечественном (на базе разработанных в АО «ВНИИЖТ» Инструкций МПС ЦП-3075, ЦП-4402, Инструкции № 2540р, утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 14 декабря 2016 г.) и зарубежном опыте, можно констатировать:

1 Для основных работ, которые будут проводиться в ночные «глухие окна», требования по безопасности движения при производстве путевых работ должны соответствовать требованиям Инструкции № 2540р, т. к. движение хозяйственных поездов будет с обычными скоростями.

2 При необходимости проведения аварийных (неотложных) работ движение высокоскоростных поездов должно останавливаться на время производства работ.

3 В случае неполного выполнения работ в «окно» и в период обкатки пути потребуется разработка требований по безопасности движения и требований к состоянию пути для открытия движения с заданными скоростями.

Для увеличения производительности в «окно» перспективным вариантом организации работ по техническому обслуживанию пути на высокоскоростной линии может являться порядок организации работ в «плавающие окна» (когда ночное «окно» начинается не в фиксированные временные интервалы, а сразу после скрещения двух последних поездов с постепенным открытием «окна» по мере их удаления друг от друга.

Такой подход позволит увеличить протяженность ремонтируемого пути в одно «окно».

**Список литературы**

1 Дополнительные факторы, влияющие на плавность хода скоростных и высокоскоростных поездов / А. А. Гришан, В. О. Певзнер, Т. И. Громова [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2023. – № 12. – С. 2–5.

2 Современные подходы к разработке нормативов геометрии рельсовой колеи для устройства и содержания ВСЖМ-1 / А. И. Чечельницкий, В. О. Певзнер, Р. А. Баронайте, В. О. Шарова // Путь и путевое хозяйство. – 2025. – № 9. – С. 2–4.

3 Measurement and Characterization of Track Geometry Data: Literature Review and Recommendations for Processing FRA ATIP Program Data. – URL : https://railroads.dot.gov/elibrary/measurement-and-characterization-track-geometry-data-literature-review-and-recommendations (date of access: 26.01.2025).

4 **Певзнер, В. О.** Совершенствование системы технического обслуживания пути / В. О. Певзнер, Р. А. Баронайте // Путь и путевое хозяйство. – 2025. – № 4. – С. 6–9.

УДК 625.7/.8

## ОБЗОР ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЯМОЧНОГО РЕМОНТА АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ НА ДВОРОВЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

*В. В. ПЕТРУСЕВИЧ, В. В. ТОМАШОВ, К. Д. ДАШУК, Я. М. ГРИЩЕНКОВ, В. С. КОВАЛЕНКО*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В Республике Беларусь, а также за рубежом имеется значительное количество научно-исследовательских работ и технологических решений по устранению дефектов асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог [1–4].

При этом на автомобильных дорогах высших категорий имеется определенная периодичность данных мероприятий, которая определена нормативными правовыми актами. Более насущным данный вопрос является для асфальтобетонных проездов в жилой застройке, где периодичность ремонтов не всегда соблюдается и возможны технологические нарушения целостности асфальтобетонного покрытия ввиду проведения различных строительно-восстановительных работ, необходимых для жизнеобеспечения населения.

Технологические особенности проведения ямочного ремонта асфальтобетонных покрытий рассмотрены в [5–8] и осуществляются по одной из основных технологий (таблица 1).

При установившейся среднесуточной температуре воздуха +5 ºС для выполнения ямочного ремонта асфальтобетонных покрытий в Республике Беларусь используют асфальтобетонные смеси по СТБ 1033 (с применением вязких битумов по ГОСТ 22245, СТБ 1062 или СТБ EN 12591 и жидких битумов по ГОСТ 11955), складируемые органоминеральные смеси по СТБ 2175, материалы струйно-инъекционной технологии.

*Таблица 1* – **Характеристики технологий для выполнения ямочного ремонта асфальтобетонных покрытий**

| Наименование технологии | Применяемые материалы | Технологическая последовательность |
|---|---|---|
| Ямочный ремонт уплотняемыми смесями | 1 Смеси асфальтобетонные плотные горячие и теплые по СТБ 1033: (горячие марки I, II, III с использованием вязких битумов с глубиной проникания иглы при 25 ºС от 50 до 130 мм – 1; теплые марки II с использованием вязких битумов с глубиной проникания иглы при 25 ºС от 70 до 300 мм – 1 и от 130 до 300 мм – 1 )<br>2 Складируемые органоминеральные смеси по СТБ 2175.<br>3 Эмульсионно-минеральные складируемые смеси по СТБ 1509 | 1 Подготовительные работы (установка технических средств организации дорожного движения (далее – ТСОДД), очистка дорожного покрытия).<br>2 Устройство «карт».<br>3 Укладка смеси в «карту».<br>4 Уплотнение смеси.<br>5 Герметизация мест сопряжения.<br>6 Заключительные работы (уборка мусора, снятие ТСОДД) |
| Ямочный ремонт литыми асфальтобетонными смесями | Битумоминеральные литые смеси по СТБ 1257 | 1 Подготовительные работы (установка ТСОДД, очистка дорожного покрытия).<br>2 Устройство «карт».<br>3 Укладка смеси.<br>4 Уплотнение смеси.<br>5 Заключительные работы (уборка мусора, снятие ТСОДД) |
| Ямочный ремонт рециклированными асфальтобетонными смесями | Рециклированные асфальтобетонные плотные горячие и теплые по СТБ 1033, складируемые органоминеральные смеси по СТБ 2175, эмульсионно-минеральные складируемые смеси по СТБ 1509, битумоминеральные литые смеси по СТБ 1257 | 1 Подготовительные работы (установка ТСОДД, очистка дорожного покрытия).<br>2 Устройство «карт».<br>3 Приготовление смеси.<br>4 Укладка смеси.<br>5 Уплотнение смеси.<br>6 Герметизация мест сопряжения.<br>7 Заключительные работы (уборка мусора, снятие ТСОДД) |
| Ямочный ремонт по способу пропитки | Смеси, укладываемые по способу пропитки (щебень по ГОСТ 8267, битумная эмульсия ЭБКД-Б-65 или ЭБКД-Б-70 по СТБ 1245) | 1 Установка ТСОДД.<br>2 Очистка выбоины.<br>3 Грунтовка выбоины.<br>4 Укладка щебня.<br>5 Уплотнение щебня.<br>6 Розлив эмульсии.<br>7 Устройство защитного слоя.<br>8 Заключительные работы (уборка мусора, снятие ТСОДД) |
| Ямочный ремонт по струйно-инъекционной технологии | Материалы струйно-инъекционной технологии (щебень по ГОСТ 8267, битумная эмульсия ЭБКД-Б-65, ЭБКД-Б-70 или ЭБКД-С-64 по СТБ 1245) | 1 Установка ТСОДД.<br>2 Очистка выбоины.<br>3 Грунтовка выбоины.<br>4 Укладка смеси.<br>5 Заключительные работы (уборка незакрепившегося материала, снятие ТСОДД) |

Из достоинств рассмотренных технологических вариантов в таблице 1 можно выделить их низкую стоимость и доступность проведения ремонтов асфальтобетонного покрытия, но использование их возможно при температуре воздуха до +5 ºС и при сухом покрытии.

Для решения задачи проведения ямочного ремонта асфальтобетонного покрытия в осенне-зимне-весенний период при температуре воздуха ниже +5 ºС применяют материалы и технологии, представленные в таблице 2.

*Таблица 2* – **Смеси для ямочного ремонта в весенне-зимний период**

| Материалы и технологии | Температура воздуха, ºС, не ниже |
|---|---|
| Складируемые органоминеральные смеси по СТБ 2175 | –20 |
| Битумоминеральные смеси по СТБ 1257 литые | –20 |
| Рециклированные горячие смеси плотные и литые | –20 |
| Материалы струйно-инъекционной технологии | +5 |
| Эмульсионно-минеральные складируемые смеси по СТБ 1509 | –5 |
| Смеси, укладываемые способом пропитки | +5 |
| Асфальтобетонные смеси по СТБ 1033 | –10 |

**Список литературы**

1 **Полякова, С. В.** Выбор основных технологий ямочного ремонта выбоин в асфальтобетонных покрытиях при неблагоприятных условиях / С. В. Полякова // Дороги и мосты. – 2021. – № 2. – С. 77–94.

2 Surface modified slag fiber reinforced asphalt mixture: enhancement of pavement performance and field validation / F. Mingen, C. Qingbing, W. Weijian [et al.] // Case Studies in Construction Materials. – 2025. – № 22. – DOI : 10.1016/j.cscm.2025.e040505.

3 Отечественный и зарубежный опыт. Материалы и технологии для ремонта выбоин дорожного асфальтобетонного покрытия: информационный сборник / С. В. Полякова, А. В. Чванов, А. С. Козин, Ю. В. Тактарова ; М-во трансп. Рос. Федерации, Рос. дорожный науч.-исслед. ин-т. – Казань : Бук, 2020. – 134 с.

4 **Ярмолинский, В. А.** Оптимизация выбора метода ремонта асфальтобетонных покрытий / В. А. Ярмолинский, Ю. Н. Лебедева, В. С. Белоконь // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2020. – № 4 (94). – С. 10–12.

5 **Ярмолинский, В. А.** Применение холодных асфальтобетонных смесей при ямочном ремонте дорожных покрытий / В. А. Ярмолинский, А. А. Парфенов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2022. – № 2. – С. 101–107.

6 **Братчун, В. И.** Литые асфальтобетоны повышенной долговечности, скоростной ямочный ремонт дорожных покрытий / В. И. Братчун, О. А. Пшеничных, В. В. Ремнев // Технологии бетонов. – 2024. – № 5. – С. 41–46.

7 **Аминов, Ш. Х.** Применение холодных асфальтобетонных смесей для круглогодичного ямочного ремонта автодорог / Ш. Х. Аминов, И. Б. Струговец // Строительные материалы. – 2006. – № 11. – С. 60–62.

8 **Александров, Д. Ю.** Содержание дорожных одежд : учеб.-метод. пособие для дипломного проектирования и выполнения расчетно-графических работ по дисциплине «Содержание и ремонт транспортных сооружений» / Д. Ю. Александров ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2017. – 35 с.

УДК 614.84

# ДОРОЖНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА И «ЗЕЛЁНЫЕ» ЭЛЕМЕНТЫ КАК ФАКТОР ЗАМЕДЛЕНИЯ РЕАГИРОВАНИЯ ПОЖАРНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ

*Д. Б. РАХИМОВ*

*Андижанский государственный технический институт, Республика Узбекистан*

Статья отражает результаты полевого и кабинетного исследования влияния инфраструктурных решений «успокоения движения» и озеленения (рядовые посадки деревьев, разделительные полосы, высокие бордюры, островки безопасности, неровности) на доступ пожарной и спасательной техники. Анализ выполнен на нормативной базе РФ и Республики Беларусь и дополняется авторскими замерами времени отклика на уличных маршрутах. Показано, что непрерывные зелёные кромки, «глухие» медианы с высокими бортами и нерациональная расстановка искусственных неровностей системно сокращают эффективную ширину проезда и добавляют к времени прибытия 12–60 с на километр в квартальной уличной сети. Предложены конструктивные «зелёные, но проездные» решения, совместимые с требованиями СП/ТКП/СН. Основания – действующие нормы (СП 4.13130, ППР РФ № 1479; ТКП 45-2.02-315-2018; СН 3.03.06-2022; ГОСТ Р 52605-2006) и сопоставление с эмпирическими оценками задержек от неровностей [1–5].

При пожаре и иных чрезвычайных ситуациях первыми «узкими местами» становятся не только здание и техника, но и сама улица: насколько быстро и безопасно пожарная машина сможет подойти, развернуться, установить автолестницу, развернуть рукавные линии. Российские и белорусские нормы прямо требуют обеспечивать подъезды и площадки, запрещая их загромождение; на практике же благоустройство последних лет – непрерывные зелёные полосы, деревья «в линию», высокие бордюры и «тяжёлые» островки – часто вступают в конфликт с коридором реагирования. В РФ запрет на перекрытие пожарных проездов предметами благоустройства и посадками крупномерных деревьев закреплён в Правилах противопожарного режима (ППР РФ № 1479). Нормы отдельно предписывают автоматическую разблокировку шлагбаумов и ворот на проездах при пожаре [2].

**Цель работы** – количественно и качественно оценить, как именно зелёные насаждения, бордюры и элементы «успокоения» трафика затрудняют подъезд и работу пожарной/спасательной техники в условиях российских и белорусских городов, и какими инженерными решениями эту проблему можно устранить, не «обнуляя» экологический эффект озеленения.

**Результаты**. Узкая «зелёная кромка» + высокий борт = эффективная ширина падает. Даже при формальном соблюдении «геометрии» улицы непрерывные насаждения с высоким бортом (обычно 12–15 см) вдоль проезжей части уменьшают эффективную ширину коридора: пожарные избегают наездов на высокий борт из-за риска повреждения колёс/навески, а кроны/штамб вынуждают отклоняться внутрь полосы. В дворовых проездах это даёт –0,4…–0,8 м от «рабочей» ширины.

Рядовая посадка деревьев в зоне работы автолестниц: в обоих городах зафиксированы фасады с «зелёной стеной» на расстоянии 4–8 м от стены – в прямом противоречии с требованиями доступа автолестниц и запретом «рядовой посадки» в этих зонах [3]. «Глухие» медианы и островки без технологических разрывов: разделительные полосы без наездных бортов и без прерывистых «окошек» фактически запирают манёвр крупногабаритной техники на перекрёстках и кривых, особенно когда на медиане стоят деревья. Условия видимости и возможность объехать затор/припаркованный автомобиль резко падают – это противоречит логике требований СН 3.03.06-2022 к проектированию улиц с учётом всех участников движения (включая спецтехнику) и узлам сопряжения борта на переходах [4]. Тупики без разворотной площадки нормативного размера. В РФ требуется минимум 15 × 15 м, в РБ – 12 × 12 м; отсутствие площадки добавляет 20–60 секунд на манёвр задним ходом с перестановкой. Требование прямо прописано в СП 4.13130 и ТКП 45-2.02-315-2018 [1, 3].

*Искусственные неровности на приоритетных маршрутах*. Наши замеры показали среднюю прибавку 3–6 с на одну неровность для «тяжёлого» шасси; последовательность из 4–6 устройств даёт +15–35 с на коротком квартальном перегоне. Эти оценки согласуются с независимыми тестами (округ Монтгомери, FHWA: 2,8–7,3 с/неровность). Следовательно, размещать «лежачие» на маршрутах к объектам с массовым пребыванием людей (школы, ТЦ, поликлиники) без альтернативных обходов нецелесообразно.

**Обсуждение.** *Коридор реагирования* – явный слой в задании. Для каждой улицы/дворовой территории, где по нормам предусмотрен подъезд пожарного автомобиля (ПА), в проектном задании фиксируется непрерывный коридор: ширина проезжей части + габариты манёвра + «зона установки» автолестницы (по СП/ТКП). Вдоль фасадов с автолестницами – запрет рядовой посадки деревьев и ограждений в пределах 5–8 м, в Российской Федерации и Республике Беларусь – это прямо следует из СП 4.13130 и ТКП 45-2.02-315-2018 [1, 3]. *Наездные медианы и «зелёные окна»*. Если разделительная полоса нужна (экология/безопасность), выполняем её наездной: скос борта, усиленная кромка, технологические разрывы каждые 50–80 м (и у узлов), которые визуально читаются и позволяют ПА объезжать препятствия. *Узлы сопряжения с пониженным бортом и «зелёной зоной»* – по типовым решениям СН 3.03.06-2022 [4]. *Деревья партиями, не «стеной».* Вместо рядовой посадки – группы с шагом, исключающим перекрытие кронами зоны установки автолестницы, и с контролем высоты штамба. Это позволяет сохранять тень/дренаж и не «закрывать» фасад там, где должны встать ПА. *Бордюр* – низкий/скошенный на «пожарных маршрутах». Высокие бортовые камни у «коридоров реагирования» заменяются на скошенные/пониженные вставки в створе потенциального манёвра и на подходах к гидрантам. В местах «зелёного окна» – усиление основания (решётки/армирование дерна), чтобы машина могла безопасно съехать с асфальта без повреждения. Узлы переходов с «зелёной зоной» допускаются конструктивно по СН 3.03.06-2022 [4]. *Тупики – площадка и гидрант*. В РФ: 15 × 15 м, Республике Беларусь: 12 × 12 м, с расчётом дорожной одежды «под ПА» и установкой гидранта на площадке (требование ТКП). *Подъезд к воде* – по СП [3, 1]. Вертикальные дефлекторы – выборочно. На приоритетных маршрутах реагирования – отказ от «лежачих» или замена на приподнятые пересечения/платформы либо спид-кушоны (колейные прорези под широкую колею ПА), что снижает задержки и сохраняет эффект для легковых. ГОСТ Р 52605-2006 допускает применение искусственной неровности как технического средства организации дорожного движения при соблюдении правил установки; зарубежные тесты подтверждают, что форм-фактор неровности критичен к задержкам [5]. *Количественная оценка эффекта* (по нашим данным). На уличных маршрутах длиной 1,4–2,1 км с 4–6 неровностями средняя прибавка ко времени отклика составила +22–33 с. Замена трёх стандартных «лежачих» на одну приподнятую платформу на перекрёстке сократила задержку на ≈11–15 с без ухудшения скоростного режима для легковых. Устранение «глухой» медианы (вставка двух разрывов и скосов борта) улучшило доступ к дворовому проезду: 18–25 с к манёвру и исключило риск «запирания» автолестницы. Корректировка зелёной полосы (разрыв кромки + перенос одной группы деревьев) восстановила требуемый коридор установки автолестницы (5–8 м к фасаду) – теперь соответствует ТКП/СП [3, 1].

Современное озеленение и «успокоение» трафика можно совместить с бесперебойным доступом пожарно-спасательной техники. Нужно – проектировать коридор реагирования как первичный слой, а зелёные/бордюрные элементы как вторичный, подчинённый этому слою, с наездными/прерывистыми решениями и исключением рядовой посадки на полосе работы автолестниц. Это соответствует действующим требованиям СП/ТКП/СН и даёт измеримый выигрыш во времени отклика без отказа от «зелёности» города [1, 3, 4].

**Список литературы**


1 СП 4.13130.2013. Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объёмно-планировочным и конструктивным решениям (с изм. и доп.). – Введ. 24.06.2013. – М. : Минстрой России, 2013. – 86 с.

2 Правила противопожарного режима в Российской Федерации : постановление Правительства РФ от 16.09.2020 № 1479 (ред. действ.) // КонсультантПлюс.Россия : справ. правовая система (дата обращения : 02.10.2025).

3 ТКП 45-2.02-315-2018 (02250). Здания и сооружения. Пожарная безопасность. Обеспечение подъездов и подъездных путей для пожарной техники. – Минск : Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2018.

4 СН 3.03.06-2022. Улицы населённых пунктов. Нормы проектирования. – Введ. 25.03.2022. – Минск : Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2022. – 56 с.

5 ГОСТ Р 52605-2006. Технические средства организации дорожного движения. Искусственные неровности. Технические требования и правила применения. – Введ. 01.01.2008. – М. : Стандартинформ, 2007. – 14 с.


УДК 625.03

## ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННЫХ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ


*В. В. РОМАНЕНКО*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*


Современные исследования в различных областях требуют применения сложных математических моделей, а также численных методов их решения. Для возможности оценки их корректности и надежности необходима верификация этих методов.

Верификация – это процесс проверки правильности и достоверности данных, моделей и методов. В контексте математических исследований и численных методов верификация предполагает оценку их точности и адекватности описываемым моделям, может включать:

– для простых случаев – сравнение результатов с аналитическими решениями;

– тестирование или экспериментальные исследования на натурных образцах;

– оценку погрешностей результатов и устойчивости методов.

Математические методы исследования представляют собой аналитические подходы, основанные на теоретических основах, например, при оценке надежности конструкции на растяжение в соединении элементов используют методы, основанные на физических и математических закономерностях, применяемых в строительной механике.

Так, например, методика исследования составной конструкции (составных деревянных шпал (СДШ) [1]) базируется на методе математического анализа, который учитывает все аспекты, влияющие на прочность и надежность конструкций, включает в себя свойства материалов, режимы эксплуатации и влияние внешних факторов [2]. Целью является получение оптимальных расчетных параметров элементов СДШ на основании анализа конструкции на статическую устойчивость с расчетом напряжений и изгибающих моментов согласно условию

$$\sigma_{t.o.d} \leq f_{t.o.d}, \tag{1}$$

где $\sigma_{t.o.d}$ – напряжение растяжения вдоль волокон древесины, кН; $f_{t.o.d}$ – сопротивление древесины растяжению вдоль волокон, кН.

Принципы математического моделирования и расчета позволяют спроектировать поведение конструкции с учетом множества факторов, таких как: назначение конструкции и особенности ее работы, условия эксплуатации, состав, свойства и особенности применяемых материалов, форму и размеры элементов и деталей конструкций (рисунок 1).

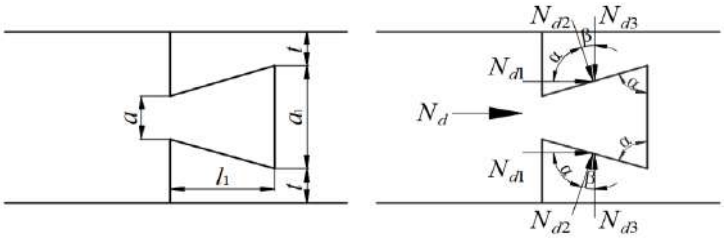



Рисунок 1 – Схема определения размеров соединения элементов в зависимости от приложенной нагрузки

Численные методы, в отличие от аналитических, реализуются с помощью алгоритмов и позволяют находить приближенные решения. Они широко используются в инвентаризации и при испытаниях образцов, особенно когда точное решение недоступно или имеется множество вариантов [3]. Имитационное моделирование может быть проведено методом конечных элементов (МКЭ), основанным на оценке предельных состояний и деформаций под воздействием внешних факторов, например, с применением численных алгоритмов CAD-системы Autodesk Inventor.

Численный метод позволяет создавать адаптивные модели СДШ, параметры которых можно изменять с учетом различных условий и требований, например, размеры поперечного сечения конструкции, величину нагрузки.

По заданным параметрам модели (размеры, материал, геометрия и нагрузка) создается сетка, которая разбивает модель на множество элементов. Это обеспечивает более точные результаты по сравнению с другими способами моделирования. Затем выполняется анализ, по результатам которого получаются напряжения по всем элементам. Формируются трехмерные напряжения и деформации в различных направлениях *XX*, *YY* и *ZZ*, на их основании определяется эквивалентное напряжение – напряжение по фон Мизесу (рисунок 2).

Оценка распределения напряжений и определение потенциальных мест возникновения дефектов выполняется по визуализированным схемам сборок, основываясь на предположении, что материал повреждается в тех местах, где напряжения равны предельному значению, а именно пределу прочности на растяжение. Таким образом, возможно исследовать значительный вариативный ряд моделей без изготовления натурных образцов.

Основная задача шпал – обеспечение стабильности ширины рельсовой колеи. Для железнодорожных путей, где обращается подвижной состав со скоростью движения поездов до 25 км/ч, ширина колеи должна составлять от 1512 до 1526 мм. При превышении данных показателей – движение поездов должно быть прекращено. Определение величины изменения ширины колеи возможно выполнить при экспериментальных исследованиях, которые позволят верифицировать результаты математического и численного исследования.

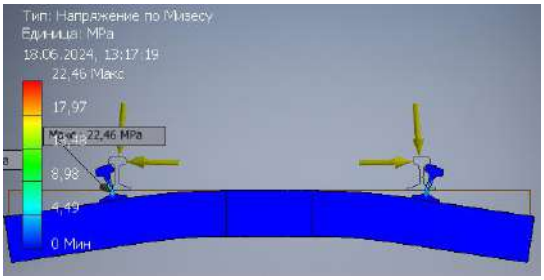



Рисунок 2 – Результаты численного моделирования

Подобные испытания проводятся на натурных образцах, с применением специального оборудования (рисунок 3).

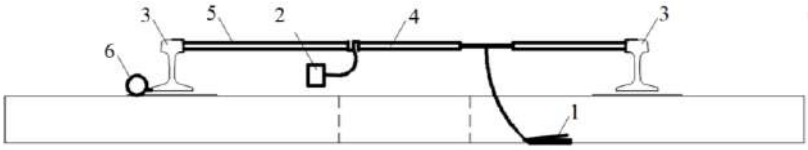



Рисунок 3 – Схема проведения экспериментального исследования:
*1* – насос ручной гидравлический; *2* – тензометрический датчик силы; *3* – рельсовые упоры;
*4* – промежуточные вставки; *5* – горизонтальная штанга; *6* – стойка индикаторная и индикатор

Подобные испытания проводятся с целью исследования реакции материалов и определения реального поведения изделия под нагрузкой.

Таким образом, если результаты математического и имитационного моделирования подтверждаются экспериментальными данными, можно утверждать об объективности разработанной модели и возможности ее изготовления и эксплуатации.

**Список литературы**

1 **Романенко, В. В.** Ресурсосберегающая технология изготовления составных деревянных шпал / В. В. Романенко, А. Б. Невзорова // Труды БГТУ. Серия 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2023. – № 2 (270). – С. 143–151.

2 **Дунаев, В. Ф**. Лесопиление: от геометрии к физике, механике и технологии / В. Ф. Дунаев // Лесной журнал. Серия: Механическая обработка древесины и древесиноведение. – 2008. – № 1. – С. 90–100.

3 **Божелко, И. К.** Физико-механические свойства комбинированных деревянных шпал / И. К. Божелко // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2018. – № 2 (210). – С. 211–217.

УДК 625.142

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ УЗЛОВ СОЕДИНЕНИЯ СОСТАВНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ ШПАЛ

*В. В. РОМАНЕНКО*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Правильное определение оптимальных размеров узлов соединения составных конструкций является основанием для обеспечения их надежности, долговечности и экономической эффективности. Учитывая нагрузки, характеристики материала и использование современных методов анализа, можно спрогнозировать эксплуатационные показатели и сократить затраты на техническое обслуживание.

Увеличение длины брусьев, находящихся в горизонтальном положении, называется сращиванием. В этом процессе брусья соединяются друг с другом на торцах, которые могут быть обрезаны под прямым углом или под углом. На месте соединения концы брусьев могут накладываться наклонно и фиксироваться с помощью нагелей или гвоздей, обеспечивая дополнительную жесткость стыка. При разработке технологических схем для составных шпал важно учитывать не только длину оставшихся частей брусьев, но и условия их эксплуатации, места приложения нагрузки, а также конструктивные особенности других элементов пути [1].

Сращивание выполняется на опоре, которая поддерживает конструкцию по всей ее длине. В случае исследования составных деревянных шпал (СДШ) опорой служит балластная призма, обеспечивающая равномерное распределение нагрузки по основанию шпалы.

Основной задачей в деле выбора конструкции для изготовления является разработка вариативного ряда моделей с различными параметрами для определения оптимальных размеров соединения (сращивания). Данные получаются в результате математического анализа и обрабатываются с использованием методов математической статистики [2].

Размеры поперечного сечения можно принять в случае, если расчетные напряжения растяжения вдоль волокон древесины $\sigma_{t.o.d}$ не превышают сопротивление древесины растяжению вдоль волокон $f_{t.o.d}$. Расчетные напряжения

$$\sigma_{t.o.d} = \frac{N_d}{A_{net}}, \tag{1}$$

где $N_d$ – продольная сила, кН; $A_{net}$ – площадь поперечного сечения элемента нетто, м$^2$,

$$A_{net} = bh, \tag{2}$$

$b$ – ширина сечения, мм; $h$ – высота сечения, мм.

Принципы математического моделирования позволяют спроектировать поведение СДШ с учетом множества факторов, таких как: назначение конструкции, особенности ее работы под нагрузкой, условия эксплуатации, свойства и особенности применяемых материалов, форма и размеры элементов конструкции [3].

Конструктивные размеры частей СДШ необходимо принять согласно размерам поперечного сечения стандартных шпал I, II и III типов. Структурные и качественные свойства древесины учитываются сортностью (1, 2 и 3 сорта) и классностью условий эксплуатации изделия и прочности древесины. Для расчета принимается 3-й класс эксплуатации, так как шпалы являются конструкцией, предполагающей эксплуатацию в условиях, не защищенных от осадков, и находящейся в контакте с балластом (грунтом). Механические свойства пиломатериалов учитываются классами прочности: древесина сорта 1 соответствует классу С27, сорта 2 – классу С24 и сорта 3 – классу С16.

Расчетное сопротивление древесины определяется по формуле

$$f_{t.o.d} = f_{t.o.k}\frac{k_{sys}k_h k_{mod}}{\gamma_м}, \tag{3}$$

где $f_{t.o.k}$ – характеристическое значение прочности древесины при растяжении вдоль волокон; $k_{sys}$ – коэффициент, учитывающий изменение прочности материала в элементах системы, соединенных посредством клея или механических связей; $k_h$ – коэффициент, учитывающий изменение прочности древесины при растяжении вдоль волокон в зависимости от высоты поперечного сечения по отношению к стандартной высоте; $k_{mod}$ – коэффициент модификации (приведения), учитывающий изменение прочности древесины или материала на ее основе в зависимости от продолжительности действия нагрузки и условий эксплуатации; $\gamma_м$ – частный коэффициент для свойств материалов и изделий, учитывающий погрешности модели и отклонения размеров.

Анализ вариантов состоит из последовательных этапов, включающих формальные и неформальные процессы. Для проведения анализа разработан системный подход, который позволяет построить процесс исследований напряженно-деформированного состояния составной конструкции в виде шаговых процедур, наиболее эффективно ведущих к достижению поставленной цели (рисунок 1).

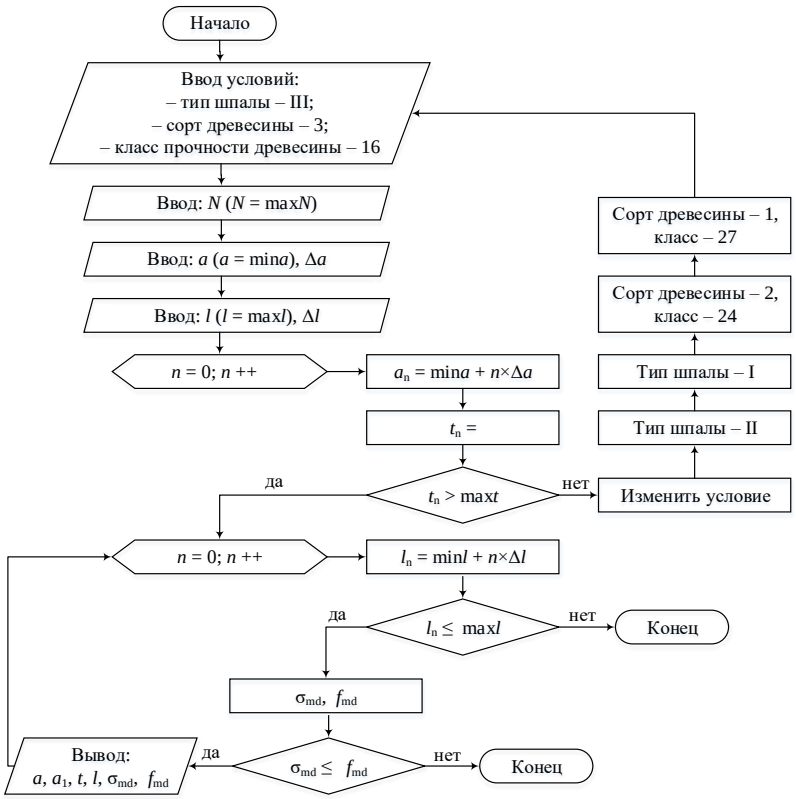



Рисунок 1 – Алгоритм проверки надежности соединения элементов на прочность СДШ

**Список литературы**

1 **Глебов, И. Т.** Физика древесины : учеб. пособие / И Т. Глебов. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2018. – 80 с.

2 **Дунаев, В. Ф.** Лесопиление: от геометрии к физике, механике и технологии / В. Ф. Дунаев // Лесной журнал. Серия: Механическая обработка древесины и древесиноведение. – 2008. – № 1. – С. 90–100.

3 **Арискин, М. В.** Проблемы моделирования деревянных конструкций / М. В. Арискин, М. С. Загарина // Вестник магистратуры. – 2014. – № 11–1 (38). – С. 82–87.

УДК 625.151

# СРАВНЕНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СТРЕЛОЧНОГО ПЕРЕВОДА НА ЖЕЛЕЗОБЕТОННОМ И ДЕРЕВЯННОМ ОСНОВАНИЯХ

*В. В. РОМАНЕНКО*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

*Е. А. ГОРБАНЬ, И. М. ВОЛКОВ*
*Белорусская железная дорога, г. Минск*

Долговечность, надежность и экономическая эффективность стрелочного перевода во многом зависят от материала основания, на котором он уложен.

Железобетонные основания, как правило, имеют срок службы порядка 35 лет при соблюдении всех эксплуатационных норм. Они более устойчивы к коррозии и механическим повреждениям. На такую конструкцию грузонапряженные участки и климатические изменения оказывают меньшее влияние.

Напротив, деревянное основание, в зависимости от условий эксплуатации, может прослужить всего 6–8 лет. Древесина поддается гниению и другим внешним факторам, что значительно сокращает ее долговечность.

Благодаря высокой прочности, железобетон более надежен в эксплуатационных условиях, а деревянные основания менее стабильно реагируют на нагрузки, так как с течением времени они быстро деформируются. Важным моментом является высокая вероятность частых ремонтов и технического обслуживания.

Жизненный цикл стрелочного перевода включает в себя несколько этапов: укладку, эксплуатацию, техническое обслуживание и демонтаж, каждый из которых может значительно варьироваться по времени в зависимости от типа основания.

Все эксплуатируемые в пути стрелочные переводы на деревянном основании имеют значительную разницу в сроке службы брусьев и металлических частей. Несколько раз за жизненный цикл они имеют негодное для эксплуатации подрельсовое основание и металлические элементы, состояние которых удовлетворяет требованиям для II группы годности [1].

Поэтому одной из задач путевого хозяйства является упорядочение сроков службы элементов верхнего строения пути между собой, а также выравнивание их жизненных циклов. Среди возможных стратегий управления путевым хозяйством с целью максимального использования и по возможности продления срока службы стрелочных переводов можно выделить следующие подходы:

– снижение скорости движения поездов для уменьшения нагрузки от подвижного состава;

– перекладка стрелочных переводов с путей более высокого класса на более низкие;

– при удовлетворительном состоянии металлических элементов комплексное обновление стрелочных переводов путем полной замены комплектов переводных брусьев [2].

Последний подход стал реализуем с 2022 года благодаря новым комплектам стрелочных башмаков, разработанным Гомельским электромеханическим заводом (ЭМЗ) [3].

Сравнивая сроки эксплуатации, можно сделать вывод, что на один срок службы железобетонного основания приходится примерно пять комплектов деревянных брусьев.

Первоначальная стоимость новых брусьев практически одинакова (деревянных – 13 225 руб., для брусьев I типа – 11328 руб., брусьев I типа, железобетонных – 11 220 руб.), поэтому в расчетах материальных расходов за весь срок эксплуатации она не учитывалась. Таким образом, за один

жизненный цикл железобетонных брусьев необходимо будет заменить деревянные брусья порядка семи раз.

Общая стоимость замены комплектов деревянных переводных брусьев составит: для брусьев I типа – 66 125 руб. и для брусьев II типа – 56 640 руб. Отношение стоимости железобетонных брусьев к стоимости деревянных составляет соответственно 589 и 504 %.

Основной задачей по поддержанию стрелочного перевода в надлежащем состоянии на протяжении 35 лет будет одиночная или сплошная смена переводных брусьев. Трудозатраты зависят от типа переводных брусьев: подстрелочные, промежуточные, подкрестовинные и закрестовинные, поскольку они различаются по длине и количеству креплений рельсов. Время на выполнение работ для трех монтеров пути [4] составит:

– для подстрелочных брусьев – 107,29 чел·мин / 1 брус;

– промежуточных – 123,31 чел·мин / 1 брус;

– подкрестовинных – 149,35 чел·мин / 1 брус;

– закрестовинных – 142,12 чел·мин / 1 брус.

На стрелочном переводе типа Р65 марки 1/11 установлено следующее количество брусьев: 18 подстрелочных, 29 промежуточных, 9 подкрестовинных и 12 закрестовинных. Соответственно, общие трудозатраты составят:

– 1931,22 чел·мин (32,2 чел·ч) для подстрелочных брусьев;

– 3575,99 чел·мин (59,6 чел·ч) для промежуточных;

– 1344,15 чел·мин (22,4 чел·ч) для подкрестовинных;

– 1705,44 чел·мин (28,4 чел·ч) для закрестовинных.

Итоговые трудозатраты на весь комплект составят 142,6 чел·ч.

На текущий момент на Белорусской железной дороге функционирует около 7000 стрелочных переводов, уложенных на деревянных брусьях, что в среднем составляет 350 единиц на одну дистанцию пути (ПЧ). Учитывая различия в сроках службы, можно оценить трудозатраты на обслуживание стрелочных переводов на деревянном основании, исключая выправочные работы, следующим образом:

– 350·142,6 · 5 = 249 550 чел·ч за 35 лет;

– 249 550 : 35 = 7130 чел·ч в год;

– 7130 : 350 = 20,4 чел·ч в год на 1 комплект.

При пятидневной рабочей неделе в 2025 году общее количество рабочих дней составит 252, что делает трудозатраты равными 7130 : 252 = 28,3 чел·ч в день. В условиях восьмичасового рабочего дня придется задействовать 28,3 : 8 = 3,5 = 4 чел.

С учетом климатических условий, например, невозможности проведения работ зимой из-за промерзания балласта, потребность в монтерах возрастает до 5–6 чел. В таких условиях выделение шести работников ежедневно только для обслуживания стрелочных переводов становится практически невозможным.

Общее количество подлежащих замене стрелочных переводов в 2025 году составляет 405 единиц, из которых 54 находятся в Гомельской дистанции пути. На всех этих переводах металлические элементы остаются в исправном состоянии, а использование комплектов стрелочных башмаков от Гомельского ЭМЗ дает возможность заменить только подрельсовое основание на железобетонное.

Для оптимизации процесса работ разрабатывается схема перекладки переводов по всем ПЧ, учитывающая их марку, сторону и условия эксплуатации. Эта схема позволяет более эффективно проводить работы, заменяя стрелочные переводы на деревянном основании на новые на железобетонных брусьях. Работы осуществляются в «окна», что значительно уменьшает трудозатраты по сравнению с их одиночной сменой.

Снятые стрелочные переводы на деревянных брусьях транспортируют на базу ПЧ, где производится замена всего комплекта на новые железобетонные. Затем собранный перевод укладывается на место следующего однотипного, подходящего по параметрам.

Таким образом, перекладка 54 стрелочных переводов с усилением подрельсового основания позволит снизить затраты:

– трудозатраты при условии занятости 6 монтеров составят 20,4 · 54 = 1101,6 чел·ч (что эквивалентно 184 рабочим дням);

– материальные затраты на брусья I и II типов составят 66 125 и 56 640 руб. соответственно.

**Список литературы**

1 СТП БЧ 09150.56.010-2005. Текущее содержание железнодорожного пути. Технические требования и организация работ : утв. приказом Нач. Бел. ж. д. от 29.06.2006 № 221Н. – Введ. 01.07.2006. – Минск : Бел. ж. д., 2006. – 283 с.

2 **Романенко, В. В.** Комплексные меры по сокращению расходов на содержание стрелочных переводов / В. В. Романенко // Рынок транспортных услуг (проблемы повышения эффективности) : междунар. сб. науч. тр. – Гомель : БелГУТ. – 2023. – Вып. 16. – С. 219–226.

3 **Романенко, В. В.** Ресурсный подход к анализу содержания стрелочных переводов / В. В. Романенко // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 70-летию БелИИЖТа – БелГУТа. В 2 ч. Ч. 1. – Гомель : БелГУТ, 2023. – С. 411–413.

4 Типовые технически обоснованные нормы времени на работы по текущему содержанию пути : утв. приказом Нач. Бел. ж. д. от 08.04.2020 № 129 Н. – Введ. 01.08.2020. – Минск : Бел. ж. д., 2015. – 299 с.

УДК 625.151

# ПЕРСПЕКТИВЫ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕУКЛАДКИ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ С ЗАМЕНОЙ ДЕРЕВЯННОГО ОСНОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫМ

*В. В. РОМАНЕНКО*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

*Е. А. ГОРБАНЬ, И. М. ВОЛКОВ*
*Белорусская железная дорога, г. Минск*

Деревянные шпалы применяются на многих железных дорогах мира. Считается, что древесина, как материал, отвечает всем техническим требованиям при создании подрельсового основания. Главным достоинством деревянной шпалы является эксплуатационная и производственная простота. Отсутствуют проблемы при выполнении смены, подбивки, а также транспортировке.

Основными достоинствами деревянных шпал и брусьев являются хорошая упругость, простота формы, изготовления и эксплуатации (транспортировка, смена, прикрепление рельсов, изменение ширины колеи и т. п.), хорошее сцепление со всеми видами балласта, сравнительно небольшая масса (около 70 кг), большое электрическое сопротивление.

Недостатки деревянных шпал и брусьев: малый срок службы из-за гниения, механического износа и растрескивания древесины (6–8 лет), большой расход дефицитной древесины (на 1 км пути около 2 га леса с деревьями диаметром 26–28 см возраста 80–100 лет), неоднородность упругости пути по длине из-за разных размеров шпал.

В рамках стратегии развития путевого хозяйства Белорусской железной дороги (БЖД) разработан ряд мероприятий, направленных на повышение производительности и оптимизацию расходов на обслуживание путевого комплекса в целом и стрелочных переводов в частности [1]. Например, планируется переход на мощные материалы верхнего строения пути (ВСП) для увеличения межремонтных интервалов, а также определение оптимального межремонтного срока на основе срока службы железобетонных шпал и переводных брусьев, как наиболее долговечного элемента ВСП. Кроме того, внедряются ресурсосберегающие технологии, позволяющие снизить затраты на материалы и трудозатраты [2].

Срок службы деревянных переводных брусьев часто не удается выработать полностью из-за образования трещин и гниения, и, хотя замена комплекта брусьев обычно совпадает с заменой всего стрелочного перевода, металлические элементы могут служить намного дольше. Это приводит к необходимости частой одиночной смены брусьев в рамках текущего содержания.

Стоимость комплекта деревянных брусьев для стрелочного перевода 1/11 широкой колеи I типа составляет 13,3 тыс. рублей, а для II типа – 11,4 тыс. рублей. Комплект железобетонных брусьев для аналогичного перевода оценивается в 11,2 тыс. рублей. Несмотря на сопоставимую стоимость, срок службы железобетонного основания значительно выше. Обслуживание деревянных переводов обходится дороже, что увеличивает общие эксплуатационные расходы в несколько раз.

С 2022 года БЖД проводит замену деревянных стрелочных переводов на железобетонные, используя стрелочные башмаки, произведенные ОАО «Гомельский ЭМЗ». Эти башмаки позволяют заменять только подрельсовое основание, не затрагивая металлические элементы [3].

Данная технология направлена на модернизацию стрелочных переводов с одновременной заменой подрельсового основания и сокращением времени производства работ. Для успешной реализа-

ции процесса требуется тщательное планирование и составление схемы мест замены, поскольку замене подлежат только однотипные конструкции.

В 2025 в Гомельской дистанции пути планировалось переложить 54 стрелочных перевода на деревянном основании. Все стрелочные переводы имеют негодное для эксплуатации подрельсовое основание и металлические элементы, состояние которых удовлетворяет требованиям для II группы годности (главные пути 3-го и 4-го классов). В таком состоянии их дальнейшая эксплуатация влечет существенные трудности. Одиночная замена деревянных брусьев на железобетонные вызовет большой объем трудозатрат, а комплексная замена непосредственно на месте стрелочного перевода – значительного продолжительности «окна». В рамках предложенной организации работ возможную схему организации перекладки стрелочного перевода с комплексной заменой подрельсового основания рассмотрим по станции Бабичи (СП № 1) и по станции Якимовка (СП № 6).

На станции Бабичи необходимо организовать замену правостороннего СП № 1 на деревянном основании на однотипный со старогодными металлическими элементами на железобетонном основании. Укладываемый СП № 1 эксплуатировался в дистанции пути и был заменен с усилением подрельсового основания в 2024 году.

На станции Якимовка необходимо спланировать замену правостороннего СП № 6 на однотипный стрелочный перевод со старогодными металлическими элементами на железобетонном основании, который эксплуатировался на станции Бабичи (СП № 1).

Согласно анализу технического состояния металлических элементов стрелочных переводов, оба стрелочных перевода имеют одинаковый износ, что позволяет металлические элементы со стрелочного перевода № 1 переложить на стрелочный перевод № 6 без ухудшения условий эксплуатации.

После снятия на СП № 1 необходимо заменить подрельсовое основание с деревянного на железобетонное. Для сокращения времени занятости перевода непосредственно на станции, СП № 1 целесообразно перевезти на производственную базу дистанции пути, где выполнить смену переводных брусьев комплексно.

Для сокращения времени «окна» для производства основных работ целесообразно использовать два крана, например, КДЭ-253 (кран дистанции пути) и КЖ-971 (кран восстановительного поезда).

Краном КДЭ-253 будут демонтироваться и складироваться на платформы все блоки перевода (рамный, блок соединительных путей и крестовины).

После снятия на СП № 1 необходимо заменить подрельсовое основание с деревянного на железобетонное. Для сокращения времени занятости перевода непосредственно на станции, СП № 1 целесообразно перевезти на производственную базу дистанции пути, где выполнить смену переводных брусьев комплексно.

Для сокращения времени «окна» для производства основных работ целесообразно использовать два крана, например, КДЭ-253 (кран дистанции пути) и КЖ-971 (кран восстановительного поезда).

Краном КДЭ-253 будут демонтироваться и складироваться на платформы все блоки перевода (рамный, блок соединительных путей и крестовины). Краном КЖ-971 будет производиться укладка блоков нового стрелочного перевода, находящихся на обочине участка I главного пути станции Бабичи, начиная с рамного блока (рамный, блок соединительных путей и крестовины).

В отличие от деревянных брусьев, для железобетонных особенно важным является условие – использование щебеночного балласта крупных фракций. В это же «окно» необходимо произвести вырезку старого балласта (в том числе если он щебеночный) с применением погрузчика «Амкодор» и вручную. После укладки нового перевода необходимо добавить щебеночный балласт путем выгрузки из хоппер-дозатора по прямому и боковому направлениям, т. е. выполнить балластировку стрелочного перевода.

Также для железобетонного основания важна равноупругость и равнопрочность подшпального основания, поэтому по завершении балластировки следует запланировать выправку и рихтовку стрелочного перевода, которую, с целью сокращения трудозатрат и времени производства работ, целесообразно производить после полной выгрузки щебеночного балласта машиной ВПРС-08/275. В местах препятствий для работы машины – электрошпалоподбойками.

При такой организации работ выгода в трудовых и материальных ресурсах очевидна. Стоимость стрелочных переводов на железобетонном основании в долгосрочной перспективе в несколько раз ниже, чем на деревянном. В отличие от одиночной смены переводных брусьев с деревянных на железобетонные, комплексная смена существенно уменьшит трудовые затраты и время ограничения закрытия стрелочного перевода для движения поездов.

**Список литературы**

1 Концепция развития путевого хозяйства Белорусской железной дороги на 2022–2030 годы : утв. приказом Нач. Бел. ж. д. от 28.12.2021 № 404Н. – Введ. 28.12.2021. – Минск : Бел. ж. д., 2021. – 16 с.

2 **Романенко, В. В.** Анализ факторных решений по изменению системы ведения путевого хозяйства / В. В. Романенко // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – 2022. – № 2 (45). – С. 49–51.

3 **Романенко, В. В.** Ресурсный подход к анализу содержания стрелочных переводов / В. В. Романенко // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов : материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию БелИИЖТа – БелГУТа. В 2 ч. Ч. 1. – Гомель : БелГУТ, 2023. – С. 411–413.

УДК 625.172

# ПРОДЛЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ

*В. В. РОМАНЕНКО*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

*А. В. ТЕРЕХ*
*Белорусская железная дорога, г. Минск*

*В. А. СОРОГОВЕЦ*
*Белорусская железная дорога, г. Осиповичи*

Стрелочные переводы являются важнейшими элементами путевых объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта, обеспечивающими безопасность и эффективность движения подвижного состава. Металлические элементы вследствие непосредственного контакта с колесами подвижного состава подвержены износу и возникновению дефектов, что может значительно сократить их срок службы. Так как металлические элементы являются дорогостоящими, постоянно разрабатываются способы продления срока их службы, анализируются их преимущества и влияние на общую надежность железнодорожного пути.

Одним из способов продления срока службы металлических элементов стрелочных переводов является их регулярное техническое обслуживание [1]. В дистанциях пути разрабатываются и внедряются планы регулярного обслуживания, включая осмотр, смазку и замену изношенных деталей.

Регулярные осмотры и проверки позволяют своевременно выявить возможные неисправности.

Диагностика и мониторинг рельсов и металлических частей стрелочных переводов предполагает систему различных видов контроля с целью обнаружения дефектов: визуальный, инструментальный и с применением мобильных средств неразрушающего контроля рельсов (НКР) с электромагнитными и ультразвуковыми методами обнаружения дефектов [2].

К мобильным средствам контроля относятся вагоны-дефектоскопы (магнитные, ультразвуковые, совмещенные, вагоны-дефектоскопы, предназначенные для скоростного контроля рельсов), а также однониточные, двухниточные, переносные ультразвуковые дефектоскопы.

Постоянный контроль за наработкой износа дает возможность планировать мероприятия, которые при незначительных величинах возможно исправить шлифованием. Так, например, в Минской дистанции пути эксплуатируются стрелочные переводы, имеющие величину бокового износа рамного рельса у острия остряков 4 мм и более (рисунок 1). Одной из инновационных технологий, применяемых на стрелочных переводах с подобным состоянием рамных рельсов и остряков, является метод переноса острия остряка за счет его шлифования.

Цель шлифования остряка стрелочного перевода заключается в обеспечении укрытия его острия, а также в приведении уровня остряка к нормативным параметрам по понижению относительно изношенного рамного рельса и углу наклона его рабочей грани.

Контроль остряка и его расположения относительно рамного рельса осуществляется по проектным сечениям, ширина головки остряка на верхней части которых составляет 5, 10, 15, 20 и 50 мм.

Боковой износ рамных рельсов контролируется штангенциркулем путевым модели ПШВ у острия остряков и в наиболее изношенном месте и определяется как разность ширины новой и изношенной головки на уровне 13 мм ниже поверхности катания.

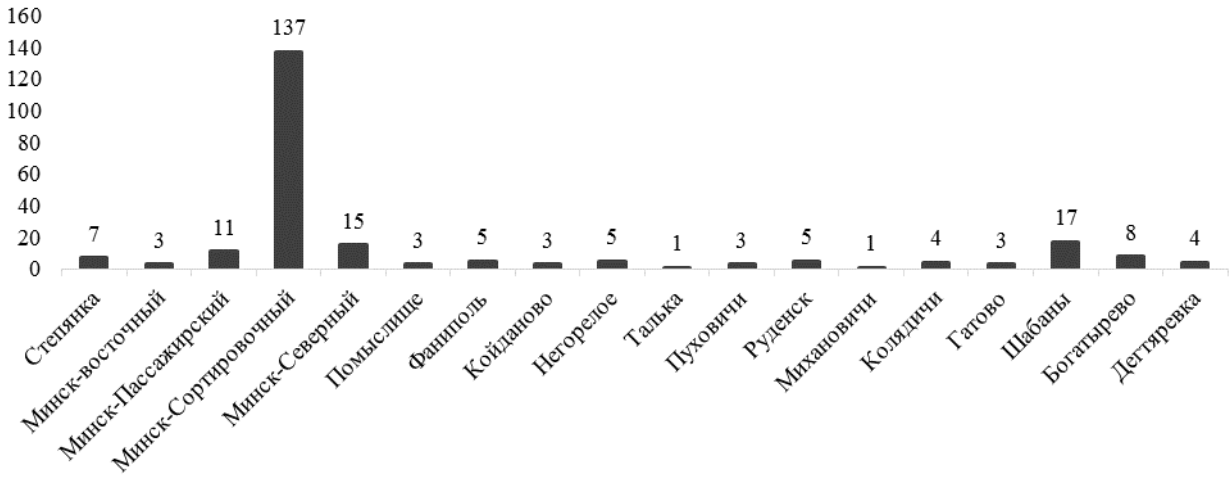



Рисунок 1 – Количество стрелочных переводов Минской дистанции пути
с боковым износом рамного рельса у острия остряка более 4 мм

Все операции по шлифованию проводятся только при начальном износе острия остряка, когда имеется достаточный запас по износу и понижению относительно рамного рельса, чтобы не превысить предельно допустимые значения. Процесс шлифования может повторяться многократно до тех пор, пока не будет достигнуто необходимое значение понижения остряка.

В случае, если боковой износ равен или превышает допустимое значение, такая технология не применяется. Также необходимо привести провисание остряка на башмаке к нормативной величине. Прилегание остряков к подушкам должно обеспечивать плотное соединение. Зазор между подушкой и остряком при прилегании к рамному рельсу не должен превышать 1 мм, вне этой зоны – 2 мм.

Работы выполняются на закрытом для движения поездов стрелочном переводе.

До начала работ проводится разметка проектных сечений остряков, для чего маркером на поверхности катания рамного рельса или остряка наносятся отметки, соответствующие расстояниям от острия остряка до проектных сечений (рисунок 2).

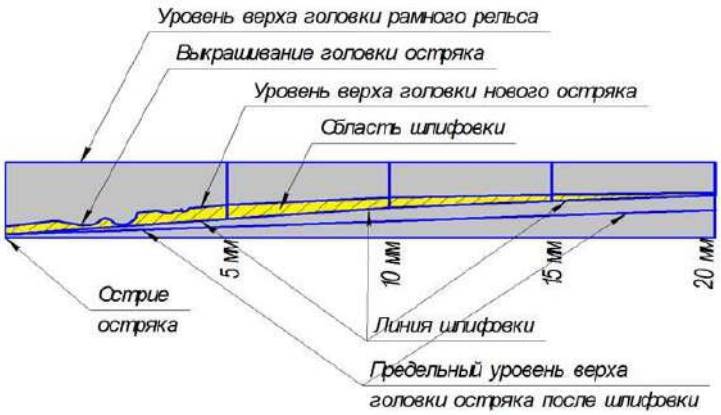



Рисунок 2 – Нанесение линии шлифовки

Технология проведения работ включает:

– удаление гребнеобразного наплыва или выкрашивания остряка;

– отшлифовывание верха головки остряка до линии шлифовки;

– шлифование боковой поверхности рамного рельса со стороны рабочей грани головки остряка на участке от острия остряка до сечения 20 мм под углом не менее 60° с одновременным удалением наплывов (ступенек) и формированием профиля остряка на участке от острия до сечения 5 мм;

– снятие фаски между горизонтальной поверхностью головки и рабочей гранью остряка под углом 45° или формирование закругления на участке от сечения головки 5 мм до 20 мм;

– формирование плавного отвода понижения головки остряка за сечением остряка 20 мм в сторону корня на расстоянии не менее 200 мм.

Так, понижение остряка на 2 мм и более является неисправностью, с которой движение поездов по стрелочному переводу запрещено, поэтому данная технология позволит снизить количество переводов, угрожающих безопасности.

**Список литературы**

1 Концепция развития путевого хозяйства Белорусской железной дороги на 2022–2030 годы : утв. приказом Нач. Бел. ж. д. от 28.12.2021 № 404Н. – Введ. 28.12.2021. – Минск : Бел. ж. д., 2021. – 16 с.

2 **Зелень, С. С.** Современная диагностика рельсового хозяйства и ремонтные технологии устранения дефектов / С. С. Зелень, А. Б. Капитонец, В. В. Романенко // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 24–25 нояб. 2022 г. В 2 ч. Ч. 1. – Гомель : БелГУТ, 2022. – С. 335–337.

УДК 625.143.03

## ПРОДЛЕНИЕ СРОКОВ СЛУЖБЫ РЕЛЬСОВ НА УЧАСТКАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ С ПОВЫШЕННЫМ РЕСУРСОМ

*Э. А. САВЕЛЬЕВА*
*Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва*

В условиях постоянного роста грузонапряженности и скоростей движения возникает вопрос - как эксплуатировать данный железнодорожный путь, как обеспечить надёжность пути. Одним из ответов является продление сроков службы рельсов. Поэтому целью данной работы является анализ причин выхода из строя рельсов и разработка мероприятий по увеличению их эксплуатационного ресурса на основе фактических данных, полученных по сети железных дорог.

По анализу статистических данных по техническому состоянию рельсов был построен график динамики количества дефектных и остродефектных рельсов за последние 10 лет на сети железных дорог РФ. По графику (рисунок 1) видно, что наблюдается тенденция к снижению количества дефектных и остродефектных рельсов за счет выполнения работ по техническому обслуживанию.

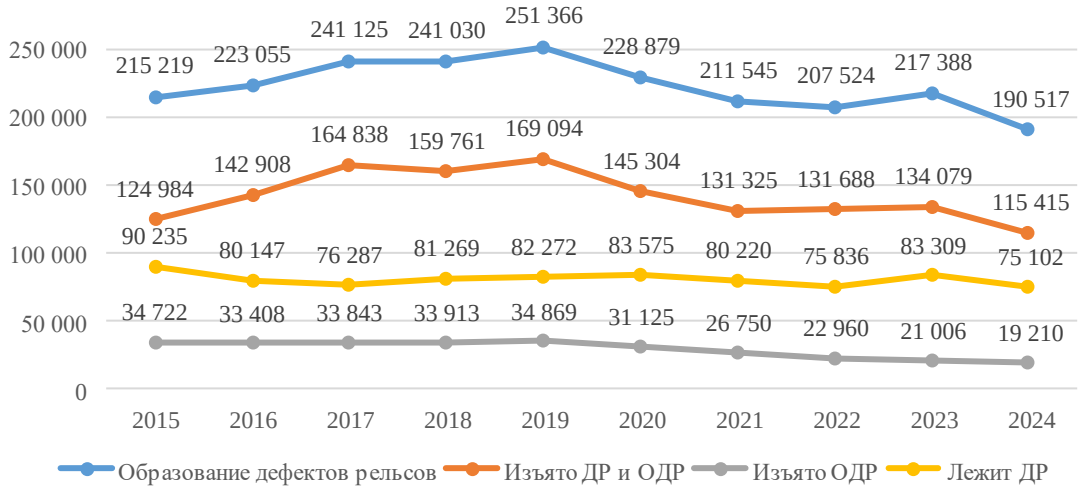



Рисунок 1 – Динамика количества дефектных (ДР) и остродефектных рельсов (ОДР)

Анализ выхода дефектных рельсов по годам за последние два года показал, что наибольшее количество дефектов было выявлено по кодам (рисунок 2):

– код 10, трещины и выкрашивания металла на поверхности катания головки из-за нарушений технологии изготовления рельсов (закатов, волосовин, плен и т. п.);

– код 11, трещины и выкрашивания металла на боковой рабочей выкружке или на средней части головки, возникшие изнутри от местных скоплений неметаллических включений, вытянутых вдоль направления прокатки в виде дорожек-строчек или возникшие от наружной поверхности рельса из-за недостаточной контактно-усталостной прочности рельсового металла, после пропуска гарантийного тоннажа;

– код 19, контроленепригодность из-за наличия выкрашиваний, трещин на поверхности катания, или рябизны, отпечатков, или сильной коррозии на нижней поверхности головки рельса;

– код 46, смятие и износ головки в зоне сварного стыка из-за местного снижения механических свойств металла после пропуска гарантийного тоннажа [1].

В 2024 году их совокупная доля составила 62,7 % от общего числа, что позволило нам выявить основные причины дефектности рельсов, которые связаны с нарушением технологий изготовления рельсов, недостаточной контактно-усталостной прочностью рельсового металла после пропуска гарантийного тоннажа и качеством выполнения работ при сварке рельсов. Поэтому необходимо рассмотреть мероприятия по продлению ресурса рельсов, организации обслуживания пути и контроля его состояния.

Для разных участков с разной грузонапряженностью представлен график зависимости среднего ущерба и среднего времени задержек поездов от грузонапряженности (рисунок 3), согласно данным Управления пути и сооружений ОАО «РЖД». Результат анализа показал, что на участках особогрузонапряженных наблюдается значительное увеличение среднего времени задержек поездов и среднего ущерба при обнаружении изломов рельсов.

На сети железных дорог РФ изломы рельсов распределяются, таким образом, что 7 % приходится на шейку в зоне болтовых стыков, 15 % – на головку и 28 % – на подошву. Основной причиной возникновения данных дефектов является развитие усталостных трещин. При этом 50 % всех изломов приходится по всему профилю рельса из-за дефектов в зонах сварных стыков.

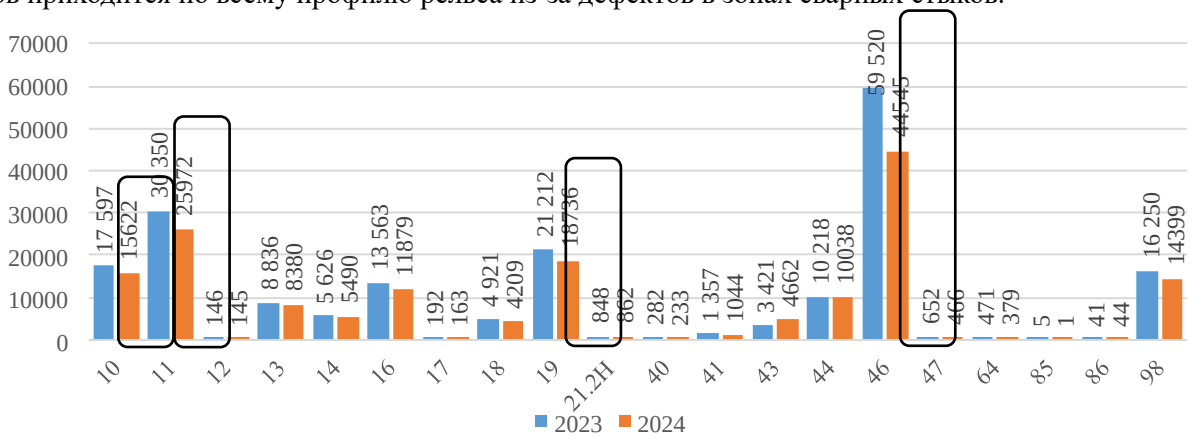



Рисунок 2 – Анализ выхода дефектных рельсов по кодам за 2023 и 2024 годы

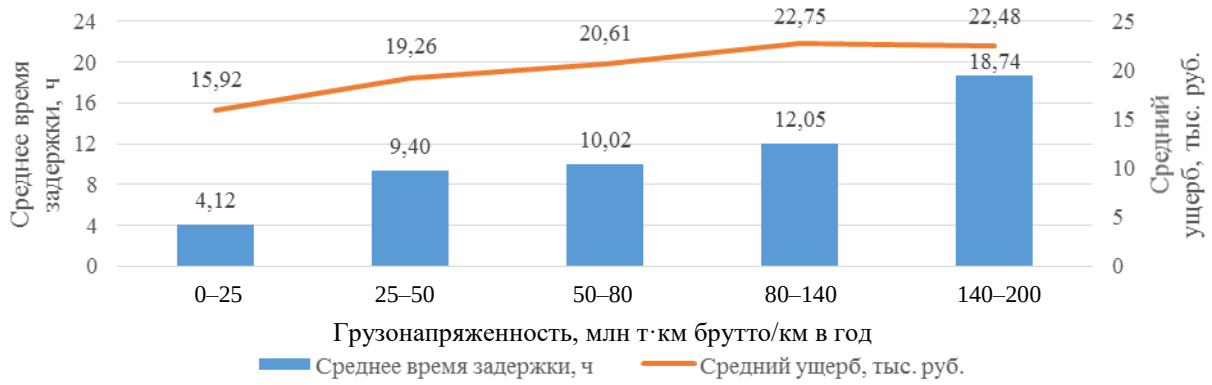



Рисунок 3 – Зависимость среднего времени задержки подвижного состава и среднего ущерба по причине излома рельса

Таким образом становится понятно, что стандартный подход к содержанию пути на таких участках недостаточный. В первую очередь необходимо осуществлять мероприятия по продлению срока службы рельсов на участках с повышенным ресурсом.

Для уменьшения дефектных рельсов и предотвращения появления остродефектных рельсов необходимо предусмотреть качественное выполнение и совершенствование организации следующих мероприятий: высокоскоростное (превентивное) шлифование, активное (стандартное) шлифование, фрезерование, лубрикация рельсов, наплавка рельсов, упрочнение болтовых отверстий, смены и сварки рельсов [3]. Также необходимо рассмотреть разработку рельсов с повышенным ресурсом, это позволит увеличить жизненный цикл верхнего строения пути, снизить себестоимость обслуживания и повысить пропускную способность.

Комплексное применение перечисленных мероприятий позволит существенно увеличить срок службы рельсов, снизить количество дефектов и задержек движения поездов, повысить безопасность и экономическую эффективность эксплуатации железнодорожного пути.

**Список литературы**

1 Инструкция «Дефекты рельсов. Классификация, каталог и парметры дефектных и остродефектных рельсов» : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 23.10.2014 г. № 2499/р // КонсультантПлюс.Россия : справ. правовая система (дата обращения : 02.10.2025).

2 Инструкция по обеспечению безопасности движения поездов при производстве путевых работ : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 г. № 2540/р. – М. : Инфра-М, 2017. – 212 с.

3 Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14.11.2016 г. № 2288/р // КонсультантПлюс.Россия : справ. правовая система (дата обращения : 02.10.2025).

УДК 656.225.073

## УЧАСТКИ ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ БЕЗБАЛЛАСТНОГО ПУТИ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ

*А. В. САВИН, С. П. ВАРАВА*
*Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (АО «ВНИИЖТ»), г. Москва, Российская Федерация*

На железных дорогах многих стран мира все большее распространение находит безбалластный тип верхнего строения пути. С 2010 года данная конструкция пути в опытном порядке эксплуатируется и в России [1–3]. Она характеризуется стабильностью, надежностью и экономичностью эксплуатации. Безбалластный путь сопрягается с обычным путем на балласте посредством переходных участков. Опыт эксплуатации в России и за рубежом показывает, что при движении подвижного состава через указанное сопряжение возбуждаются повышенные колебания в вертикальной и горизонтальной плоскостях, следствием которых является прогрессирующее расстройство пути [4, 5].

Затраты на текущее содержание таких участков сопряжения существенно превышают затраты на содержание самого безбалластного пути. По этим причинам их конструкции уделяется особое внимание. Участки переменной жесткости для безбалластного пути по функциональному назначению идентичны участкам на подходах к мостам и тоннелям. В части проектирования, сооружения и эксплуатации таких участков накоплен значительный опыт, которым необходимо воспользоваться при проектировании безбалластного пути.

Радикальным средством устранения специфических расстройств пути в зонах сопряжения разных типов конструкций является создание специальных участков переходного пути, обеспечивающих плавное изменение жесткости.

На Экспериментальном кольце АО «Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» в 2014 году проведены работы по сооружению земляного полотна для испытаний четырех типов безбалластных конструкций пути. LVT (Россия, по Швейцарской лицензии), MaxBogl (Германия), Alstom (Франция), Tines (Польша). Протяженность каждого участка – 75 м. Общая протяженность экспериментального участка – 550 м. Участок прямолинейный. Скорость движения – 80 км/ч. Осевая нагрузка – 23,5 т на ось.

Общая концепция испытаний была такова: лабораторные испытания элементов (узел скрепления и его элементы, блоки, прокладки), затем ресурсные полигонные испытания на Эксперимен-

тальном кольце до 600 млн т брутто, затем эксплуатационные испытания на действующем участке с нормативными скоростями. Каждая из конструкций имела по два участка переменной жесткости для плавного перехода от балластного пути к безбалластному.

Наиболее проблемные места для всех опытных конструкций – это зона сопряжения двух конструкций [2, 7]. Просадки в этих местах достигли 40 мм и требовали периодического проведения работ по текущему содержанию пути с применением выправочной машины ВПР [8]. При таких просадках имеют место провисы шпал, т. е. потеря сцепления подошвы шпал с балластом. Такое явление существенно снижает устойчивость бесстыкового пути.

При строительстве высокоскоростной железнодорожной магистрали Санкт-Петербург – Москва на участках изменения конструкций железнодорожного пути с балластного на безбалластный будут уложены участки переменной жесткости.

В унифицированных решениях разработаны два варианта конструкции переходного участка для скоростей движения до 250 км/ч на перегонах и до 120 км/ч на станциях. Конструкция для скоростей движения до 250 км/ч на рассматриваемом участке не применяется. Конструкция для скоростей движения до 120 км/ч применяется на раздельных пунктах между стрелочными переводами марки 1/25 уложенными на безбалластном основании и 1/18 уложенными на балластном пути. Конструкция участка переходной жёсткости представлена на чертеже 960-1356-ТКР5.2.1-ГЧ.10, лист 2. Полная длина участка составляет 30,86 м. В том числе для безбалластного пути – 10,76 м, для пути на балласте – 20,1 м. На участке стыковки безбалластного пути с балластным, под щебёночным балластном устраивается железобетонная плита размером 8 м (длина) × 3,2 м (ширина) × 0,25 м (высота), объединенная с плитой фундамента соседних двух рельсовых плит. В зоне 15 м переходного участка производится склеивание балластной призмы. На переходном участке укладываются шпалы с возможностью крепления дополнительных рельсов и с интегрированными подшпальными упругими прокладками. Для перехода от устоя моста к земляному полотну устанавливают переходной участок специальной конструкции длиной 21,6 м. Для обеспечения изменения жесткости конструкции в основании БВСП устраивается железобетонная плита длиной 12 м, шириной 8,2 м.

На скоростном полигоне Саблино – Тосно Октябрьской железной дороги запланированы испытания данной конструкции участка переменной жесткости. Цель испытаний – определить места, на которых наблюдается наибольшее динамическое воздействие на переходном участке и при необходимости откорректировать конструкцию для обеспечения плавности движения поезда при переходе от балластного пути к безбалластному.

Для этого в различных поперечных сечениях переходного участка будут размещены датчики давления грунта (месдозы) таким образом, чтобы они располагались на границах слоев (слой ресайклинга, первый защитный слой, второй защитный слой).

Кроме того, на этих же границах слоев будут размещены геодезические марки (металлические стержни с площадкой в основании в обсадных трубах) для точной геодезической съемки вертикальной осадки различных слоев грунта. Дополнительно геодезическая съемка будет производиться по головке рельса.

Датчики ускорений будут размещаться на рельсе, на подкладке рельсового скрепления, на путевой бетонной плите, на фундаментной бетонной плите и на асфальтобетоне на основной площадке земляного полотна. Такое расположение датчиков позволит оценить степень гашения колебаний в каждом элементе пути и по длине переходного участка при проходе поезда.

Тензодатчики будут размещены на рельсе и на путевой плите для определения механических напряжений в тех же сечениях, где будут размещаться месдозы, датчики ускорений и геодезические марки.

Такой набор и расположение датчиков позволит оценить эффективность работы участка переменной жесткости как элемент плавно меняющего модуль упругости пути при переходе от балластного пути к безбалластному. По результатам этих испытаний будет приниматься решение о необходимости корректировки конструкции участков переменной жесткости и продолжении испытаний на участке Крюково – Новая Тверь Октябрьской ж. д. со скоростями движения до 400 км/ч.

**Список литературы**

1 **Ермаков, В. М.** Опытный полигон на линии Санкт-Петербург – Москва / В. М. Ермаков, Э. Д. Загитов // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – № 5. – С. 2–5.

2 **Савин, А. В.** Опыт укладки и эксплуатации безбалластного пути LVT / А. В. Савин // Путь и путевое хозяйство. – 2013. – № 5. – С. 31–34.

3 **Савин, А. В.** Критерии выбора конструкции безбалластного пути / А. В. Савин // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 2. – С. 2–8.

4 Путь для переходных участков при высоких осевых нагрузках // Железные дороги мира. – 2009. – № 2. – С. 74–77.
5 Исследование мостов и подходов к ним на участках с интенсивным движением // Железные дороги мира. – 2009. – № 5. – С. 73–77.
6 **Клинов, С. И.** Железнодорожный путь на искусственных сооружениях / С. И. Клинов. – М. : Транспорт, 1990. – 144 с.
7 **Савин, А. В.** Участки переменной жесткости для безбалластного пути / А. В. Савин // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 8. – С. 2–6.
8 **Савин, А. В.** Испытания безбалластных конструкций пути / А. В. Савин, А. В. Петров, К. И. Третьяков // Техника железных дорог. – 2016. – № 2 (34). – С. 28–38.

УДК 625.142.44

# СОСТОЯНИЕ ШПАЛ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ТЯЖЕЛОВЕСНЫХ ДЛИННОСОСТАВНЫХ ПОЕЗДОВ

*А. В. САВИН*
*Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (АО «ВНИИЖТ»), г. Москва, Российская Федерация*

*С. А. ГНЕЗДИЛОВ*
*АО «БетЭлТранс» (АО «БЭТ»), г. Москва, Российская Федерация*

В 2025 г. грузонапряженность на железных дорогах восточного полигона ОАО «РЖД» выросла до 164 млн т брутто в год, при этом количество тяжеловесных поездов в общем поездопотоке составляет около 50 %, в том числе сдвоенных поездов с распределенной тягой и массой до 14200 т. Как правило в таких поездах используются вагоны с осевой нагрузкой 25 т на ось. В этих условиях на некоторых участках в кривых радиусом около 300 м наблюдается выход из строя шпал ранее назначенного ресурса.

Повышение осевых нагрузок подвижного состава увеличивает вертикальные динамические силы, передаваемые на рельсы и, соответственно, на шпалы. Применительно к железобетонным шпалам повышение нагрузок отражается в первую очередь на увеличении изгибных напряжений в подрельсовой части шпал и выразится в росте числа шпал с повреждениями в этой их части.

Увеличение числа шпал с повреждениями в средней части также частично может быть вызвано повышением осевых нагрузок, хотя работоспособность этой части в большей степени зависит от жесткости и состояния подшпального основания.

Силовое воздействие подвижного состава на шпалы, как по величине, так и по частоте повторения, зависит от многих факторов, главными из которых являются осевые нагрузки, в первую очередь, грузовых вагонов, грузонапряженности линии, конструкции и состояния верхнего строения пути (тип рельса, эпюра укладки шпал, род балласта и др.), и состояния подвижного состава.

В результате расчетов по Методике оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности [1] (далее – Методика) были получены значения $P_{ш}^{расч}$ при осевой нагрузке 23, 25 и 27 т.

В таблице 1 даны ожидаемые максимальные значения нагрузок и рассчитанные коэффициенты запаса.

*Таблица 1* – **Вертикальные нагрузки на шпалу и изгибающие моменты в подрельсовом и среднем сечениях шпалы при разном уровне осевых нагрузок подвижного состава**

| Осевая нагрузка, тс | Нагрузка на шпалу, $P_ш$, тс | Изгибающий момент от $P_ш$, $M_р$, тс·м | Изгибающий момент, принятый при разработке типовых шпал, $M_р^{расч}$, тс·м | Коэффициент запаса, $M_р^{расч}/M_р$ | Изгибающий момент от $P_ш$, $M_с$, тс·м | Изгибающий момент, принятый при разработке типовых шпал, $M_с^{расч}$, тс·м | Коэффициент запаса, $M_с^{расч}/M_с$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| в подрельсовом сечении шпалы | | | | | в среднем сечении шпалы | | |
| 23 | 10,14 | 1,11 | 1,41 | 1,3 | 0,81 | 1,16 | 1,43 |
| 25 | 11,3 | 1,24 | 1,41 | 1,14 | 0,88 | 1,16 | 1,32 |
| 27 | 11,91 | 1,31 | 1,41 | 1,1 | 0,95 | 1,16 | 1,22 |

Способы определения вертикальных сил на шпалы, принятые в Методике, остаются справедливыми и при повышении осевых нагрузок подвижного состава, и значения этих сил, указанные в таблице 1, могут быть использованы при исследовании повреждаемости шпал.

Методика расчета железобетонных шпал в пути под действием вертикальных нагрузок детально изложена в работе «Железобетонные шпалы для рельсового пути» под редакцией А. Ф. Золотарского [2]. Она прошла проверку опытом проектирования и многочисленными стендовыми и путевыми испытаниями железобетонных шпал.

По материалам исследований и расчетов можно сделать следующие выводы:

– с повышением осевых нагрузок подвижного состава (грузовые вагоны) прямо пропорционально увеличиваются вертикальные динамические нагрузки, передаваемые на шпалы, зависящие также от основных характеристик верхнего строения пути (тип рельса, эпюры укладки шпал, упругости подшпального основания);

– железобетонные шпалы подтипов Ш3-Д 44х3, ШС-АРС 44х3 и Ш5-ДФ 44-3, изготовленные с соблюдением требований ГОСТ 33320 [4], применяемые с рельсами типа Р65 при эпюре укладки не менее 1840 шт./км и жесткости подрельсового основания не выше 2000 кг/см$^2$, укладываемые и эксплуатируемые с выполнением требований инструкции по их содержанию [3] в части подготовки подшпального основания, сохраняют достаточную трещиностойкость при повышенных осевых нагрузок грузовых вагонов до 25 т. Критерием оценки возможности применения шпал при повышенных осевых нагрузок следует считать шпалы с коэффициентом запаса (К>1,3);

– при повышенных осевых нагрузок вагонов до 27 тс необходимо применение железобетонных шпал с увеличенной на 20 % трещиностойкостью подрельсовой части, а для уже уложенных шпал – принятие мер по снижению действующих на них нагрузок путем увеличения числа шпал на 1 км.

Кроме увеличенной осевой нагрузки до 25 т на ось ОАО «РЖД» поставлена задача увеличения ресурса железнодорожного пути до 2,5 млрд т брутто.

В связи с этим компанией АО «БЭТ» проведена работа по усилению конструкции шпалы для удовлетворения повышенных требований. Разработаны и поставлены на производство шпалы железобетонные предварительно напряженные подтипа Ш3-Д 4х10 исполнения 2(ПГ) с армированием торцевой части шпал спиралями и дополнительным армированием в зоне дюбеля спиралями со стержневой арматурой периодического профиля диаметром 9,6 мм и классом прочности бетона на сжатие В60.

Для подтверждения ресурса 2,5 млрд т брутто при осевой нагрузке 25 т на ось был проведен следующий натурный эксперимент.

На полигоне ст. Щербинка экспериментально получены напряжения в шпале при движении поезда с вагонами 23, 25 и 27 т на ось. Затем определены параметры нагружения лабораторного пульсатора, эквивалентные напряжениям в шпале при 23, 25 и 27 т на ось. После чего проведено циклическое нагружение шпал до разрушения в режимах, эквивалентных 23, 25 и 27 т на ось.

По показателям трещиностойкости и прочности при циклической нагрузке шпалы подтипа Ш3-ПГ 4 × 10 при пропуске 100 млн циклов, что соответствует пропущенному тоннажу 2,5 млрд т брутто, выдержали ресурсные испытания при заданных режимах испытаний. Результаты лабораторных испытаний подтверждают прочностные характеристики и долговечность шпал при осевой нагрузке 25 т в пределах назначенного ресурса 2,5 млрд т брутто пропущенного груза.

Условия на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» в Щербинке отличаются от реальных режимов ведения поездов на восточном полигоне, но методический подход можно использовать для любых условий эксплуатации. Для подтверждения ресурса шпал в сложных условиях восточного полигона при движении сдвоенных поездов с распределенной тягой массой до 14200 т необходимо проведение прямого эксперимента по определению напряжений в шпалах не на Экспериментальном кольце в Щербинке, а на участках обращения длинносоставных тяжеловесных поездов. Затем необходимо определить параметры нагружения лабораторного пульсатора, эквивалентные напряжениям в шпале в этих условиях, после чего определить реальный ресурс шпал для таких участков пути.

Для повышения надежности и безопасности движения необходимо разработать нормативный документ, регламентирующий требования к конструкции пути и порядок обследования пути и подвижного состава перед запуском в обращение длинносоставных тяжеловесных поездов, а также дополнительные мероприятия по текущему содержанию таких участков.

**Список литературы**

1 Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности : утв. распоряжением ОАО «РЖД» №2706/р от 22.12.2017) // КонсультантПлюс.Россия : справ. правовая система (дата обращения : 02.10.2025).

2 Железобетонные шпалы для рельсового пути / А. Ф. Золотарский, Б. А. Евдокимов, Н. М. Исаев [и др.] ; под. ред. А. Ф. Золотарского. – М. : Транспорт, 1980. – 270 с.

3 Инструкция по ведению шпального хозяйства с железобетонными шпалами : утв. распоряжением от 12.02.2014 г. № 380р // Трудовой десант. – URL : https://www.tdesant.ru/info/item/270 (22.09.2025).

4 ГОСТ 33320-2015. Шпалы железобетонные для железных дорог. Общие технические условия. – Введ. 01.03.2016. – М. : Стандартинформ, 2019. – 39 с.

УДК 625.7

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ НА ДОРОГАХ

*Э. П. САЗАНЧУК, Н. И. ШИШКО*
*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Безопасность дорожного движения – это одна из наиболее актуальных проблем в мире. Ежегодно миллионы аварий происходят из-за таких факторов, как плохое состояние дорог, отсутствие своевременных предупреждений об изменении дорожных условий, невнимательность участников дорожного движения, пренебрежение правилами дорожного движения, а также выход диких животных на проезжую часть. Проблема тяжелых последствий дорожно-транспортных происшествий (далее – ДТП) с участием крупных диких животных все также остается актуальной и в мировом масштабе [1]. Разработка дополнительных мероприятий, способных снизить уровень аварийности на загородных участках дорог, спасти жизни людей и защитить диких животных от гибели, – важный и актуальный вопрос.

Развитие интеллектуальной инфраструктуры предлагает инновационные решения для повышения безопасности, среди которых – интеграция пьезоэлектрических элементов в дорожное полотно.

Механическая энергия – самый распространённый и универсальный вид энергии, доступный в окружающей среде. Перемещения, колебания и вибрация источника могут быть уловлены и преобразованы в электрическую энергию посредством преобразования механики в электричество [2].

Принцип действия пьезоэлектрических элементов заключается в том, что пьезоэлектрические материалы генерируют заряд под действием механического воздействия. Это явление, известное как пьезоэлектрический эффект, возникает из-за того, что приложенное давление вызывает перемещение электрических зарядов в кристаллической решётке материала, создающее разность потенциалов (напряжение) на его поверхности. В основе этого эффекта лежит особая структура кристаллов, в которых отсутствует центр симметрии. Когда кристалл деформируется, положительные и отрицательные заряды смещаются, из-за чего появляется электрическое поле.

Пьезоэлектрические элементы могут быть как кварцевыми, так и синтетическими, такими как титанат бария или пьезокерамика. Современные технологии позволяют создавать мягкие и гибкие пьезоэлементы, которые можно интегрировать в различные поверхности, включая дорожное покрытие. Проезд автомобиля на участке дороги с электрическими пьезоэлементами в дорожном покрытии вызывает деформацию этих элементов – механическое воздействие от веса и движения транспортных средств. В результате преобразования механического воздействия генерируется электрический сигнал, который можно интегрировать в различные сферы. Кроме того, благодаря способности создавать электричество при механическом воздействии, пьезоэлементы могут использоваться для сбора энергии, которая в перспективе может питать различные устройства, например, освещение или системы оповещения, или же осуществлять охранную функцию. Это делает их не только функциональными с точки зрения безопасности, но и энергоэффективными, что особенно важно для совместимости с «умными» технологиями.

Преимущества использования пьезоэлементов для повышения безопасности дорожного движения заключаются в их уникальной способности преобразовывать механическую энергию, возника-

ющую при движении транспортных средств, в электрическую. Встроенные в дорожное покрытие пьезоэлементы способны улавливать давление, создаваемое колесами автомобилей, и преобразовывать его в электрический заряд. Эта энергия значительно снижает зависимость от традиционных источников питания и способствует созданию более автономных и энергоэффективных систем.

Кроме того, пьезоэлементы обеспечивают возможность мониторинга дорожной обстановки в режиме реального времени. Они фиксируют изменения давления, вызванные движением транспортных средств, что позволяет получать точные данные о количестве автомобилей, их скорости и весе. Такая информация становится незаменимой для выявления потенциально опасных ситуаций, например, перегрузки транспортных средств или скопления машин в определённых участках дороги. Благодаря этому можно оперативно принимать меры по регулированию трафика и предотвращению аварий. Еще одним важным преимуществом является высокая долговечность и надежность пьезоэлектрических материалов. В отличие от механических датчиков, которые имеют подвижные части и подвержены износу, пьезоэлементы представляют собой твердотельные устройства, не содержащие движущихся компонентов. Это значительно снижает необходимость в техническом обслуживании и ремонте, что особенно важно для элементов, встроенных в дорожное покрытие и подвергающихся постоянным нагрузкам и воздействию окружающей среды.

Интеграция пьезоэлементов с современными интеллектуальными транспортными системами открывает новые возможности для повышения безопасности на дорогах. С помощью таких систем можно своевременно предупреждать водителей о приближающихся опасностях и предотвращать их. Например, при обнаружении резкого торможения или скопления автомобилей пьезодатчики могут передавать сигнал на электронные табло или мобильные приложения, информируя участников движения и помогая избежать аварийных ситуаций.

Интеграция пьезоэлектрических элементов в дорожное покрытие – это перспективный подход к повышению безопасности на дорогах. Она открывает возможности для мониторинга в реальном времени, сбора энергии и интеллектуального управления трафиком. Долговечность пьезоэлементов, низкие эксплуатационные расходы и многофункциональность делают их идеальными для современной «умной» инфраструктуры. По мере развития технологий широкое внедрение пьезоэлектрических систем может значительно сократить количество аварий и повысить эффективность транспортных сетей в Республике Беларусь.

**Список литературы**

1 **Сазанчук, Э. П.** Анализ аварийности с участием диких животных на участках загородных дорог/ Э. П. Сазанчук ; науч. рук. Н. И. Шишко // Современные направления в проектировании, строительстве, ремонте и содержании транспортных сооружений : материалы IX Междунар. студ. конф. ; редкол. : С. Е. Кравченко (пред.) [и др.] ; сост. В. А. Ходяков. – Минск : БНТУ, 2024. – С. 585–587.

2 A novel composite multi-layer piezoelectric energy harvester / Q. Lu, L. Liu, F. Scarpa [et al.] // Compos. – 2018. – Vol. 201. – P. 121–130.

УДК 625.76

## УЧЕТ ПРОГНОЗНЫХ МОДЕЛЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА ПРИ РАЗРАБОТКЕ КОМПЛЕКСА МЕРОПРИЯТИЙ ПО РЕМОНТУ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ

*Н. Р. СМИРНОВ*
*Дорожно-строительный трест № 2, г. Гомель, Республика Беларусь*

Ремонтные мероприятия, реализуемые на сегодняшний день в дорожной отрасли, требуют корректировки в связи с потенциальными изменениями климатических параметров нашего региона. Климат определяет сроки начала и окончания дорожных работ, температурный интервал работы дорожной одежды, интенсивность разрушения дорожного покрытия и пр. Климатические параметры непостоянны. За прошедшие годы можно отметить тенденцию (рисунок 1) к превышению среднегодовой температуры над климатической нормой. Отклонения среднегодовой суммы осадков от климатической нормы носят несистемный характер – отмечается некоторое увеличение суммы осадков, сопряженное с неравномерным их выпадением [1].

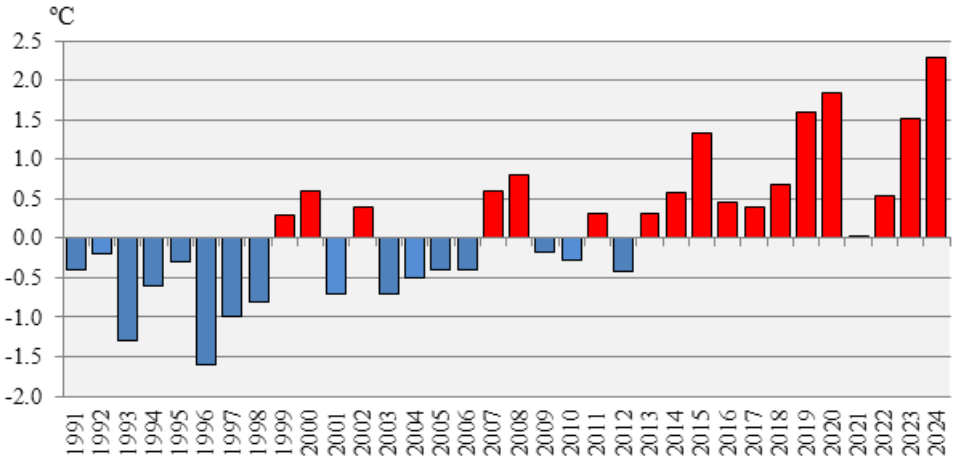



Рисунок 1 – Отклонение среднегодовой температуры воздуха от климатической нормы по Беларуси за период 1991–2024 гг.

В пространственном выражении в Республике Беларусь ожидается изменение границ агроклиматических областей и появление новых [2]. Максимальные и минимальные температуры воздуха одни из самых важных показателей с точки зрения оценки условий эксплуатации дорожной одежды. Прогнозируется смещение температурного интервала работы покрытия в сторону более высоких температур, но при этом величина этого интервала остается практически неизменной. Изменения температурных индексов представляют собой значительный вызов для дорожной отрасли. Учет этих изменений на всех этапах (от проектирования до ремонта) является не просто желательным, а необходимым условием для обеспечения устойчивого развития и минимизации рисков.

Применительно к дорожным асфальтобетонам такие условия вынуждают совершенствовать составы асфальтобетонных смесей, способных сопротивляться образованию пластических деформаций при более высоких летних температурах и хрупкому разрушению в период отрицательных температур. Среди многочисленных методов повышения надежности следует стремится к использованию таких, которые существенно не усложняют и не изменяют технологические процессы, а также не требуют приобретения компонентов и установок за рубежом. Одним из доступных для практической реализации в существующих условиях методов считается модификация смесей резиновой крошкой.

Резиновая крошка в настоящее время используется в дорожной отрасли для приготовления резинобитумного вяжущего как основы асфальтобетонных смесей типа С и А, укладываемых в верхние слои покрытий на дорогах высоких категорий. Резиновая крошка обладает высокой эластичностью, позволяющей ей компенсировать деформации в покрытии. Взаимодействие с вяжущим сохраняет эту ценную особенность, повышая устойчивость к образованию трещин и растрескиванию. Твердое ядро резиновой крошки позволяет в некоторой степени повысить сопротивляемость возникновению пластических деформаций в летнее время. Для смесей типа Б и В, используемых на дорогах III и IV категорий, применение резиновой крошки в качестве модификатора перспективно.

Резиновая крошка может быть введена в смесь двумя способами – сухим и мокрым. Сухой способ предполагает введение крошки непосредственно в смеситель. Резиновая крошка частично плавится, образуя с битумом прочные связи, а твердое ядро становится дополнительным элементом структуры асфальтовяжущего. В научно-технической литературе информации о модификации асфальтобетонных смесей типа Б или В по сухому способу недостаточно. Можно отметить несколько исследований, которые демонстрируют схожий результат, а также исследования, основанные на использовании схожих по принципу действия добавок [3]. В зависимости от процентного содержания резиновой крошки изменяются прочностные характеристики асфальтобетона. Оптимальным содержанием резиновой крошки можно считать 0,5 % от массы минеральной части, так как пределы прочности на сжатие и раскол в данном случае максимальны.

Приготовление асфальтобетонной смеси ЩМБ$_г$ с добавкой резиновой крошки сухим способом отличается незначительными изменениями от традиционной технологии. Отличие заключается в оснащении асфальтосмесителной установки отсеком для хранения и дозатором резиновой крошки (рисунок 2).

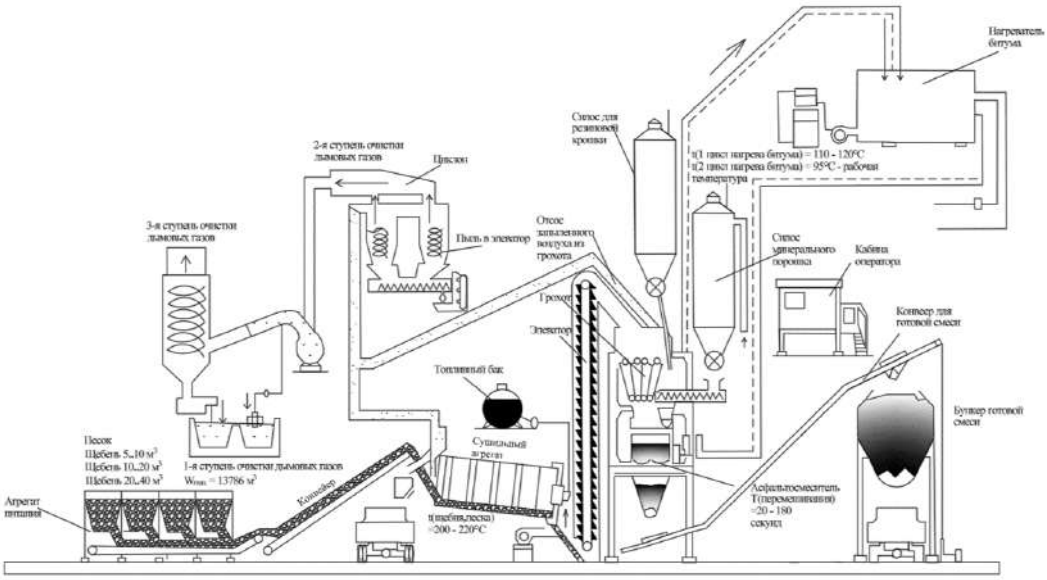



Рисунок 2 – Технологическая схема приготовления асфальтобетонной смеси типа Б с добавкой резиновой крошки по сухому методу

Модификация смеси резиновой крошкой приводит к увеличению стоимости производства работ на 2,5 %. Эффективность предложенного варианта объективно может быть оценена на опытном участке, так как стандартные методы испытаний асфальтобетонов не в полной мере отражают реальную работу материала в покрытии.

**Список литературы**

1 Климатическая характеристика 2024 года // Pgoda.by. – URL : https://pogoda.by/information/news/22887 (дата обращения : 21.04.2025).

2 **Смирнов, Н. Р.** Изменение климатических характеристик и их влияние на дорожную деятельность в Республике Беларусь / Н. Р. Смирнов // Наука – транспортной инфраструктуре : материалы III Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, студентов и учащихся колледжей, Гомель, 21 марта 2025 г. – Гомель : БелГУТ. – 2025. – С. 115–116. – EDN RGIFKO.

3 **Серова, О. В.** Анализ применимости современных технологий ремонта и борьбы с колееобразованием на дорогах / О. В. Серова, В. С. Герасимов // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2016. – № 10–1. – С. 102–106. – EDN WWHSCD.

УДК 625.142.44

## ЗАВИСИМОСТЬ УСТОЙЧИВОСТИ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ НА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ШПАЛАХ ОТ СОПРОТИВЛЕНИЯ КРУЧЕНИЮ В УЗЛЕ АНКЕРНОГО РЕЛЬСОВОГО СКРЕПЛЕНИЯ

*Е. В. СОЛОМАТИН*
*ООО «Технология 69», г. Москва, Российская Федерация*

Одним из критериев, обеспечивающих устойчивость рельсошпальной решетки бесстыкового пути против выброса, является повышение сопротивления рельсовых плетей продольному перемещению. Это особенно важно для исключения образования локальных участков пути, на которых сосредоточены избыточные значения продольных напряжений, превышающих критические значения.

Элементом рельсошпальной решетки, который отвечает в том числе за уменьшение возможности продольных перемещений плети, является узел промежуточного рельсового скрепления. Степенью прижатия рельсовой плети к шпале в основном и определяется сопротивление продольному перемещению.

Данный вопрос подробно исследовал профессор А. Я. Коган [1, 2]. Предложенный им математический аппарат взят за основы при исследовании роли рельсового скрепления в повышении устойчивости бесстыкового пути.

Для расчета критического значения продольного напряжения в плети за основу взята методика, учитывающая взаимосвязь критической температурной силы в рельсе с размерами неблагоприятной неровности в кривых (в частном случае в прямой). Рассматривается равновесие элемента пути $\Delta x$ размером, равным расстоянию между соседними шпалами.

Наихудшей формой начальной неровности пути в плане является периодическая неровность с критической частотой и неограниченным числом периодов.

Практически периодической неровности на интервале $-\infty < x < \infty$ в пути не бывает. Однако наличие хотя бы одного периода неровности критической длины следует (с учетом запаса) рассматривать как опасное состояние бесстыкового пути по условию его устойчивости. Поэтому к рассмотрению принимается случай, когда на критической длине $L_к$ укладывается полный период косинусоидальной (синусоидальной) неровности с амплитудой $C_б$.

Предлагается следующий алгоритм определения коэффициента безопасности по условию выброса пути с учетом его продольно-напряженного состояния и фактического положения в плане:

1 В качестве исходного значения принимаем продольную силу $N$, полученную по данным вагона-путеизмерителя.

2 По графику $L_к=L(N_к)$ находим значение длины неровности $L_к$, соответствующее этой продольной силе.

3 По графику $C_{бк}=C_{бк}(L)$ находим значение амплитуды неровности, соответствующее этой длине неровности для конкретного радиуса или для прямой.

4 Неровность пути в плане, получаемую по данным вагона-путеизмерителя, (или ее кривизну) на интервале $x - L_к \le x_o \le x$ раскладываем в ряд Фурье. Например, для кривизны имеем:

$$K(x,\ x_0) = \frac{b_0}{2} + a_1 \sin \omega x_0 + b_1 \cos \omega x_0 + a_2 \sin 2\omega x_0 + b_2 \cos 2\omega x_0 + ..., \tag{1}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{L_к}, \tag{2}$$

где $b_0/2$ – постоянная составляющая кривизны; $a_1, a_2, \ldots a_i$ ; $b_1, b_2, \ldots b_i$ – коэффициенты ряда Фурье, зависящие от координаты $x$; $x$ – текущая координата; $L_к$ – длина неровности принятая по графику $L_к=L(N_к)$,

$$a_i = \frac{2}{L_к} \int_{x-L_к}^{x} K(x_0) \sin i\omega x_0 dx_0, \tag{3}$$

$$b_i = \frac{2}{L_к} \int_{x-L_к}^{x} K(x_0) \cos i\omega x_0 dx_0. \tag{4}$$

Коэффициенты $a_i$ и $b_i$ можно определить по формуле Бесселя

$$a_i = \frac{2 \cdot \sum K_n \sin(\omega \cdot x_0)}{n}, \tag{5}$$

$$b_i = \frac{2 \cdot \sum K_n \cos(\omega \cdot x_0)}{n}, \tag{6}$$

где $n$ – число точек на интервале $0 \ldots L_к$.

Амплитуда основного тона кривизны определяется по формуле

$$C_к = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}, \tag{7}$$

тогда фактическая амплитуда бытовой неровности будет иметь вид

$$C_б = \frac{C_к}{\omega^2} = \frac{L_к^2}{4\pi^2} C_к. \tag{8}$$

При разложении в ряд Фурье самой неровности операцию двойного интегрирования, сводящуюся к умножению амплитуды основного тона на множитель $\omega^{-2}$, производить не требуется.

5 Принимаем рассчитанную амплитуду неровности (по графику $C_{бк} = C_{бк}(L_к)$ в качестве критической – $C_{бк}$ .

Сравниваем критическую амплитуду неровности $C_{бк}$ с фактической $C_б$ (измеренной вагоном-путеизмерителем) и определяем коэффициент безопасности $K_б$, изменяющийся от 0 до 1.

$$K_б = \frac{C_{бк} - C_б}{C_{бк}}. \tag{9}$$

Предложенная методика позволяет оценивать безопасность эксплуатации бесстыкового пути с учетом его реального продольно-напряженного состояния и фактического геометрического положения в плане, кроме того становится возможным учесть влияние рельсовых скреплений на устойчивость бесстыкового пути с учетом степени прижатия рельсовой плети к шпалам [3, 4].

В настоящее время имеется возможность реализовать на вагонах-путеизмерителях предлагаемую математическую модель. Производители путеизмерительных средств уже обладают технологиями сбора и обработки данных по необходимым параметрам.

**Список литературы**

1 **Коган, А. Я.** Оценка безопасной эксплуатации бесстыкового пути по условию выброса с учетом его фактического состояния / А. Я. Коган, А. В. Савин // Вестник ВНИИЖТ. – 2003. – № 2. – С. 5–12.

2 **Коган, А. Я.** Нелинейная устойчивость бесстыкового пути в прямых участках при наихудших формах ненапряженной начальной неровности / А. Я. Коган, В. А. Грищенко // Вестник ВНИИЖТ. – 1993. – № 3. – С. 16–23.

3 **Коган, А. Я.** Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом / А. Я. Коган. – М. : Транспорт, 1997. – 296 с.

4 **Коган, А. Я.** Устойчивость бесстыкового пути при различных конструкциях скреплений и условиях их эксплуатации / А. Я. Коган, А. В. Лебедев // Вестник ВНИИЖТ. – 2007. – № 2. – С. 7–14.

УДК 625.144.1

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ НА ОСНОВЕ МНОГОФАКТОРНОГО АНАЛИЗА УСЛОВИЙ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ

*О. А. СУСЛОВ, М. А. ГРИШИНА, В. А. ТРУШКИН*
*Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (АО «ВНИИЖТ»), г. Москва, Российская Федерация*

При эксплуатации бесстыкового пути температурно-напряженного типа возникают отказы, связанные с потерей устойчивости рельсошпальной решетки (выброс и сдвиг пути) или с разрушением рельсов в период действия пониженных температур – излом плети. Требования по устройству и содержанию бесстыкового пути должны предотвращать эти отказы, а также, ввиду постоянного увеличения грузонапряжённости, масс поездов и осевой нагрузки, необходима их регулярная актуализация. С учетом этого наиболее целесообразно перейти к оценкам норм устройства и содержания бесстыкового пути на основе расчетов и анализа вероятностей отказов, характеризующих его эксплуатационную надежность.

Аналитическое описание расчетных алгоритмов выполнения таких оценок для определения вероятностей выброса и сдвига рельсошпальной решетки, излома плети, угона плетей представлена в работах [1–4]. В их основу положено выражение (1), позволяющее определить вероятность отказа [5]:

$$V = \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{O - (\bar{R} - \bar{Q})}{\sqrt{\hat{R} + \hat{Q}}}\right), \tag{1}$$

где Ф – интеграл вероятности Гаусса; $\tilde{R}$ – обобщенная сопротивляемость конструкции переходу в состояние отказа; $\tilde{Q}$ – обобщенная нагрузка, вызывающая отказ конструкции; $\bar{R}$ и $\bar{Q}$ – математическое ожидание случайных величин $\tilde{R}$ и $\tilde{Q}$ ; $\hat{R}$ и $\hat{Q}$ – дисперсия случайных величин $\tilde{R}$ и $\tilde{Q}$ .

Приведенное выше соотношение позволяет определить вероятность наступления события, при возникновении которого происходит полный отказ работоспособности конструкции, что аналогично появлению отказов бесстыкового пути.

Для выполнения расчетов на основе представленных ранее работ был разработан программный продукт [6], позволяющий комплексно решать вопросы расчета и анализа эксплуатационной надежности бесстыкового пути по различным отказам при следующих входных параметрах:

– климатические условия и температура закрепления плети;

– конструкция верхнего строения пути, тип подвижного состава и режим его движения;

– наличие отступлений от норм устройства пути в части наличия неровностей геометрии рельсовой колеи, наличие отступлений от норм устройства пути в части наличия неисправностей элементов верхнего строения пути и балластного слоя.

Одним из входных параметров разработанного программного продукта является температура закрепления рельсовой плети, которая и является объектом данного исследования. Для расчетов с помощью разработанной программы и последующего анализа результатов были проанализировано 432 варианта эксплуатационных условий. Расчеты каждого сочетания условий эксплуатаций проводились для вариантов температур закрепления от 10 до 50 °С.

Для сводного анализа полученных результатов расчета для всех вариантов была построена сводная тепловая карта количества опасных отказов (вероятность возникновения отказа – более 5 %) в различных эксплуатационных условиях (рисунок 1), на котором видно, что отказов с недопустимой величиной вероятности их образования не возникает при температурах закрепления рельсовой плети 25, 30 и 35 °С.

Таким образом, оптимальный интервал температуры закрепления рельсовой плети составляет 30±5 °С для всей сети дорог, что соответствует действующему нормативу (в действующей на данный момент Инструкции № 2544/р [7] для всех дирекций инфраструктур оптимальная температура закрепления плетей составляет 30 ± 5 °С, за исключением Северо-Кавказской, Юго-Восточной и Приволжской дирекций, где норма оптимальной температуры закрепления 35 ± 5 °С для повышения запаса устойчивости плетей от выброса).

| Наименование состояния | | $t_з$ = 10 С° | | $t_з$ = 15 С° | | $t_з$ = 20 С° | | $t_з$ = 25 С° | | $t_з$ = 30 С° | | $t_з$ = 35 С° | | $t_з$ = 40 С° | | $t_з$ = 50 С° | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Наименование отказа | | выброс | поперечный сдвиг продольный сдвиг излом плети | выброс | поперечный сдвиг продольный сдвиг излом плети | выброс | поперечный сдвиг продольный сдвиг излом плети | выброс | поперечный сдвиг продольный сдвиг излом плети | выброс | поперечный сдвиг продольный сдвиг излом плети | выброс | поперечный сдвиг продольный сдвиг излом плети | выброс поперечный сдвиг продольный сдвиг | излом плети | выброс поперечный сдвиг продольный сдвиг | излом плети |
| всего превышений | | 108 | 0 | 63 | 0 | 27 | 0 | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | 4 | 0 | 24 |
| Климат | субтропический | 27 | | 18 | | 9 | | | | | | | | | 0 | | 0 |
| | умеренный | 18 | | 9 | | 0 | | | | | | | | | 0 | | 0 |
| | Континентальный | 27 | | 18 | | 9 | | | | | | | | | 0 | | 3 |
| | Резко континентальный | 27 | | 18 | | 9 | | | | | | | | | 4 | | 21 |
| | морской | 9 | | 0 | | 0 | | | | | | | | | 0 | | 0 |
| | муссонный | 0 | | 0 | | 0 | | | | | | | | | 0 | | 0 |
| Масса поезда | до 6300т | 36 | | 21 | | 9 | | | | | | | | | 0 | | 6 |
| | до 7500т | 36 | | 21 | | 9 | | | | | | | | | 2 | | 8 |
| | свыше 7500т | 36 | | 21 | | 9 | | | | | | | | | 2 | | 10 |
| уклон | менее -9 | 36 | | 21 | | 9 | | | | | | | | | 2 | | 18 |
| | -9+9 | 36 | | 21 | | 9 | | | | | | | | | 0 | | 6 |
| | более 9 | 36 | | 21 | | 9 | | | | | | | | | 2 | | 18 |
| План линии | R = более 1200 м | 0 | | 0 | | 0 | | | | | | | | | 0 | | 0 |
| | R = 650-1200 м | 0 | | 0 | | 0 | | | | | | | | | 0 | | 0 |
| | R = 350-650 м | 36 | | 7 | | 3 | | | | | | | | | 0 | | 5 |
| | R = менее 350 м | 72 | | 56 | | 24 | | | | | | | | | 4 | | 19 |
| Состояние пути | хор | 36 | | 27 | | 0 | | | | | | | | | 2 | | 11 |
| | Удовл | 72 | | 36 | | 27 | | | | | | | | | 2 | | 13 |

Рисунок 1 – Сводный анализ отказов бесстыкового пути для всех расчетных вариантов

**Заключение**

1 В настоящее время при назначении норм температуры закрепления рельсовых плетей не в полной мере учитываются факторы, влияющие на появление отказов бесстыкового пути.

2 На основе методик и алгоритмов расчетов вероятностей основных отказов, характерных для бесстыкового пути температурно-напряженного типа был разработан программный продукт, позволяющий определять влияние конструкции и состояния пути, климатических условий, типа подвижного состава и режима его движения на безопасность движения.

**Список литературы**

1 **Суслов, О. А.** Определение вероятности выброса бесстыкового пути температурно-напряженного типа / О. А. Суслов // Вестник транспорта Поволжья. – 2014. – № 4 (46). – С. 50–56.

2 **Суслов, О. А.** Определение уровня риска сдвига рельсошпальной решетки бесстыкового пути / О. А. Суслов, В. А. Марийчук, Д. В. Овчинников // Вестник транспорта Поволжья. – 2016. – № 6 (60). – С.41–47.

3 **Попова, М. Л.** Оценка вероятностей возникновения изломов и их выявления рельсовыми цепями / М. Л. Попова, А. Н. Попов, С. В. Бушуев // Транспорт Урала. – 2021. – № 3 (70). – С. 8–14. – DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-8-14.

4 **Суслов, О. А.** Математические модели определения вероятностей отказов потери продольной и поперечной устойчивости, а также изломов рельсовых плетей бесстыкового пути температурно-напряженного типа/ О. А. Суслов, М. А. Гришина // Вестник транспорта Поволжья. – 2024. – № 3(105). – С. 54–61.

5 **Ржаницын, А. Р.** Теория расчета строительных конструкций на надежность / А. Р. Ржаницын. – М. : Стройиздат, 1978. – 239 с.

6 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024681336 Российская Федерация. Модуль программного обеспечения для расчетов вероятности отказов бесстыкового пути температурно-напряженного типа: № 2024669328 : заявл. 16.08.2024 : опубл. 09.09.2024 / О. А. Суслов, Д. В. Овчинников, М. А. Гришина, В. А. Трушкин; заявитель акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта».

7 Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути : Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 г. № 2544/р : вступ. в силу 01.07.2017 // КонсультантПлюс. Россия : справ. правовая система (дата обращения : 29.08.2025).

УДК 625.04

# ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТЫКА С ПРИМЕНЕНИЕМ ШАРНИРНЫХ НАКЛАДОК

*О. А. СУСЛОВ, В. А. ТРУШКИН, М. А. ГРИШИНА*
*Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (АО «ВНИИЖТ»),*
*г. Москва, Российская Федерация*

Трещины, формирующиеся в шейке рельсов в области стыков от болтовых отверстий, которые, как известно, являются неизбежными концентраторами напряжений, соответствуют дефекту 53.1. Этот дефект относится к остродефектным рельсам, которые подлежат замене без промедления, поскольку представляют прямую угрозу безопасности движения из-за возможного разрушения под поездом или схода колёс с рельс. Количество данных дефектов ежегодно поддерживается на высоком уровне по статистике изъятий остродефектных рельсов (ОДР) на участках с большой грузонапряженностью и суровыми климатическими условиями.

Помимо основных концентраторов напряжений – отверстий в шейке рельса, также можно отметить воздействие на рельс клиновидной конструкции накладок с применением высокопрочных болтов. Момент затяжки 1100 Н·м является целесообразным решением в условиях эксплуатации Восточного полигона [1], однако при использовании стандартной клиновой конструкции стыка вертикальные растягивающие напряжения в шейке рельса, в совокупности с постоянной поездной нагрузкой, могут приводить к усталостным разрывам по дефектам 53.1

В исследованиях [1, 6] приведена конструкция стыка с накладками шарнирного типа, представленная на рисунке 1, *а*.

*а)* *б)*

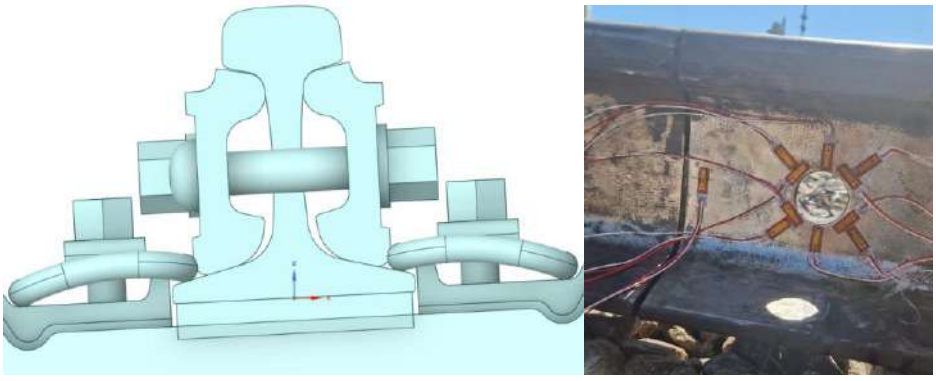


Рисунок 1 – Внешний вид стыка с накладками шарнирного типа:
*а* – вид с торца; *б* – вид сбоку

Таким видом опирания на пазухи рельса можно добиться количественного снижения напряжений в области шейки рельса. Следовательно, для подтверждения гипотезы о снижении напряжений в шейке рельсов за счет видоизмененного опирания на пазуху рельса в условиях обращения современного подвижного состава, были проведены натурные испытания шарнирной конструкции стыка в сравнении со стандартной.

С целью определения напряженно-деформированного состояния шейки рельса при использовании шарнирной конструкции стыковой накладки были проведены испытания в условиях Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ». Участок располагался на втором кольцевом пути со следующими характеристиками: рельсы Р65; зазор в стыке 3 мм; железобетонные шпалы; промежуточное рельсовое скрепление АРС-4; высокопрочные стыковые болты; щебеночный балласт; прямой план и профиль пути. Испытания проводились при обращении поезда, сформированного из локомотива ВЛ80с и 61 грузового вагона с осевыми нагрузками 23,5 и 25 т/ось. Установленная скорость движения составила 70 км/ч.

Усталостные разрывы шейки рельса по дефекту 53.1 проявляются в сечениях под углом 45°, поэтому именно эти сечения и были выбраны для тензометрических измерений напряженно-деформированного состояния под поездной нагрузкой. Внешний вид наклеенных тензодатчиков в области первого болтового отверстия представлен на рисунке 1, *б*.

Для оценки воздействия на стыковой рельс поездной нагрузки сначала были измерены значения монтажных напряжений по контуру болтового отверстия, а затем получены динамические добавки от подвижного состава.

Полученные записи показали, что при накатывании колеса на исследуемое сечение в шейке происходит снижение растягивающих монтажных напряжений (сжатие шейки А–) и некоторое увеличение их (растяжение шейки А+) при подходе колеса к сечению и удалению от него. Значения монтажных напряжений и динамических изменений под поездной нагрузкой по болтовому отверстию в зависимости от затяжки стыковых болтов приведены в таблице 1.

*Таблица 1* – **Значения изменения напряжений по болтовому отверстию двух конструкций стыка под нагрузкой**

| Крутящий момент на гайках болтов, $M_{кр}$, Н·м | | Монтажные напряжения $\bar{\sigma}_M$ , МПа | Динамическое растяжение шейки рельса $\bar{\sigma}_{M+A}$, МПа | Динамическое сжатие шейки рельса, $\bar{\sigma}_{M-A}$, , МПа |
|---|---|---|---|---|
| Клиновидные накладки | 300 | 63,4 | 6,2 | 31,7 |
| | 600 | 124,3 | 10,3 | 28,4 |
| | 1100 | 214,4 | 15,7 | 25,8 |
| Шарнирные накладки | 300 | 47,4 | 3,7 | 33,4 |
| | 600 | 90,9 | 7,2 | 29,1 |
| | 1100 | 171,2 | 8,8 | 25,3 |

Как видно из таблицы 1, влияние поездной нагрузки на изменение монтажных растягивающих напряжений не столь велико, так как болтовое отверстие находится недалеко от нейтральной оси рельса. Наибольшие средние значения уменьшений напряжений по контуру болтового отверстия составили 33,4 МПа в шарнирных накладках при затяжке болтов 300 Н·м. При этом с увеличением момента затяжки стыковых болтов воздействие на рельс линейно уменьшается. В свою очередь, наибольшие напряжения сжатия в клиновидных накладках составили 31,7 МПа. Воздействие сжатия на стыковой рельс у стандартной конструкции несколько меньше, что говорит о специфике работы расклинивающих накладок. Полученные значения сжатия шейки рельса для стандартной конструкции стыка удовлетворительно корреспондируются с результатами ранее выполненных исследований, приведенных в [3].

Однако как значения растяжения металла, так и монтажное напряжение по контуру отверстия меньше для шарнирной конструкции от воздействия накладок. Это позволяет сделать вывод о верности гипотезы о снижении общего напряженного состояния шейки рельсов в стыковой зоне с применением новой конструкции стыка.

**Список литературы**

1 **Клинов, С. И.** Высокопрочные болты / С. И. Клинов, А. А. Кондратьев // Путь и путевое хозяйство. – 1988. – № 1. – С. 33–35.

2 **Лысюк, В. С.** Управление надежностью бесстыкового пути интенсивными методами / В. С. Лысюк // Управление надежностью железнодорожного пути : сб. науч. тр. ВНИИЖТ. – М. : Транспорт, 1991. – С. 24–41.

3 **Крысанов, Л. Г.** Напряжения в рельсах в зоне стыка / Л. Г. Крысанов, О. О. Клокова // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). – 1986. – № 1. – С. 50–52.

УДК 656.25

# ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПОДХОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕЕЗДАХ

*А. М. ТРУНАЕВ, И. А. ХОЛОДОВ, К. А. ГРАБСКИЙ*
*Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация*

Железнодорожные переезды на протяжении многих лет остаются одним из наиболее уязвимых и аварийно-опасных элементов транспортной инфраструктуры [1]. По официальной статистике РЖД, в 2024 году на переездах было зарегистрировано 196 дорожно-транспортных происшествий, что на 20 % меньше по сравнению с 2023 годом. Вместе с тем тревожным фактором является увеличение числа погибших в подобных инцидентах на 15,8 % [2]. Такой дисбаланс между сокращением общего количества аварий и ростом их тяжести свидетельствует о сохранении высокой степени риска для участников дорожного движения.

Следует отметить, что традиционные средства обеспечения безопасности, светофорная сигнализация и шлагбаумы во многих случаях оказываются недостаточно эффективными. Причинами являются как человеческий фактор, например, нарушение водителями правил пересечения переезда, так и технические ограничения существующих систем. В связи с этим возникает необходимость внедрения инновационных решений и современных технических средств, способных существенно повысить уровень безопасности и снизить вероятность дорожно-транспортных происшествий на железнодорожных переездах.

**Факторы, влияющие на возникновение аварий:**

– несоблюдение правил водителями автомобилей (проезд на запрещающий сигнал);

– игнорирование работы шлагбаумов – несмотря на наличие заграждающих устройств, отдельные водители предпринимают попытки их объезда, что фактически сводит к нулю их защитную функцию;

– недостаточная эффективность светофорной сигнализации – водители иногда их не замечают;

– технические неисправности железнодорожной автоматики – отказы в работе систем сигнализации и управления движением создают дополнительные риски и затрудняют своевременное предупреждение участников дорожного движения;

– неблагоприятные погодные условия – плохая видимость (туман, дождь, снег, ночное время), не объективная оценка ситуации; световые, звуковые сигналы – хуже воспринимаются в шумных условиях.

**Рекомендации по повышению безопасности на переездах:**

– Внедрение искусственного интеллекта (ИИ) для постоянного мониторинга состояния переезда, включая анализ движения автотранспорта и пешеходов [3].

Искусственный интеллект способен эффективно устранять человеческий фактор и снижать риски, обеспечивая более высокую степень безопасности на железнодорожных переездах [4]:

– оперативно обрабатывать большие объемы данных, поступающих от различных сенсоров и камер;

– адаптироваться к изменяющимся условиям (погода, время суток, плотность трафика) и автоматически настраивать параметры безопасности в реальном времени;

– прогнозировать аварийные ситуации на основе анализа поведения водителей и пешеходов;

– принимать решения в управлении движением на переезде.

Искусственный интеллект способен непрерывно отслеживать движение автотранспорта и пешеходов, выявлять потенциально опасные ситуации (нарушение правил пересечения, неисправность транспортного средства или неадекватное состояние при приближении к переезду) и оперативно принимать меры для их предотвращения (рисунок 1).

– Использование камер для распознавания номерных знаков автомобилей и передачи данных в ГИБДД для штрафов за нарушения.

– Интеграция с системой АЛС-ЕН для автоматического снижения скорости поезда при обнаружении опасности.

АЛС-ЕН позволяет точно контролировать движение поезда, обеспечивая ступенчатое снижение скорости при угрозе аварии.

– Оснащение переездов светодиодными полосами и табло обратного отсчёта для привлечения внимания водителей и пешеходов.

Светодиодные полосы, встроенные в дорожное покрытие, будут ярко сигнализировать пешеходам о приближении поезда, особенно в условиях плохой видимости. Табло обратного отсчёта покажет точное время до прибытия поезда, что позволит снизить вероятность импульсивных и рискованных действий, связанных с попыткой проскочить перед приближающимся поездом.

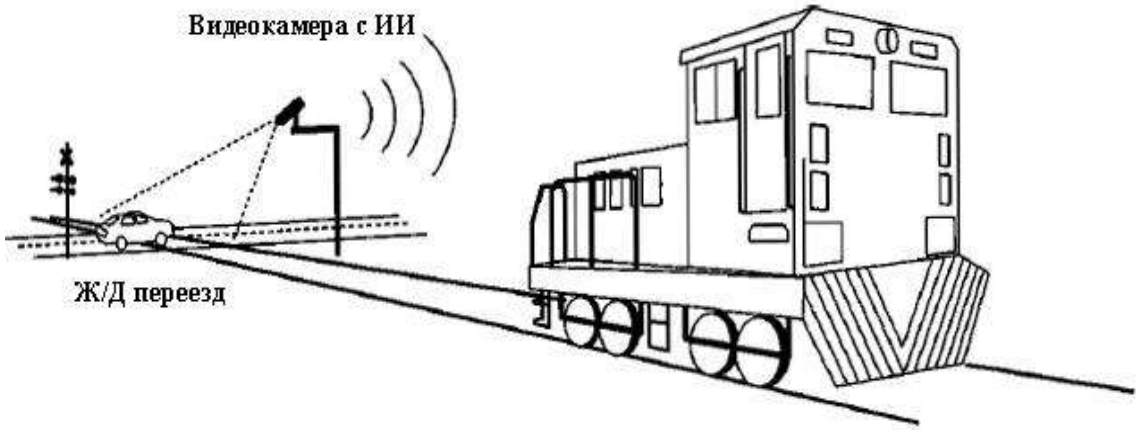



Рисунок 1 – Схема взаимодействия ИИ и управления движением на железнодорожном переезде

Таким образом, повышение уровня безопасности на железнодорожных переездах требует внедрения современных технологий, прежде всего систем, основанных на искусственном интеллекте. Использование ИИ обеспечивает своевременное выявление потенциально опасных ситуаций и их предотвращение, что существенно снижает влияние человеческого фактора на аварийность. Кроме того, такие системы могут интегрироваться с существующими средствами контроля, включая АЛС-ЕН, камеры видеонаблюдения и светодиодные индикационные устройства, создавая комплексный и скоординированный подход к управлению безопасностью. Применение подобного сочетания инновационных решений способствует значительному снижению числа дорожно-транспортных происшествий и повышению уровня защиты жизни и здоровья участников движения.

**Список литературы**

1 ГОСТ 33893-2016. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики на железнодорожных переездах. Требования безопасности и методы контроля. – Вввед. 01.11.2017. – М. : Стандартинформ, 2019. – 11 с.

2 Число ДТП на железнодорожных переездах в 2024 году снизилось на 20 % – РЖД // Официальный сайт ОАО «РЖД». – URL: https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?accessible=true&id=221157 (дата обращения: 22.03.2025).

3 ИИ расширяет функционал // Сайт «РЖД Цифровой». – URL: https://rzddigital.ru/projects/ii-rasshiryaet-funktsional-/ (дата обращения: 26.03.2025).

4 **Попов, П. А.** Применение технологий искусственного интеллекта для железнодорожного транспорта / П. А. Попов // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2024. – № 1 (65). – С. 38–41. – EDN ZYYQSL.

УДК 625.8

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА АСФАЛЬТОБЕТОНОВ

*Е. П. ХОДАН, Е. М. ЖУКОВСКИЙ, С. Е. КРАВЧЕНКО*
*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

В настоящее время для определения прочностных качеств асфальтобетонов используются разрушающие методы контроля, которые подразумевают прямое испытание стандартных образцов (кернов, вырубок) до разрушения. Это вызывает необходимость использования большого количе-

ства образцов, что снижает эффективность работы. Одним из путей решения данной проблемы могли бы стать неразрушающие методы контроля прочности асфальтобетона.

Определение прочности асфальтобетона неразрушающими методами – это комплекс подходов, позволяющих оценить механические свойства асфальтобетонного покрытия (в первую очередь – его прочность, модуль упругости, несущую способность) без повреждения или разрушения образца или дорожной конструкции. Такие методы особенно важны при обследовании действующих дорог, аэродромов и других объектов, где невозможно или нежелательно проводить разрушительные испытания.

На данный момент для асфальтобетона неразрушающие методы контроля прочности не используются, а получили свое распространение только неразрушающие методы контроля плотности. К таким методам можно отнести радиоизотопный метод определения плотности с помощью гамма-плотномера и электромагнитный, основанный на корреляции плотности и диэлектрических свойств асфальтобетона с учетом его температуры, импульсный метод, вибрационные методы, методы инфракрасной термографии и др.

На сегодняшний день наибольшее распространение в мировой практике получили два типа приборов определения плотности асфальтобетонов неразрушающими методами:

– приборы, основанные на использовании радиоактивного ионизирующего гамма-излучения (радиоизотопные плотномеры);

– приборы, основанные на корреляционной зависимости плотности асфальтобетона и его диэлектрической проницаемости.

Первые неразрушающие радиоизотопные плотномеры были разработаны в 1950-х годах и использовали проникающие свойства ионизирующего излучения через материал в качестве индикатора плотности [1]. Чем больше плотность материала, тем меньше проникает излучение и происходит его ослабление. Наибольшее распространение получил радиоизотопный плотномер 3440P ROAD READER производства компании TROXLER.

Измерение влажности асфальтобетона во время определения плотности имеет важное значение, так как сильно влияет на количество проникающих или отраженных гамма-лучей и, соответственно, полученную с помощью прибора плотность асфальтобетона.

Как правило одно измерение плотности длится 1–4 минуты.

Методика определения плотности асфальтобетона радиоизотопным плотномером нормирована в Российской Федерации [2] и в США [3].

В отличие от радиоизотопных плотномеров приборы, основанные на измерении диэлектрической проницаемости асфальтобетона (далее – плотномеры), получили свое распространение позже, с конца 1990-х годов. Наибольшее распространение в мире получили приборы, которые производит компания TransTech Systems (США). Все приборы этой компании в своем названии имеют индекс PQI, что расшифровывается как Pave Quality Indicator, или «индикатор качества асфальтобетонного покрытия». В основу работы плотномера положена фундаментальная зависимость плотности асфальтобетона от его диэлектрической проницаемости. Основой измерительной схемы плотномера являются источник электрического поля и его приемник. Также плотномеры PQI оборудованы инфракрасным термометром и измерителем влажности материала. При измерении плотности одновременно измеряются температура покрытия и его влажность и вносится поправка в измеренную плотность, так как влажность и температура оказывают сильное влияние на диэлектрическую проницаемость асфальтобетона.

Метод определения плотности с помощью плотномера нормирована в Российской Федерации [3] и в США [4, 5].

Метод импакт-эхо относится к импульсным методам акустической эмиссии и опирается на распространение упругих волн в испытываемой среде. В случае падения упругой волны на границу раздела сред с различным акустическим сопротивлением, при неперпендикулярном падении волны происходит ее разделение, часть энергии передается волной, отраженной от границы раздела сред, а часть проникает через границу в виде преломленной волны. Восприимчивость к отражению волн на границе раздела двух сред характеризуется коэффициентом отражения.

В методе импакт-эхо упругие волны генерируются в результате удара стального шарика о поверхность испытываемого элемента.

Перемещения частиц поверхности элемента, вызванные возвращением отраженных волн, регистрируются с помощью пьезоэлектрического датчика вибрации, расположенного в непосредствен-

ной близости от места возбуждения волн. Основным элементом оборудования является ударник со стальным сердечником. Применение данного метода эффективно для обнаружения дефектов бетонных плит, таких как расслоения, пустоты, трещины; измерения толщины бетонных плит; контроля качества сцепления между слоем свежеуложенного бетона и слоем основания; определение глубины поверхностных трещин, в том числе заполненных водой. Однако для асфальтобетонов данный метод недостоверный.

Методы динамического нагружения также можно отнести к импульсным методам. При проведении испытаний используются динамические прогибомеры (например, FWD – Falling Weight Deflectometer), которые воздействуют на поверхность покрытия кратковременной ударной нагрузкой (например, падающим грузом) и измеряют реакцию покрытия – прогиб или ускорение. По величине прогиба и форме прогибограммы определяют модуль упругости асфальтобетонного слоя и несущую способность всей дорожной конструкции. Прочность косвенно оценивается через модуль деформации.

Радиометрические и диэлектрические методы применяются в основном для оценки однородности, толщины слоёв и влажности, но при наличии калибровочных зависимостей – и для косвенной оценки прочности. Измеряются электромагнитные характеристики материала (например, диэлектрическая проницаемость), которые коррелируют с влажностью, плотностью и, косвенно, с прочностью.

Методы инфракрасной термографии применяются в основном для диагностики дефектов, а не прямого измерения прочности. Анализ распределения температуры на поверхности позволяет выявить зоны с разной теплопроводностью, что может указывать на неоднородность структуры и, следовательно, на изменение прочностных характеристик [6].

Принципом действия ультразвукового метода является измерение скорости распространения ультразвуковых волн через материал. Скорость зависит от плотности, упругих свойств и целостности структуры. В настоящее время ультразвуковой метод не разработан для асфальтобетонов.

**Список литературы**

1 **Goel, A.** Nondestructive testing of asphalt pavements for structural condition evaluation: a state of the art / A. Goel, A. Das // Nondestruct Test Eval. – 2008. – Vol. 23, is. 2. – P. 121–140.

2 ГОСТ Р 58401.22-2019. Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Определение плотности слоя неразрушающими методами. – Введ. 07.06.2019. – М. : Стандартинформ, 2019. – 8 с.

3 ASTM D2950/D2950M. Standard Test Method for Density of Bituminous Concrete in Place by Nuclear Methods . – URL: https://pdfcoffee.com/astm-d2950-pdf-free.html (date of access: 12.09.2025).

4 ASTM D7113. Standard Test Method for Density of Bituminous Paving Mixtures in Place by the Electromagnetic Surface Contact Methods. – URL: https://store.astm.org/d7113_d7113m-10r16.html (date of access: 12.09.2025).

5 AASHTO T 343-12. Standard Method of Test for Density of In-Place Hot Mix Asphalt (HMA) Pavement by Electronic Surface Contact Devices. – URL: https://informproekt.ru/docs/496051146/ (date of access: 12.09.2025).

6 **Глушков, С. П.** Выявление дефектов в усиленных композиционными материалами конструкциях методом инфракрасной термографии / С. П. Глушков, Л. Ю. Соловьев, Н. Е. Борисовская // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2015. – № 4 (35). – С. 36–42.

УДК 623.1/.7

# ТРАНСПОРТНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ НА ГОРНЫХ ПЕРЕВАЛАХ

*М. Н. ХОДЖАКУЛОВ*
*Андижанский государственный технический институт, Республика Узбекистан*

Построенные участки автомобильной дороги «Ташкент – Ош» (116–195 км) и железной дороги «Ангрен – Пап» на перевале «Камчик» на гребне Кураминского хребта (протяженность новой железной дороги –123,1 км, тоннеля «Камчик» –19,2 км**)** создали новые проблемы в обеспечении безопасности автодорожного и железнодорожного движения.

Через перевал проходит единственная транспортная магистраль республики, соединяющая Ферганскую долину с остальной частью Узбекистана – автомобильная трасса между Ташкентской областью и Папским районом Наманганской области.

На этом участке почти ежегодно (в основном с ноября по февраль) снежные лавины (имеются 44 лавиноопасных участка) являются причиной остановки движения транспорта и дорожно-транспортных происшествий.

Оползнеопасные, селеопасные участки и камнепады тоже создают реальную угрозу безопасности движения на этом участке.

Ежедневно по данному направлению следуют до 20 составов с различным грузом. Интенсивность движения на перевале «Камчик» автомобильной дороги «Ташкент – Ош» составляет 10–15 тыс. авт./сут. По новой железной и автомобильнй дороге в основном перевозятся нефть и нефтепродукты, химические и минеральные удобрения, которые являются аварийно химически опасными и пожаро-взрывоопасными веществами.

Для обеспечения безопасного проезда транспорта на опасных участках перевала установлены защитные инженерные сооружения.

Но в горной местности «...применение стационарных средств защиты в период строительства, т. е. сооружение противолавинных галерей, дамб, холмов, снегоудерживающих, снегорегулирующих или тормозящих устройств либо чрезвычайно дорого, либо нецелесообразно» [1, с. 1].

В этих условиях имеет особое значение раннее выявление источников опасности на перевале, организация и осуществление систематического мониторинга и контроля за ними.

В настоящее время на перевале создана инфраструктура для обеспечения безопасности дорожного движения, организовано постоянное дежурство специальных поисково-спасательных формирований Государственной системы предупреждения и действий в чрезвычайных ситуациях (ГСЧС) Республики Узбекистан. На перевале систематически отслеживаются изменения погоды, количество осадков и толщина снега, состояние оползнеопасных участков и мест схода камней, в необходимых местах устанавливаются дополнительные защитные устройства.

Для реагирования на чрезвычайные ситуации (ЧС) функциональные и территориальные подразделения ГСЧС Республики Узбекистан проводят спасательные операции, эвакуируют людей и зимой создают пункты обогрева.

Министерство по чрезвычайным ситуациям Республики Узбекистан регулярно проводит тактико-специальные учения гражданской защиты на перевале, имитируя различные сценарии, чтобы отработать действия служб на случай экстренных ситуаций.

Несмотря на крупномасштабные мероприятия по уменьшению количества дорожно-транспортных происшествий, на перевале продолжаются случаи остановки движения из-за снежных лавин, камнепадов и оползней.

Например, 23 января 2017 года в районе перевала «Камчик» перевернулось несколько вагонов грузового поезда. Тогда в районе перевала «Камчик» сошел оползень.

Чтобы предотвратить подобные случаи и обеспечивать безопасность движения поездов, дополнительно построено 72 инженерные конструкции.

В марте 2025 года из-за снегопада движение автотранспорта через перевал «Камчик» было остановлено. Спасатели МЧС помогли водителям, чьи машины застряли в снегу. Открыты пункты обогрева. Почти 1000 человек размещены в столовых и гостиницах. Запущен дополнительный рейс поезда из Ташкента в Андижан.

Заранее определить место и время возникновения некоторых из них не представляется возможным из-за пересечённых горных условий и больших объёмов работ по мониторингу и прогнозированию ЧС на участке автомобильной и железной дороги.

Все эти мероприятия требуют больших материальных и финансовых средств. В целях экономии этих ресурсов предлагается использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) местного производства для мониторинга и прогнозирования ЧС на перевале.

При этом необходимо учесть дефицит сил и средств, личного состава при начальной фазе ликвидации ЧС. Возможность доставки средств связи, спасательных средств и предметов жизнедеятельности в зоны ЧС напрямую пострадавшим ограничивается отсутствием дорог, необходимых средств и возможностей.

Практический опыт (например, снежные лавины, оползень, камнепады на перевале «Камчик» и прорыв дамбы Сардобинского водохранилища Сырдарьинской области, землетрясения) показал, что при профилактике, локализации и ликвидации ЧС для оповещения населения нужно привлекать мобильные средства (автомобили, катера, лодки), стационарные установки (на зданиях, сооружениях), оснащенные громкоговорящими и сигнальными установками.

В этих условиях использование БПЛА с соответствующим программным обеспечением позволяет одному оператору управлять несколькими БПЛА, дает возможность охвата больших территорий, оперативного изменения передаваемой информации, автоматического автономного возвращения дронов на начальную (исходную) точку.

Основным преимуществом БПЛА является существенно меньшая стоимость их создания и эксплуатации. При ликвидации чрезвычайных ситуаций (техногенного, природного и экологического характера) важным фактором является то, что оператор БПЛА не рискует своей жизнью, в отличие от спасателей, работающих в зонах ЧС.

Отсутствие пилота снимает с БПЛА целый ряд ограничений, аппарат не имеет физиологических ограничений, снижены требования к надёжности, так как это не влечёт прямой угрозы жизни человека.

На основании систематизации материалов по вышеуказанным проблемам, результатов анализа и изучения соответствующих нормативно-правовых документов и научных исследований специалистов в этом направлении[1–5], можно сделать следующие выводы:

1 Основными задачами использования дронов на перевале являются:

– выявление аварийных ситуаций и передача соответствующей информации;

– участие в ликвидации чрезвычайных ситуаций;

– поиск и спасение пострадавших;

– оценка ущерба от ЧС.

2 Дроны также можно использовать для следующих целей:

– мониторинг территории с целью постоянного наблюдения за состоянием объектов и территорий;

– измерение и передача информации о радиационном и химическом загрязнении территории и воздушного пространства на перевале;

– инженерная разведка зон ЧС природного и техногенного характера; выявление и мониторинг зон затопления;

– мониторинг состояния автомобильной и железной дороги, нефтеи газопроводов, линий электропередач и других объектов;

– экологический мониторинг водоемов и побережий;

– определение и уточнение точных координат зон ЧС и поврежденных объектов;

– доставка мелких и специальных грузов и инструмента в районы ЧС и особой опасности, где произошли террористические акты.

**Список литературы**

1 **Гербер, А. Р.** О профилактических методах борьбы с лавинами в период строительства и содержания горных железных дорог : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.13 / А. Р. Гербер. – М., 1984. – 182 с.

2 **Тушинский, Г. К.** Ледники, снежники, лавины / Г. К. Тушинский. – М. : Географгиз, 1979. – 263 с.

3 Организация инженерной защиты населения и территорий : учеб. В 4 ч. Ч. 1. Прогнозирование инженерной обстановки в чрезвычайных ситуациях / под общ. ред. Ю. Н. Тарабаева. – Химки, 2017. – 184 с.

4 **Тушинский, Г. К.** Лавины. Возникновение и защита от них / Г. К. Тушинский. – М. : Географгиз, 1969. – 352 с.

5 Узбекистан начал выпуск беспилотников. – URL: https://www.spot.uz/ru/2022/01/18/lochin-drone/ (дата обращения 23.10.2025).

УДК 378.16

## ОРГАНИЗАЦИЯ СОВМЕСТНОЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ОБЛАСТИ ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

*А. Л. ХРАМЦОВ*
*Унитарное предприятие «Нефтебитумный завод», Республика Беларусь*

*И. М. ЦАРЕНКОВА, Д. Ю. АЛЕКСАНДРОВ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Результатом функционирования белорусских технических университетов в конечном итоге должна стать подготовка высококвалифицированных инженеров, способных к инновационной и исследовательской деятельности, которые впоследствии обеспечат технологический суверенитет нашей страны и

позволят нарастить экспорт научно-исследовательских услуг и произведенной на территории Беларуси продукции. С этой целью разработана Концепция развития инженерного образования [1]. Перспективными в концепции названы инженерные специальности, связанные с информационными технологиями и робототехникой, применяемыми в стратегических направлениях (медицина, управление производством, транспорт, космическая отрасль и пр.). Но в тоже самое время ключевое значение для стабильного функционирования национальной экономики имеют и большое количество классических инженерных специальностей. Например, выпускники специальности «Автомобильные дороги» (с 2025 года приема специальность называется «Строительство транспортных коммуникаций») ежедневно обеспечивают безопасность и бесперебойность транспортного сообщения между всеми населенными пунктами нашей страны.

Концепция развития инженерного образования предусматривает достаточно большой комплекс мероприятий. Применительно к специальностям строительного профиля можно отметить следующие направления работы [1]:

– создание совместно с ведущими предприятиями новых центров компетенций, лабораторий в учреждениях высшего образования;

– развитие материально-технической и учебно-лабораторной базы учреждений высшего образования инженерного профиля;

– создание в учреждениях высшего образования инновационной инфраструктуры (сети студенческих и молодежных конструкторских бюро), обеспечивающей генерацию, поддержку и внедрение молодежных инициатив;

– привлечение студентов, обучающихся по инженерным специальностям, и учащихся профильных классов инженерной направленности учреждений общего среднего образования к выполнению совместных учебно-исследовательских проектов.

Материально-техническая и учебно-лабораторная базы являются ключевым элементом системы инновационного развития. Создание современных лабораторий в учреждениях высшего образования должно базироваться на следующих принципах:

1 Инновационность и актуальность. При формировании перечня лабораторного оборудования необходимо четко понимать тренды развития отрасли в средне- и долгосрочной перспективе.

2 Междисциплинарность. Современные научные практикориентированные исследования подразумевают системный подход к решению любой проблемы.

3 Гибкость и модульность. Лаборатории должны без значительных затруднений адаптироваться под изменения образовательных программ и технологических процессов реальных производств.

4 Возможность интеграции. Оснащение лаборатории максимально возможным количеством лабораторного оборудования не всегда целесообразно. Тесное взаимодействие с передовыми предприятиями и заказчиками кадров позволит объединить лабораторные базы для проведения совместных исследований.

Для дорожной отрасли основными задачами в перспективе являются обеспечение надежности и долговечности дорожных покрытий и снижение затрат на реализацию жизненного цикла дорожной одежды. 95 % республиканских автомобильных дорог с капитальным типом дорожной одежды имеют асфальтобетонное покрытие, поэтому вопросам управления процессами структурообразования при приготовлении асфальтобетонной смеси и поведения асфальтобетона под воздействием климатической и транспортной нагрузки должно уделяться повышенное внимание в исследовательских лабораториях.

Свойства дорожного битума зависят от качества исходного сырья, они непостоянны в различные периоды года. Совершенствование составов и технологии асфальтобетона невозможно без непосредственного участия в этом процессе производителя вяжущего.

Среди отечественных производителей органических вяжущих для дорожной отрасли одну из ведущих позиций занимает унитарное предприятие «Нефтебитумный завод» (Минская область, Червенский район). Перечень производимой продукции включает в себя дорожные битумы всех марок, битумные эмульсии всех марок (в том числе и модифицированные), мастики, модифицированные битумы (латекс, SBS-полимеры), органоминеральные складируемые ремонтные смеси и т. д.

Унитарное предприятие «Нефтебитумный завод» имеет в своем составе специализированные испытательные аккредитованные лаборатории, в которых оцениваются не только стандартные показатели качества битума, но и его реологические свойства. Учет реологических свойств битумов необходим для понимания и моделирования процессов деформаций и течения вяжущего под нагрузкой. Имеется возможность моделирования процесса старения битумных вяжущих материалов в лабораторных условиях.

Механизм взаимодействия производителя органического вяжущего и учреждения образования, осуществляющего подготовку инженеров для дорожной отрасли, в направлении прикладных научных исследований предполагает передачу продукции университетским исследователям (студенты и преподаватели) с целью оценки ее пригодности для приготовления усовершенствованных составов асфальтобетонных смесей и иных битумоминеральных материалов, а также совместную работу по модификации (снижение вязкости, повышение температурной устойчивости без ухудшения физико-механических и эксплуатационных свойств) органических вяжущих различными добавками под конкретные условия использования. Исследовательская работа студентов-дорожников, обучающихся по специальности «Строительство транспортных коммуникаций», в рамках озвученного механизма может быть реализована при изучении дисциплин «Материаловедение в транспортном строительстве», «Технологии битумоминеральных материалов», «Инновационные технологии и материалы в транспортном строительстве» и «Планирование эксперимента и статистическая обработка экспериментальных данных». Итоговая аттестация по специальности «Строительство транспортных коммуникаций» проводится в форме защиты магистерской диссертации.

Эффективность совместной работы предприятия и университета при реализации совместных научных проектов не всегда может быть объективно и всесторонне оценена в краткосрочной перспективе. Следует учитывать и потенциальное влияние на всю дорожную отрасль в будущем. Показателями эффективности результатов совместных научных исследований производителя органического вяжущего и учреждения образования, осуществляющего подготовку инженеров для дорожной отрасли, можно назвать:

– расширение номенклатуры горячих и теплых асфальтобетонных смесей для дорожного строительства, приготавливаемых на асфальтобетонных заводах;

– расширение номенклатуры асфальтобетонных смесей с повышенными декоративными качествами для жилищно-коммунального хозяйства;

– расширение номенклатуры асфальтобетонных смесей с добавкой местных некондиционных материалов и техногенных отходов;

– отказ от сезонности и максимально возможное сокращение времени простоя в организации работы асфальтобетонного завода за счет расширения номенклатуры битумоминеральных смесей (складируемые смеси, холодные смеси и пр.) и изделий из них (асфальтобетонные плиты и пр.);

– увеличение уровня загрузки асфальтобетонных заводов (на сегодняшний день асфальтобетонные заводы загружены на 50–60 % );

– создание дополнительных рабочих мест на асфальтобетонных заводах.

**Список литературы**

1 Концепция развития инженерного образования в Республике Беларусь на период до 2035 года : утв. постановлением Совета Министров Респ. Беларусь 15.05.2025 г. № 264 // ЭТАЛОН: информ.-поисковая система (дата обращения: 01.10.2025).

УДК 625.7

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЖЁСТКИХ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

*И. М. ЦАРЕНКОВА, И. П. ЗУЕВ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В Республике Беларусь в свете стремительного роста строительства бетонных дорог особенно остро возникает проблема качественного обслуживания и диагностики бетонных покрытий. Согласно данным Министерства транспорта Республики Беларусь, объемы строительства цементобетонных покрытий ежегодно увеличиваются на десятки процентов, что обусловлено преимуществами бетонных дорог перед асфальтобетонными. Однако быстрый рост протяженности таких дорог вызывает потребность в совершенствовании методов диагностики и оценки их состояния, так как традиционная техника осмотра зачастую оказывается неэффективной.

Проблема усугубляется отсутствием универсальных стандартов и единых методик диагностики, что создает предпосылки для неэффективного расходования бюджетных средств и непринятия своевременных мер по восстановлению дорог.

Этот фактор подчёркивает острую необходимость в разработке унифицированной системы диагностики и мониторинга, способной сократить расходы на ремонт и поддержание дорог, повысить их эксплуатационную готовность и безопасность. Именно такую систему предлагается создать в рамках настоящего исследования.

*Теоретический обзор и постановка.* Жёсткие дорожные покрытия – это разновидность дорожных покрытий, выполненных преимущественно из цементобетона, обладающих высокими показателями прочности и долговечности.

Диагностика состояния жёстких дорожных покрытий предполагает совокупность методов и приёмов, направленных на выявление дефектов, повреждений и оценку степени износа покрытия. Современные методы диагностики постоянно эволюционируют, стремясь удовлетворить возросшие требования к точности и оперативности. В настоящее время принято выделять 3 категории методов диагностики. Классические методы – визуальный осмотр, измерение геометрических параметров, лабораторный анализ материалов. Современные методы – термографические исследования, лазерное сканирование, георадарное зондирование, использование беспилотных летательных аппаратов. Компьютерные методы анализа – искусственный интеллект и компьютерное зрение, моделирование и симуляция. Важно отметить, что большинство современных методов обладают уникальными особенностями, но ни один из них не способен самостоятельно решить все задачи диагностики. Поэтому оптимальным решением представляется комбинация нескольких методов, образующая комплексное средство оценки состояния покрытия.

Зарубежные страны активно развивают передовые технологии диагностики и оценки состояния дорог, добиваясь высоких результатов в повышении долговечности и безопасности дорожного покрытия. Рассмотрим основные направления зарубежного опыта. США внедряют автоматизированные системы, позволяющие осуществлять постоянный мониторинг состояния дорог. Канада использует автомобили с установленными сенсорами и камерами, осуществляющие сбор данных о состоянии покрытия в режиме реального времени. Применяет специальное ПО для обработки собранных данных и построения графиков и отчетов. В Европе успешно практикуют аэрофотосъемку дорог и спутниковую диагностику для быстрой оценки покрытия на больших территориях. Европейская инициатива TRANS-ROAD собирает данные обо всех европейских дорогах, централизуя информацию о состоянии покрытия. Запускают дроны для регулярного мониторинга состояния дорог и составления цифровых карт покрытия. Япония лидирует в использовании роботизированных устройств и технологий искусственного интеллекта для оценки состояния дорог. Японцы разработали уникальную систему предупреждения о возникновении дефектов на ранней стадии, предотвращая аварийные ситуации. Итоги зарубежного опыта – это универсальность и многофункциональность используемых методов, большее внимание к профилактическим мерам и диагностике на ранних стадиях, широкое применение автоматизированных систем и высокотехнологичных устройств.

*Методы диагностики и оценки состояния жёстких дорожных покрытий.* Диагностика состояния дорожных покрытий направлена на выявление дефектов поверхности и внутреннего строения, оценку качества материалов и прогнозирование остаточного ресурса покрытия. Каждый метод относится к одному из трёх основных классов. Контактные методы предполагают физический контакт с поверхностью покрытия. При неконтактных методах диагностика проводится без прямого контакта с поверхностью. Комбинированные методы объединяют контактные и неконтактные подходы. Наибольшего успеха достигают комбинированные методы, объединяющие несколько подходов для всестороннего анализа состояния покрытия.

*Наиболее популярные современные методы диагностики состояния жёстких дорожных покрытий.* Георадарные исследования – излучение радиоволн вглубь покрытия и фиксация отражённых сигналов. Позволяет обнаружить скрытые дефекты, такие как воздушные полости, влагонасыщенные зоны, расслоения. Лазерное сканирование – скрупулёзное фотографирование поверхности с последующим созданием 3D-моделей покрытия. Предназначено для оценки геометрии покрытия, выявление неровностей и дефектов. Инфракрасная термография – фиксирует температуру поверхности и выявляет аномалии, вызванные дефектами. Предназначена для ранней идентификация про-

блемных зон. Фотограмметрические методы – использование фотографий для создания цифровых моделей покрытия и выявления искажений. Предназначена для контроля качества покрытия и выявления потенциальных проблем. Роботизированные системы диагностики – установка датчиков и сенсоров на специализированные автомобили или роботы, проводящие диагностику автоматически. Позволяет масштабно и регулярно обследовать дороги. Таким образом, каждый метод имеет свои уникальные характеристики и подходит для решения определенных задач. Комбинация методов способна обеспечить полную и подробную картину состояния покрытия, что гарантирует эффективное принятие решений о необходимом ремонте или профилактике.

После сбора данных с помощью диагностических методов наступает стадия их анализа и вынесения оценки состояния покрытия. Процедура включает несколько этапов: обработка и фильтрация данных, первичное удаление некорректных значений, калибровка показаний, объединение данных из разных источников. При анализе и интерпретации данных, используя полученные данные, строится карта распределения дефектов, определяются размеры и расположение повреждений. При классификации дефектов каждое выявленное повреждение оценивается по степени опасности и требуемым действиям. Определение уровня деградации покрытия: установлены пять стандартных уровней состояния покрытия от «идеально сохранённое» до «крайне опасное». Принятие решений о мерах профилактики и ремонта: основываясь на результатах оценки, принимают решения о ремонте, восстановлении или полном изменении покрытия. Критерии оценки состояния покрытия включают физические признаки, химические и физические свойства, механические свойства. Данные критерии позволяют сформировать общую картину состояния покрытия и рекомендовать меры по его сохранению или восстановлению.

Несмотря на активное развитие методов диагностики и оценки состояния дорожных покрытий, сохраняется ряд серьезных проблем и ограничений, препятствующих достижению максимальной эффективности. Стоимость оборудования и операций: многие современные методы требуют дорогостоящее оборудование и программное обеспечение, что удорожает процесс диагностики. Человеческий фактор: даже самые современные методы нуждаются в специалистах высокой квалификации, способных верно интерпретировать результаты. Погода и окружающая среда: большинство методов плохо приспособлено к неблагоприятным погодным условиям, что осложняет диагностику в зимний период и в дождливую погоду. Таким образом, несмотря на прогресс в диагностике, текущие методы и технологии оставляют много вопросов, требующих разрешения. Решение этих проблем лежит в плоскости разработки новых подходов, упрощения диагностики и стандартизации процесса оценки состояния дорог.

*Экономическое обоснование предложенных методов диагностики.* Для начала рассмотрим затраты на диагностику состояния дорожного покрытия традиционным методом. Оплата рабочей силы – 1800 бел. руб., амортизация оборудования – 360 бел. руб. транспортные расходы – 540 бел. руб. Итого общих затрат 2700 бел. руб. за одну смену диагностики. Традиционный метод диагностики прост и доступен, но обладает серьезным недостатком – низкой точностью и невозможностью выявления скрытых дефектов, что может повлечь серьезные последствия в будущем.

Теперь оценим затраты на диагностику состояния дорожного покрытия современными методами (георадар и лазерное сканирование). Аренда оборудования – 7200 бел. руб., оплата операторского персонала – 1800 бел. руб., обработка и анализ данных – 3600 бел. руб. Итого общая стоимость около 12 600 бел. руб. за однодневную диагностику. Хотя сумма затрат значительно выше, современные методы позволяют намного точнее оценить состояние покрытия, выявить скрытые дефекты и принять своевременные меры по устранению проблем, что в конечном итоге снижает будущие затраты на ремонт и повышает безопасность дорожного движения.

Да, на первый взгляд, современные методы диагностики выглядят более затратными. Однако важно учесть, что точность и глубина анализа, предоставляемые такими методами, позволяют избежать гораздо больших убытков. Раннее выявление и устранение мелких дефектов обходится дешевле, чем устранение крупномасштабных повреждений. Лучшая диагностика позволяет поддерживать дороги в хорошем состоянии, снижая риск ДТП и поломок автомобилей. Качественное покрытие снижает травматизм и потерю времени из-за задержек и аварий. В среднем экономия, достигнутая за счет превентивного ремонта и сохранения дорожного покрытия в хорошем состоянии, составляет сотни тысяч белорусских рублей в год. Таким образом, хотя первоначальные затраты на современную диагностику выше, она приносит ощутимую экономическую выгоду в среднесрочной и долгосрочной перспективе.

*Заключение.* Исследование посвящено вопросам диагностики и оценки состояния жёстких дорожных покрытий, которые играют важную роль в функционировании транспортных сетей и обеспечивают безопасность движения. Были рассмотрены традиционные и современные методы диагностики, определены их преимущества и недостатки. Анализ экономической эффективности показал, что, несмотря на первоначальные затраты, современные методы диагностики позволяют существенно экономить средства за счет предотвращения аварийных ситуаций и продления срока службы покрытия. Представлены конкретные рекомендации по выбору методов диагностики и внедрению их в практику, а также отмечены перспективы дальнейшего совершенствования диагностических технологий. Таким образом, исследование показало, что современные методы диагностики являются эффективным инструментом, позволяющим значительно повысить качество и долговечность дорожных покрытий, а также обеспечить рациональное использование бюджетных средств. Будущие исследования могут включать разработку автоматизированных систем диагностики, совершенствование методов анализа и оценку влияния климатических факторов на состояние покрытия.

**Список литературы**

1 **Иванов, И. И.** Современные методы диагностики дорожных покрытий / И. И. Иванов, П. П. Петров. – М. : Издательство АСВ, 2022. – 288 с.

2 **Семенов, Ю. А.** Ремонт и реконструкция цементобетонных покрытий / Ю. А. Семенов. – Екатеринбург : УрГУПС, 2020. – 240 с.

3 **Соколов, А. В.** Автоматизированные системы мониторинга состояния дорог / А. В. Соколов. – М. : Академия инженерных наук, 2022. – 180 с.

4 **Розанов, В. Ю.** Практика применения георадаров в диагностике дорог / В. Ю. Розанов. – Пермь : Пермский нац. исслед. политехн. университет, 2021. – 180 с.

5 International Federation of Highway Research Laboratories (IFHRL). Manual for Condition Evaluation of Flexible and Rigid Pavements. – Washington DC : IFHRL, 2021. – 140 p.

6 Всемирный конгресс по дорожному хозяйству (World Road Association, PIARC). Guidelines on the Maintenance Management System. – Paris : PIARC, 2020. – 120 p.

УДК 656.08:001.895

# ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ И ИНФРАСТРУКТУРЫ

*О. В. ЧЕРНЫШОВ, В. И. КАЗМЕРЧУК*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Современный мир характеризуется стремительным развитием технологий, что в свою очередь обусловливает необходимость постоянного совершенствования систем обеспечения транспортной безопасности. В условиях усложнения инфраструктурных объектов и увеличения объемов перевозимых грузов и пассажиров возрастает актуальность внедрения инновационных решений, направленных на повышение устойчивости транспортных средств и инфраструктуры к разнообразным видам угроз и чрезвычайных ситуаций.

*Инновации в безопасность автомобилей: как технологии спасают жизни* [1].

Новейшие автомобили уже не просто средства передвижения, они становятся высокотехнологичными устройствами, созданными для обеспечения максимальной безопасности водителя и пассажиров. Автопроизводители внедряют инновационные решения, которые делают каждую поездку более безопасной. Давайте рассмотрим, какие передовые технологии безопасности уже применяются в автомобилях и как они меняют наш подход к безопасности на дорогах.

1 Автопилот и системы помощи водителю.

Автопилот – это не фантастика, а реальность. Системы полуавтономного вождения, такие как *Tesla Autopilot*, уже доступны на некоторых моделях автомобилей. Эти системы способны управлять машиной в определённых условиях, поддерживать скорость, следить за дистанцией до впереди идущих автомобилей и даже менять полосы. В то же время они все ещё требуют внимания со стороны водителя, который должен быть готов вмешаться, если это необходимо.

Системы помощи водителю (*ADAS, Advanced Driver Assistance Systems*) включают в себя множество функций, таких как автоматическое экстренное торможение, контроль мёртвой зоны,

адаптивный круиз-контроль и система предупреждения о столкновении. Эти технологии позволяют значительно снизить риск аварий, особенно в экстренных ситуациях.

2 Системы мониторинга состояния водителя.

Системы мониторинга состояния водителя помогают избежать аварий, вызванных усталостью или недостаточной внимательностью. Такие системы отслеживают движение головы водителя, следят за его глазами и определяют признаки усталости или сонливости. Если система замечает, что водитель становится менее внимательным, она подаст сигнал, предупреждая о необходимости сделать перерыв.

Некоторые автомобили оснащены также датчиками, которые анализируют пульс водителя, и могут предупредить его о возможных медицинских рисках.

3 Активные системы защиты от боковых столкновений.

Одним из самых опасных типов аварий являются боковые столкновения, когда автомобиль сталкивается с другой машиной или объектом на высокой скорости. Чтобы минимизировать последствия таких происшествий, производители внедряют активные системы защиты. Одной из таких технологий является система активного управления подвеской, которая при боковом столкновении помогает лучше распределить ударную нагрузку по кузову автомобиля, снижая риск травм.

Кроме того, современные автомобили оснащены специальными датчиками и камерами, которые помогают водителю видеть приближающиеся объекты и избегать столкновений при манёврах, например, при поворотах или парковке.

4 Интеллектуальные подушки безопасности.

Традиционные подушки безопасности стали обязательной частью автомобилей, однако последние разработки в области безопасности включают в себя интеллектуальные подушки, которые способны адаптироваться к различным ситуациям. Например, современные системы подушек безопасности могут учитывать не только положение и размер пассажиров, но и их состояние (например, присутствие ребёнка в кресле или использование ремня безопасности). Это позволяет не только минимизировать травмы при лобовых столкновениях, но и повысить эффективность работы подушек безопасности в различных ситуациях.

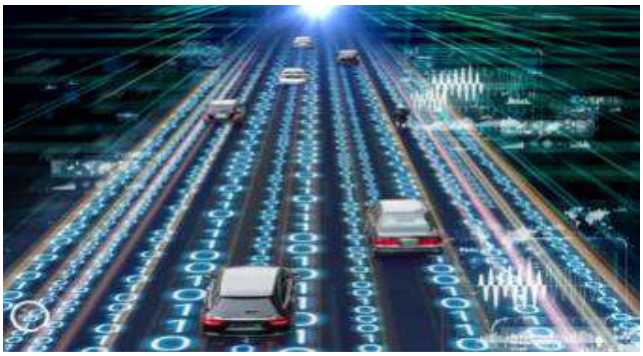


Рисунок 1 – Использование искусственного интеллекта для предотвращения ДТП

5 Предсказание аварий с использованием искусственного интеллекта (рисунок 1).

Системы на основе искусственного интеллекта начинают играть всё более важную роль в предотвращении аварий. Применение машинного обучения и анализа большого объема позволяет создать интеллектуальные системы, которые способны предсказать потенциальную угрозу аварии ещё до того, как она произойдёт. Такие системы анализируют поведение водителей и пешеходов, состояние дороги и даже погодные условия, чтобы заранее предупредить водителя или автоматически принять меры для предотвращения столкновения.

6 Противопожарные технологии и защита от взрывов.

Системы, предназначенные для предотвращения возгораний, становятся неотъемлемой частью автомобильной безопасности. Современные автомобили оснащены термодатчиками, которые могут определить перегрев двигателя или возникновение короткого замыкания, что позволяет активировать систему защиты от пожара ещё до того, как возникнет реальная угроза. В сочетании с улучшенными материалами, которые не поддерживают горение, эти технологии значительно снижают риск пожаров в случае аварии.

Хотелось бы подчеркнуть значимость представленных исследований и инновационных решений, направленных на повышение эффективности систем защиты транспортных средств и инфраструктуры. Обсужденные подходы и технологические разработки демонстрируют перспективы интеграции современных автоматизированных систем, методов кибербезопасности и сенсорных технологий в комплексные меры по обеспечению транспортной безопасности в условиях современных угроз и чрезвычайных ситуаций. Важно отметить, что реализация указанных инноваций требует междисциплинарного взаимодействия, а также активного сотрудничества научных, промышленных и государственных структур. Надеемся, что полученные знания и обмен опытом послужат основой

для дальнейших исследований и практических разработок, способствующих формированию устойчивых и безопасных транспортных систем будущего.

**Список литературы**

1 VC.RU. – URL: https://vc.ru/id3649586/1643968-innovacii-v-bezopasnosti-avtomobilei-kak-tehnologii-spasayut-zhizni (дата обращения: 28.09.2025).

2 HANSTON. – URL: https://hanston.ru/press-centr/transportnaya-bezopasnost-innovacionnye-tehnologii-i-sovremennye-metody-zaschity (дата обращения: 28.09.2025).

3 **Смирнов, Ю. А.** Электромобиль: инфраструктура и электротехнические компоненты : учеб. пособие / Ю. А. Смирнов. – СПб : Лань, 2021. – 476 с.

УДК 624.042:625.41

# ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АНКЕРНЫХ УЗЛОВ ЭСТАКАД ТРАНСПОРТНЫХ КОМПЛЕКСОВ uST С ВЫРАБОТКОЙ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

*Ю. А. ШЕБЗУХОВ, В. Н. ГАРАНИН*
*ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Республика Беларусь*

Анкерные узлы являются критически важными элементами рельсо-струнных эстакад транспортных комплексов uST [1, 2]. Их преждевременный выход из строя снижает ресурс опор, увеличивает затраты на эксплуатацию и снижает общую безопасность системы. Основными причинами их ограниченного ресурса являются коррозионные процессы и усталостное разрушение под действием динамических нагрузок и вибраций [3].

Важной особенностью работы указанных узлов являются воспринимаемые нагрузки от сил натяжения путевых структур и от движения транспортных средств − Юнимобилей [4]. По этой причине требуется системный подход к повышению долговечности, сочетающий использование таких научных подходов, как идентификация внешних факторов, численное моделирование, патентно-литературный анализ и др.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач:

– провести анализ конструкций существующих узлов и условий их эксплуатации с выделением факторов, определяющих долговечность по критериям коррозионной стойкости и усталостной прочности;

– разработать 3D-модель базового узла и выполнить математическое определение влияния факторов (силы, вибрации, окружающая среда) на геометрию и скорость развития коррозии;

– выполнить анализ литературных и патентных источников для оценки применимости известных решений;

– разработать технические решения по модернизации существующего узла;

– разработать 3D-модель модернизированного узла и анализ его долговечности;

– определить закономерности влияния факторов на конструктивные элементы для формирования типовых технических заданий.

Для решения указанных задач необходим комбинированный подход, включающий:

– численное моделирование методом конечных элементов (МКЭ) для оценки статических и динамических напряжений, собственных частот и мод колебаний;

– многофакторное моделирование коррозионного процесса с учётом геометрии, материалов и микроклиматических условий (модели экспоненциального/линейного распространения коррозии для разных сред);

– усталостный анализ по интегральным критериям накопленной деформации и циклической прочности;

– оптимизацию конструктивных решений по критериям долговечности, технологичности и экономичности.

Критериями оценки результатов МКЭ и коррозионного моделирования для исходной и модернизированной моделей являются снижение максимальных эквивалентных напряжений при рабочих режимах, повышение числа циклов до усталостного разрушения по выбранному уровню надёжно-

сти, снижение скорости локальной утраты сечения по моделям коррозии, экономическая оценка срока окупаемости модернизации через уменьшение затрат на техобслуживание и замену узлов.

Несомненно, научное исследование должно проводиться в соответствии с СТБ 1080-2011, а достоверность результатов может быть обеспечена только верификацией исходных данных и применением современных программных комплексов для выполнения конечно-элементного анализа и коррозионного моделирования.

Решение поставленных задач позволит в результате:

– классифицировать и систематизировать внешние факторы, влияющие на долговечность анкерных узлов транспортных комплексов uST, с ранжированием по степени их влияния на возникающие коррозию и усталость;

– получить математические зависимости влияния силовых и климатических факторов на изменение геометрии узла и на темп развития коррозии;

– сформировать технические решения для модернизации узла, включающие конструктивные изменения, подбор материалов и покрытий, методы защиты от вибрации и организационные мероприятия обслуживания;

– провести сравнительный анализ долговечности базовой и модернизированной конструкций анкерного узла на основе разработанных 3D моделей;

– получить набор закономерностей и эмпирических формул для формирования технических заданий под различные исходные данные;

– адаптировать механико-коррозионное моделирование и практические конструктивные решения к производственным возможностям ЗАО «Струнные технологии», которое разрабатывает транспортные комплексы uST.

Выполнение соответствующей научно-исследовательской работы на практике позволит:

– оптимизировать геометрию узла, например, увеличить радиусы закруглений в критических местах, перераспределить ребра жесткости, что приведет к снижению концентрации напряжений;

– подобрать материалы и антикоррозионную защиту на основе коррозионностойких сплавов в узловых элементах и комбинации слоёв защиты (например, гальванические покрытия в сочетании с лакокрасочными или органическими покрытиями) с учётом эксплуатационных температур и агрессивности среды;

– адекватно применять конструктивные демпферы и изоляцию вибраций для снижения амплитуды циклических напряжений;

– повысить модульность конструкций за счет обеспечения заменяемости высоконагруженных элементов без демонтажа крупной части опоры;

– организовать непрерывный мониторинг состояния конструкции путем интеграции датчиков вибрации и коррозии для прогнозирования ресурса и планирования технического обслуживания;

– предложить технологические решения по защите сварных швов и мест соединений от локальной коррозии;

– разработать регламент контрольных испытаний и критериев приёмки модернизированных узлов.

Предложенный комплексный подход позволит снизить уровень вибраций и связанное усталостное разрушение в сложно нагруженных узлах, уменьшить частоту капитального ремонта и расходы на их обслуживание, увеличить эксплуатационный ресурс и, как следствие, повысить безопасность и надёжность транспортных комплексов uST. По этой причине полученные результаты имеют высокий потенциал применения и внедрения как на пилотных линиях, так и при подготовке технических заданий для серийного производства комплексов.

Таким образом, предлагаемая работа по повышению долговечности анкерных узлов обеспечивает системный переход от анализа факторов повреждаемости к практическим конструкторским решениям, адаптированным к производственным возможностям ЗАО «Струнные технологии». Результаты работы позволят найти и реализовать способы повышения долговечности и безопасности анкерных узлов не только рельсо-струнных эстакад uST, но и аналогичных элементов других наземных транспортных комплексов.

**Список литературы**

1 **Юницкий, А. Э.** Транспортно-инфраструктурные комплексы Юницкого как комплексное решение транспортных проблем в области энергоэффективности, экологичности и безопасности / А. Э. Юницкий, С. В. Артюшевский // Транспорт России: проблемы и перспективы : материалы междунар. науч.-практ. конф., 9–10 нояб. 2022 г., г. С.-Петербург. – СПб. : ИПТ РАН, 2022. – С. 139.

2 **Юницкий, А. Э.** Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе / А. Э. Юницкий. – Силакрогс : ПНБ принт, 2019. – 576 с.

3 **Беляев, А. К.** Современные проблемы усталости и разрушения машиностроительных и строительных конструкций / А. К. Беляев, А. А. Беляев, А. В. Гадолина // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2020. – № 7 (103). – С. 1–15.

4 **Юницкий, А. Э.** Влияние внешних факторов на вероятность возникновения резонанса в системе «струна – подвижной состав» // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2023. –№ 2. – С. 79–82.

УДК 625.7

# ПОПУЛЯРИЗАЦИЯ АКТИВНОГО ОБРАЗА ЖИЗНИ: НАСКОЛЬКО ПЕШЕХОДНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА ГОТОВА К ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ

*Н. И. ШИШКО*
*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

*А. Ю. ДАШКОВСКИЙ*
*Государственное предприятие «Белгипродор», г. Минск*

Современное общество не стоит на месте, постоянно появляются новые тренды, направления и веяния. Порой они являются просто маркетинговыми ходами для продвижения очередной партии чьей-то продукции, а порой вызваны действительно важными изменениями и тенденциями в мире.

Популяризация активного образа жизни: использование средств персональной мобильности (далее – СПМ) при передвижении, таких как велосипеды, самокаты и просто ходьба пешком, в нстоящее время активно продолжает продвигаться в массы. Особое внимание также привлекается здесь и к тому аспекту, что все эти виды средств передвижения являются «экологически чистыми», не наносящими вреда окружающей среде.

Несомненно, здоровье населения – это один из немаловажных факторов, оказывающих влияние на положительную динамику экономического роста и развития региона, стран в целом. Вопрос обеспечения безопасности передвижения всех групп участников дорожного движения остается актуальным в мировых масштабах по-прежнему, а учитывая рост спроса на дорожную инфраструктуру для обеспечения безопасного передвижения велосипедистов, пешеходов и иных пользователей СПМ, возникает опасение: на сколько существующая инфраструктура готова к полноценному обеспечению инклюзивной и безопасной среды уже сейчас и что еще необходимо предусмотреть, учитывая рост пользователей СПМ и приверженцев «экологически чистых» средств передвижения, для поддержания безопасности передвижения.

В мае 2025 года на восьмой Глобальной неделе безопасности дорожного движения Организации Объединенных Наций, которая проходила под девизом «Обеспечить безопасность пешеходов и велосипедистов», Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) представила новое методическое руководство, призванное содействовать работе правительств по развитию активной мобильности путем повышения ее безопасности [1]. Мировая статистика остается неутешительной – ежегодно погибает около 1,2 млн человек в результате дорожно-транспортных происшествий, четверть от этого числа – это наиболее уязвимые участники дорожного движения: велосипедисты и пешеходы. В целом за период последних пятнадцать лет среднемировые показатели смертности пешеходов немного снизились, а среди велосипедистов – остались на том же уровне. Однако есть ряд регионов, где прирост смертности уязвимых групп участников дорожного движения продолжается [1].

В целом привлечение внимания к активному образу жизни, к использованию «экологически чистых» средств передвижения – верные направления, которые помогут формированию более «здоровых» привычек у населения. Эта задача будет выполнимой при соблюдении условий обеспечения безопасности передвижения, а для этого необходимо полноценное внедрение целого ряда действий и дополнительных мер на правительственном уровне.

Основные направления, по которым рекомендуется проводить работу [1, 2]:

1 Интеграция пешеходного и велосипедного движения в стратегии в области транспорта, здравоохранения, охраны окружающей среды и образования (формирование комплексного понимания задач и подхода к их решению как со стороны населения, так и со стороны правительств и ве-

домств, установление четких целевых показателей и путей их достижения через внедрение систем межведомственной координации и подотчетности, обеспечение мониторинга и независимого аналитического исследования).

2 Создание безопасной дорожной инфраструктуры, включая оборудование тротуаров, пешеходных переходов и защищенных велосипедных дорожек (усиление контроля за исполнением действующей нормативно-технической базы в области объектов градостроительства и транспортной инфраструктуры, разработка и внедрение новых стандартов по созданию безопасной среды как в городской застройке, так и за ее пределами).

3 Установление и обеспечение соблюдения более безопасных ограничений скорости в соответствии с передовым мировым опытом (усиление законодательства по вопросам безопасности дорожного движения, расширение возможностей местных органов власти, усиление мер контроля, пересмотр и усиление системы административных и уголовных наказаний в соответствующих сферах, связанных с обеспечением безопасности передвижения).

4 Содействие более безопасному пользованию дорожной сетью посредством кампаний по информированию общественности и по изменению поведения (проведение информационных кампаний на государственном уровне, развитие структур общественного транспорта и дорожной инфраструктуры с интеграцией новых возможностей по безопасному передвижению наиболее уязвимых участников дорожного движения, стимулирование более ответственного отношения со стороны населения и внедрение механизмов поощрения).

5 Использование финансовых стимулов для поощрения активной мобильности с соблюдением требований безопасности.

Обращаясь к статистике дорожно-транспортного травматизма в Республике Беларусь за период первого квартала 2025 года (январь – март), в сравнении с аналогичным периодом 2024 года, наблюдается общее снижение количества дорожно-транспортных происшествий (далее ДТП) на 1,3 % и снижение числа раненых – на 8,9 %, однако число смертельных исходов в целом выросло на 13,4 % [3]. Наиболее распространенной категорией ДТП, где фиксируется смертность и тяжелые ранения, являются ДТП с участием механического транспортного средства и пешехода (39,6 % от общего числа ДТП за представленный период). Основными причинами и условиями, способствовавшими совершению ДТП, стали нарушения правил дорожного движения как водителями, так и пешеходами [3].

Примечательно то, что в разрезе категорий участников дорожного движения, попавших в ДТП, возросло количество пострадавших пешеходов и не использующих средства персональной мобильности (прирост составил 5,7 %), а также тех, кто использовал СПМ – прирост 25 %, прирост пострадавших велосипедистов составил 14,3 % [3]. По данным ГУ ГАИ МВД, за представленный период возросло количество ДТП, в которых пострадавшие пешеходы находились в состоянии алкогольного опьянения (21,6 % от числа погибших и 13,6 % от числа травмированных) [3].

Отчетность за представленный период (первый квартал 2025 г.) не будет являться абсолютно показательной ввиду того, что в разрезе ДТП с участием пешеходов и велосипедистов большую роль играет фактор сезонности, а это значит, что с улучшением погодных условий будет увеличиваться количество лиц, использующих СПМ, и велосипедистов, а в летний период будет наблюдаться увеличение передвижения несовершеннолетних граждан.

Статистика ДТП в нашей стране находится на общемировом уровне, что говорит о том, что принятие дополнительных мер, пересмотр существующих нормативов, а также увеличение зоны ответственности и ужесточение мер за несоблюдение законодательства в сферах, связанных с безопасностью движения, для нашей страны также является актуальным вопросом.

Новыми шагами в направлении повышения общей безопасности движения можно считать принятие Указа Президента Республики Беларусь № 295 об изменении Правил дорожного движения, где основные нововведения коснулись и средств персональной мобильности: необходимость регистрации СПМ, ужесточение ответственности за нарушение правил дорожного движения. Также отмечены тенденции по усилению общественной безопасности путем привлечения к мониторингу дорожной ситуации наиболее перспективных технологий с высоким уровнем автоматизации [4].

Актуальность безопасности передвижения должна осознаваться как на общегосударственном уровне, так и в разрезе отдельных ведомств и министерств, и, что не маловажно, лично гражданами, участвующими в дорожном движении.

**Список литературы**

1 Повышение безопасности пешеходов и велосипедистов – один из ключевых элементов безопасности дорожного движения и охраны здоровья населения // ВОЗ. – URL: https://www.who.int/ru/news/item/09-05-2025-safer-walking-and-cycling-crucial-for-road-safety-and-better-health (дата обращения: 10.09.2025).

2 Глобальная неделя безопасности дорожного движения ООН // Транспортная безопасность. – URL: https://www.who.-int/campaigns/un-global-road-safety-week/8th-un-global-road-safety-week (дата обращения: 10.09.2025).

3 Итоги квартала: рост числа погибших. – URL: https://tbgazeta.by/strong-svedeniya-o-kolichestve-dtp-pogibshih-i-ranen-nyhv-nih-lyudej-v-regionah-respublikiv-yanvare-marte-2024-i-2025-gg-strong-br (дата обращения: 05.09.2025).

4 Как будут контролировать и наказывать за нарушения новых ПДД в Беларуси? // Министерство финансов Республики Беларусь. – URL: https://myfin.by/article/avto/kak-budut-kontrolirovat-i-nakazyvat-za-narusenia-novyh-pdd-v-belarusi-40292 (дата обращения: 12.09.2025).

УДК 625.5+625.41

# СВОЙСТВА ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ПРИМЕРЕ СТРУННОГО ТРАНСПОРТА

*А. Э. ЮНИЦКИЙ, С. В. АРТЮШЕВСКИЙ*
*ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Республика Беларусь*

Системы, состоящие из объектов транспортной инфраструктуры, обладают комплексом свойств, определяющих их функциональные характеристики и особенности взаимодействия в рамках перевозочной деятельности. Имманентная способность транспортной системы проявлять определённые качественные характеристики в процессе установления взаимосвязей и взаимодействий при осуществлении перевозок детерминирована внутренней природой транспортной системы, особенностями её архитектуры и структурной организацией.

В современной транспортной науке принято выделять три фундаментальных типа свойств транспортных систем [1]:

1 *Структурно-функциональные свойства*, являющиеся системообразующей основой любой транспортной системы, определяющие её целостность и работоспособность.

2 *Свойства самосохранения*, формирующие способность системы поддерживать устойчивое функционирование в условиях изменяющихся внешних воздействий и внутренних трансформаций.

3 *Целевые и организационно-правовые свойства*, характеризующие стратегические аспекты поведения системы в процессе достижения генеральных целей.

Эти свойства определяют рыночную позицию транспортной системы, её конкурентные преимущества и способность к эффективному выполнению перевозочных процессов в изменяющихся условиях. В случае анализа струнного транспорта Юницкого (СТЮ) они приобретают особую специфику, обусловленную уникальной физической основой системы – движением по предварительно напряжённым струнным рельсам, расположенным на втором уровне [2, 3]. Данная особенность предопределяет возникновение новых, уникальных характеристик.

Например, в отличие от традиционных транспортных систем, где несущие конструкции и направляющие элементы представляют собой отдельные компоненты, в СТЮ они объединены в целостную пространственную структуру за счёт использования предварительно напряжённых струнных элементов, которые одновременно выполняют несущую и направляющую функции, что позволяет минимизировать массу конструкции при сохранении высокой несущей способности.

К прочим уникальным структурно-функциональным свойствам СТЮ относятся:

1 *Распределение масс и нагрузок в системе, принципиально отличающееся от традиционных систем,* – благодаря подвесной конструкции и особенностям динамики движения, нагрузка в СТЮ распределяется более равномерно по всей длине трассы. Основные напряжения воспринимаются растянутыми (преднапряжёнными) струнными элементами, что обеспечивает оптимальное использование материала и повышает ресурс конструкции.

2 *Сочетание жёсткости и гибкости конструкции*, которое достигается за счёт рационального сочетания высокомодульных струнных элементов с упругими соединениями, создающими систему с регулируемой жёсткостью.

3 *Повышенная системная связанность всех элементов* – каждый компонент СТЮ функционально взаимосвязан с другими, образуя единую систему. Эта связанность обеспечивается как механическими особенностями конструкции, так и единой системой мониторинга и управления.

Свойства самосохранения в СТЮ проявляются через:

1 *Устойчивость к внешним воздействиям* – при локальных повреждениях система автоматически перераспределяет нагрузки благодаря своей сетевой структуре, специальным демпфирующим элементам и динамическим гасителям колебаний. Кроме того, отсутствие жёстких связей с землёй и способность конструкции «обходить» резонансные частоты делают систему устойчивой к землетрясениям.

2 *Автоматическую адаптацию к температурным деформациям конструкции* – система компенсаторов и терморегулируемых элементов позволяет конструкции сохранять геометрические параметры при значительных температурных колебаниях.

3 *Ветроустойчивость транспортных модулей и путевых структур* – аэродинамическая форма модулей и особая конструкция подвески обеспечивают стабильность движения даже при сильных порывах ветра за счёт оптимального сочетания массы, жёсткости и аэродинамических характеристик.

Целевые и организационно-правовые свойства СТЮ включают:

1 *Возможность реализации принципиально новых транспортных стратегий* в условиях плотной городской застройки и на сложном рельефе за счёт сочетания высокой скорости перемещения с минимальным воздействием на окружающую среду.

2 *Формирование правовой парадигмы эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры* с учётом особенностей СТЮ. Это касается стандартов безопасности, эксплуатации, обслуживания и взаимодействия с другими видами транспорта.

3 *Создание новых моделей транспортного обслуживания*, включая системы совместного использования транспортных модулей, динамическое ценообразование на основе реальной загрузки, интеграцию с другими видами мобильности. Кроме того, СТЮ может органично интегрироваться в существующую инфраструктуру, создавая мультимодальные транспортные узлы нового типа. Особенности конструкции позволяют размещать станции СТЮ непосредственно на крышах зданий, над автомагистралями или вдоль существующих транспортных коридоров без их нарушения.

Теоретико-информационный анализ сложности СТЮ выявляет его специфические свойства:

1 *Аэродинамическая стабилизация движения* благодаря форме транспортных модулей и конструкции пути, обеспечивающих естественную стабилизацию положения модуля при движении за счёт аэродинамических сил.

2 *Энергетическая автономность модулей*, которая достигается рекуперацией энергии.

3 *Устойчивость к геометрическим искажениям пути под нагрузкой* за счёт предварительного натяжения несущих струн и распределённой системы демпфирования колебаний (энергия колебаний рассеивается по всей длине трассы, а не в отдельных точках).

4 *Экологическая нейтральность транспортной системы*, которая проявляется в малой занимаемой поверхности земли и возможности интеграции в природные ландшафты без нарушения экосистем.

Стратегические преимущества СТЮ следующие:

1 *Возможность реализации сквозных транспортных коридоров*, преодолевающих сложные географические препятствия (реки, овраги, горные массивы) без необходимости строительства капитальных мостовых переходов или тоннелей.

2 *Формирование многоуровневых транспортных сетей*, которые представляют собой вертикальное наслоение трасс в городских условиях при отсутствии светофоров и развязок.

3 *Создание интегрированных логистических систем для организации грузовых потоков* «от двери до двери» без перевалок, включающих автоматизированные логистические хабы на базе станций СТЮ, интегрированные с системами складского хранения нового поколения.

4 *Развитие принципиально новых урбанистических решений для трансформации городской среды*, таких как линейные города вдоль транспортных коридоров СТЮ.

Анализ показывает, что СТЮ, как представитель нового поколения транспортных систем, сочетает в себе традиционные свойства транспортных систем с принципиально новыми качествами, от-

крывающими перспективы для развития транспортных технологий. Особенностью СТЮ является синергетический эффект от сочетания её свойств, приводящий к возникновению новых системных качеств, не сводимых к простой сумме свойств элементов. Так, например, сочетание натяжения струн, аэродинамики модуля и управления создаёт устойчивость движения (чего нет у отдельных элементов), а взаимодействие упругих свойств струн и инерции транспортного модуля даёт самогасящиеся колебания – автоматическое демпфирование.

Дальнейшее исследование свойств СТЮ требует разработки специального методологического аппарата, учитывающего как общие принципы анализа транспортных систем, так и специфические особенности струнных технологий. Это открывает новые перспективы для развития теории транспортных систем и практического внедрения инновационных решений в транспортной отрасли.

**Список литературы**

1 **Друкер, П. К.** Бизнес и инновации : учеб. пособие / П. К. Друкер. – М. : Вильямс, 2007. – 432 с.

2 **Юницкий, А. Э.** Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе / А. Э. Юницкий. – Силакрогс : ПНБ принт, 2019. – 576 с.

3 **Юницкий, А. Э.** Транспортно-инфраструктурные комплексы Юницкого как комплексное решение транспортных проблем в области энергоэффективности, экологичности и безопасности / А. Э. Юницкий, С. В. Артюшевский // Транспорт России: проблемы и перспективы : материалы междунар. науч.-практ. конф., 9–10 нояб. 2022 г., г. С.-Петербург. – СПб. : ИПТ РАН, 2022. – С. 139.

УДК 625.85

## ВЛИЯНИЕ СПОСОБА МОДИФИКАЦИИ И КОНЦЕНТРАЦИИ ПОЛИМЕРА НА КОМПЛЕКС СВОЙСТВ АСФАЛЬТОБЕТОНА

*П. П. ЯЦЕВИЧ*

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Современные условия эксплуатации автомобильных дорог характеризуются непрерывным ростом интенсивности движения и качественным изменением состава транспортного потока в сторону увеличения доли тяжелых транспортных средств и повышения их осевых нагрузок. Данные факторы приводят к тому, что асфальтобетонные покрытия, устроенные с применением стандартных битумов, не обладают достаточной долговечностью и подвержены интенсивному накоплению остаточных деформаций (колееобразованию) и других разрушений уже в первые годы эксплуатации [1]. Практика показывает, что достижение требуемых при проектировании уровней надежности дорожных конструкций невозможно без применения материалов с улучшенными физико-механическими свойствами, в частности, асфальтобетонных смесей, модифицированных полимерами [2].

Ключевым инструментом повышения эксплуатационных характеристик асфальтобетона является введение в его состав полимерных модификаторов [3]. В мировой и отечественной практике сложились два основных технологических подхода к полимеризации смесей [4]. Первый, условно «мокрый» метод, заключается в предварительном приготовлении полимерно-битумного вяжущего (ПБВ) путем растворения и гомогенизации полимера в битуме на специализированных установках. Второй, «сухой» метод, подразумевает введение гранулированного или порошкообразного полимера непосредственно в смеситель асфальтобетонного завода одновременно с минеральными материалами. Каждый из этих методов имеет свои технологические и экономические преимущества и недостатки, однако их сравнительная эффективность с точки зрения итоговых свойств асфальтобетона изучена недостаточно [5].

Несмотря на широкое применение обоих методов, выбор между ними зачастую определяется не технической, а производственно-логистической целесообразностью. При этом открытым остается вопрос о сравнительной ресурсоэффективности. Взаимодействие полимера с битумом зависит от множества факторов, температуры и продолжительности смешения, природы самого полимера (термопласты, эластопласты), а также толщины пленки вяжущего на поверхности минеральных зерен. Это формирует научную проблему, требующую системного исследования.

Для проведения экспериментальных исследований были выбраны два типа асфальтобетонных смесей, регламентированных СТБ 1033-2016 и широко применяемых в верхних слоях дорожных покрытий: щебеночная мелкозернистая смесь типа С (ЩМС$_г$) и щебеночная мелкозернистая смесь типа Б (ЩМБ$_г$). В качестве минеральной основы для обеих смесей использовались материалы одного карьера (РУПП «Гранит»), щебень гранитный и песок из отсевов дробления. В качестве минерального порошка применялся порошок из доломита. Органическим вяжущим служил дорожный битум марки 70/100. В качестве модифицирующих добавок применялись полимеры двух основных типов, термопласт и эластопласт, а также их композиции в пропорциях 33/66 и 66/33. Концентрация полимеров в вяжущем варьировалась в диапазоне от 2 до 8 % с шагом 2 % относительно массы битума. Для каждого состава и каждой концентрации готовились контрольные образцы без содержания полимера.

Исследование проводилось по двум основным направлениям, имитирующим производственные технологии. При «мокром» методе предварительно готовилось полимерно-битумное вяжущее (ПБВ) с заданными концентрациями полимера, которое затем использовалось для приготовления асфальтобетонной смеси. При «сухом» методе в лабораторный смеситель вместе с разогретыми минеральными материалами и стандартным битумом вводился гранулированный полимер. Количество полимера при «сухом» методе рассчитывалось таким образом, чтобы итоговое соотношение полимер – битум в объеме смеси было идентично соотношению в смесях, приготовленных «мокрым» методом. Данное условие обеспечило корректность сравнения эффективности двух технологий.

Оценка комплекса физико-механических свойств модифицированных асфальтобетонов производилась на стандартных образцах, изготовленных и испытанных в соответствии с требованиями СТБ 1115-2013. Контролировались три ключевых параметра: предел прочности при сжатии при 50 °С ($R_{50}$), характеризующий сдвигоустойчивость материала и его способность сопротивляться колееобразованию при высоких летних температурах; максимальная структурная прочность ($R_{стр}$), определяемая в области отрицательных температур и позволяющая оценить трещиностойкость материала и его склонность к хрупкому разрушению в зимний период; водонасыщение ($W$, %) стандартных образцов, косвенно характеризующее технологические свойства смеси (удобоукладываемость) при уплотнении и потенциальную стойкость уплотненного материала к водонасыщению и морозоразрушению в процессе эксплуатации.

Полученные в ходе экспериментальных исследований данные позволили провести комплексную оценку влияния способа введения и концентрации полимеров на ключевые свойства асфальтобетона. Анализ результатов показал, что, несмотря на общую положительную тенденцию от введения модификаторов, эффективность «мокрого» и «сухого» методов принципиально различается.

Оценка предела прочности при сжатии при 50 °С ($R_{50}$) показала, что предварительная модификация битума («мокрый» метод) является значительно более эффективным способом повышения сдвигоустойчивости асфальтобетона. При всех исследованных концентрациях и для всех типов полимеров образцы, изготовленные с применением ПБВ, демонстрировали более высокие значения прочности по сравнению с образцами, модифицированными «сухим» методом. Эта разница была особенно выражена для асфальтобетонной смеси типа С (ЩМС$_г$) с повышенным содержанием вяжущего. Так, при введении 8 % эластопласта «мокрым» методом прочность смеси типа С возросла на 136 % (с 1,13 до 2,67 МПа), в то время как «сухой» метод дал прирост лишь на 27 % (с 1,07 до 1,41 МПа). Данный факт подтверждает гипотезу о том, что более толстые пленки вяжущего обеспечивают лучшие условия для растворения, набухания и формирования структурной полимерной сетки в объеме битума.

Исследование максимальной структурной прочности ($R_{стр}$) выявило важную негативную тенденцию. Увеличение концентрации термопласта, особенно свыше 4 %, приводит к статистически значимому снижению $R_{стр}$, что указывает на охрупчивание асфальтобетона при отрицательных температурах. В то же время эластопласты либо не оказывают существенного влияния, либо незначительно повышают структурную прочность, что является их несомненным преимуществом.

Эта же тенденция прослеживается и при анализе технологических свойств. Высокие концентрации термопластов (6–8 %) приводят к значительному росту жесткости асфальтобетонной смеси при температурах укладки и уплотнения. Как следствие, ухудшается ее удобоукладываемость, что в ла-

бораторных условиях проявилось в увеличении показателя водонасыщения уплотненных образцов. Повышенное остаточное водонасыщение является крайне негативным фактором, так как оно напрямую снижает долговечность покрытия за счет ускорения процессов коррозионного и морозного разрушения. Таким образом, погоня за максимальной высокотемпературной прочностью путем введения высоких дозировок термопласта может привести к снижению трещиностойкости и общей коррозионной стойкости покрытия.

**Список литературы**

1 Долговечные асфальтобетонные покрытия автомобильных дорог, мостов и улиц / В. А. Веренько, В. В. Занкович, А. В. Ладышев [и др.]. – Минск : Арт Дизайн, 2015. – 296 с.

2 ТКП 45-3.03-3-2004. Проектирование дорожных одежд улиц и дорог населенных пунктов. – Введ. 08.12.2004. – Минск : М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь, 2005. – 54 с.

3 **Веренько, В. А.** Надежность дорожных одежд / В. А. Веренько. – Минск : БГПА, 2002. – 120 с.

4 **Duarte, G. M.** Asphalt concrete mixtures modified with polymeric waste by the wet and dry processes: A literature review / G. M. Duarte, A. L. Faxina // Construction and Building Materials. – 2021. – URL: https://doi.org/10.1016/j.-conbuildmat.2021.125408.

5 Comparison of asphalt mixtures containing polymeric compounds and polymer-modified bitumen based on the VECD theory / S. Spadoni, L. P. Ingrassia, D. Mocelin [et al.] // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 349. – URL: https://www.-sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822023820.

# 6 НАДЕЖНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

УДК 528.48

## ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРЕНА ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

*Е. К. АТРОШКО, И. П. ДРАЛОВА*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Креном сооружения называется отклонение верхней части сооружения от проектного положения вертикальной плоскости. Причиной крена может быть неправильная осадка сооружения в целом или наклон его верхней части из-за ветрового давления, температурного нагрева и других физических воздействий.

В зависимости от вида сооружения и его высоты для определения крена используют различные геодезические способы. Наиболее просто определить величину крена с помощью механического отвеса, при котором нить отвеса совмещается с осью сооружения в его верхнем сечении, а в нижнем сечении по линейке с миллиметровыми делениями или рулетки измеряют отклонение верхней точки сооружения от его оси в нижнем сечении. Это измерение характеризует величину крена ($l$). Угловая величина крена определяется углом между вертикальным направлением оси сооружения и его наклонным (фактическим) направлением. Угловая величина крена

$$\varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{l}{H}\right),$$

где $l$ – линейная величина крена; $H$ – высота сооружения.

Точность измерения крена в этом случае невелика и зависит от отклонения отвеса от вертикали под влиянием движения воздуха.

Для определения крена с более высокой точностью, особенно для сооружений большой высоты, используют приборы вертикального проектирования (ПВП), которые представляют собой оптический обратный отвес. Для этого под осью сооружения в нижнем сечении устанавливают прибор, а в верхнем сечении – горизонтально палетку или рейку с миллиметровыми делениями и измеряют линейную величину крена, при этом ошибки измерения для прибора вертикального проектирования от движения воздуха не учитываются.

Для более точного измерения крена в способе вертикально проектирования используют точные и высокоточные оптические теодолиты и электронные тахеометры. Для определения линейной величины крена с помощью теодолита для сооружений прямоугольной формы устанавливают теодолит в створе одной из стен сооружения на расстоянии в полторы – две высоты сооружения и проектируют верхнюю точку на сооружении теодолитом при круге лево и круге право на миллиметровую линейку или рулетку, располагаемую в основании сооружения перпендикулярно оси визирования $\Delta x$. Затем переставляют теодолит на 90° параллельно створу направления на вторую стену и делают аналогичное измерение линейной величины крена $\Delta y$ в перпендикулярном направлении.

По полученным измерениям определяют общую линейную и угловую величины крена:

$$l = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}\ ;\ \varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{l}{H}\right).$$

Для определения направления крена относительно севера на каждой стоянке теодолита с помощью ориентир-буссоли измеряют магнитные азимуты, а затем составляют схематический чертеж расположения направления крена сооружения относительно северного направления магнитного меридиана.

Для сооружений башенного типа (дымовые трубы, элеваторы и другие подобные сооружения), имеющих форму усеченного конуса, крен определяют путем проектирования с двух взаимно перпендикулярных стоянок теодолита центра верхней части трубы на подошву ее фундамента. Разница в положениях проекций центра верхней части и центра фундамента определяет величину и направление крена.

Для нахождения центра верхней части трубы устанавливают отъюстированный теодолит на станции 1 и наводят его визирную ось по очереди на боковые грани верха дымовой трубы, при каждом наведении снимают отсчёты по горизонтальному кругу теодолита. Затем по ним находят среднее арифметическое значение и устанавливают его на лимбе теодолита. Данное положение визирной оси теодолита будет соответствовать центру верней части дымовой трубы. Затем это положение вертикально проектируют на основание фундамента дымовой трубы и отмечают его краской или мелом на фундаменте.

Аналогично находят центр нижней части дымовой трубы фундамента и отмечают центр нижней части трубы мелом. Измеряя рулеткой расстояние между центром нижней и верхней частей дымовой трубы, определяют линейную величину крена дымовой трубы. Затем переставляют теодолит на 90° и аналогично определяют величину крена со второй стоянки теодолита. Полное значение линейной и угловой величин крена дымовой трубы определяют по формулам, приведенным выше.

Определение крена высоких сооружений может быть разовым и систематическим. Целью разовых измерений является определение величины крена на момент наблюдения, которая используется для оценки состояния сооружения и составления заключения о возможности его эксплуатации.

Целью систематических наблюдений является определение величины крена и его изменения во времени. При организации систематических наблюдений точки установки теодолита или электронного тахеометра закрепляют на местности долговременными центрами и фиксируют ось сооружения двумя визирными марками для наблюдения за ней с каждой точки установки теодолита.

Для определения крена сооружения и его изменения во времени наблюдения выполняют периодически (по циклам), при этом обычно используют способ координат. В этом способе вокруг сооружения на расстоянии, равном полтора – два раза его высоты, закладывают не менее трёх опорных пунктов (стоянок теодолита или тахеометра) и определяют их координаты в условной системе. С этих пунктов через определенные промежутки времени (циклы) с помощью формул прямой угловой засечки определяют координаты оси сооружения в его нижнем и верхнем сечении. По разностям координат в двух циклах наблюдений находят составляющие крена $\Delta x$ и $\Delta y$ по осям координат и определяют линейную и угловую величины крена.

Точность определения линейной величины крена зависит от точности теодолита (тахеометра) и высоты сооружения $H$. В среднем допустимая величина крена при определении вертикальности для фабрично-заводских труб определяется по формуле

$$l = 0{,}002H.$$

Например, для дымовой трубы высотой $H = 20$ м линейная величина крена не должна превышать

$$l = 0{,}002 \cdot 2000 = 40 \text{ мм} = 4 \text{ см}.$$

Некоторые из приведенных геодезических методов определения крена инженерных сооружений были использованы авторами при наблюдениях за кренами дымовых труб на нескольких объектах хлебозаводов г. Гомеля и Гомельской области.

УДК 691.32:624.012.45/.46

## НАЧАЛЬНАЯ КАРБОНИЗАЦИЯ БЕТОНОВ КЛАССОВ ПО ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ $C^{12}/_{15}$–$C^{50}/_{60}$ ДЛЯ ЖЕСТКИХ СМЕСЕЙ

*А. А. ВАСИЛЬЕВ, К. Э. АГЕЕВА, А. Ю. КРУПОДЕРОВ, В. Ю. СВЕРЖ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

На основании результатов исследования образцов бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12}/_{15}$–$C^{50}/_{60}$ была получена зависимость начальной карбонизации бетона от количества используемого цемента $КС_0 = f(Ц)$ [1]. Исследования проводились сразу после изготовления с применением ТВО на подвижных смесях марки по удобоукладываемости П1 (ОК = 4 см):

$$КС_0(l/t=0) = (0{,}0077Ц + 0{,}7932) + (1769Ц + 409077)e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5{,}05}\right)^{0{,}85}\right)}. \quad (1)$$

Ввиду того что для производства железобетонных элементов (ЖБЭ) применяют жесткие смеси марок по удобоукладываемости (Ж1 (5–10 с) и Ж2 (11–20 с)), на основании зависимости (1) получили зависимости $КС_0 = f(Ц_р)$ для жестких смесей с учетом расчетного содержания цемента $Ц_р$ (таблица 1).

*Таблица 1* – **Регрессионные зависимости начальной карбонизации $КС_0 = f(Ц_р)$**

| Класс бетона по прочности на сжатие | Зависимость $КС_0 = f(Ц_р)$ | |
|---|---|---|
| | для смесей Ж1 (7 с) | для смесей Ж2 (15 с) |
| $C^{12}/_{15}$ | $2,30+754110e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$ | $2,23+739955e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$ |
| $C^{16}/_{20}$ | $2,73+854966e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$ | $2,65+835502e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$ |
| $C^{18}/_{22,5}$ | $2,94+902740e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$ | $2,86+883276e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$ |
| $C^{20}/_{25}$ | $3,15+950513e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$ | $3,05+9275116e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$ |
| $C^{22}/_{27,5}$ | $3,35+996518e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$ | $3,24+971746e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$ |
| $C^{25}/_{30}$ | $3,54+1040753e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$ | $3,42+1012442e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$ |
| $C^{28}/_{35}$ | $4,01+1148686e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$ | $3,85+1111529e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$ |
| $C^{30}/_{37}$ | $4,18+1187613e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$ | $4,02+1150456e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$ |
| $C^{32}/_{40}$ | $4,46+1251311e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$ | $4,27+12088466e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$ |
| $C^{35}/_{45}$ | $4,90+1352167e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$ | $4,70+1306163e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$ |
| $C^{40}/_{50}$ | $5,33+11451254e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$ | $5,11+1399941e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$ |
| $C^{45}/_{55}$ | $5,74+1546801e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$ | $5,50+1490180e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$ |
| $C^{50}/_{60}$ | $6,16+1642349e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$ | $5,90+1582189e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$ |

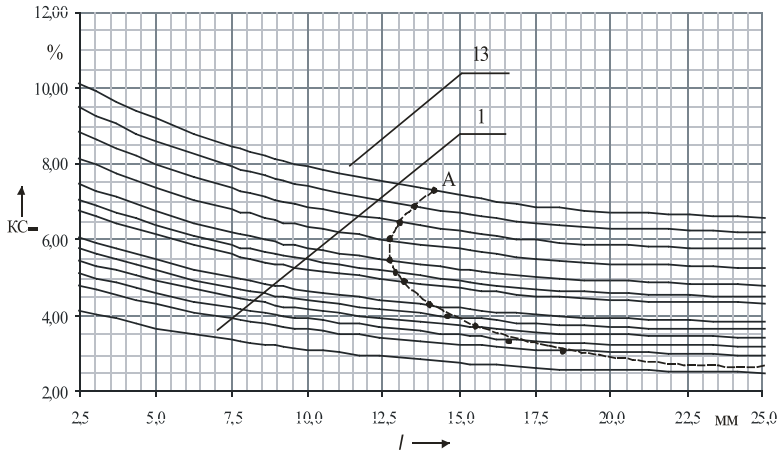
Полученные зависимости позволили оценить значимость начальной карбонизации для жестких смесей. С учетом того, что в обычном плотном бетоне, приготовленном на портландцементе, существует значительный запас $Ca(OH)_2$, до 10–15 % от массы цемента [2], рассчитаем значения карбонатной составляющей ($КС_{10}$) цементно-песчаной фракции бетона, приняв, что сразу после его изготовления в процессе гидратации образуется 10 % $Ca(OH)_2$ от массы цемента (таблица 2).

*Таблица 2* – **Значения $КС_{10}$**

| Класс бетона по прочности на сжатие | Значения $КС_{10}$, % для смесей | | Класс бетона по прочности на сжатие | Значения $КС_{10}$, % для смесей | | Класс бетона по прочности на сжатие | Значения $КС_{10}$, % для смесей | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ж1 (7 с) | Ж2 (15 с) | | Ж1 (7 с) | Ж2 (15 с) | | Ж1 (7 с) | Ж2 (15 с) |
| $С^{12}/_{15}$ | 2,381 | 2,284 | $С^{25}/_{30}$ | 4,904 | 4,105 | $С^{40}/_{50}$ | 6,901 | 6,242 |
| $С^{16}/_{20}$ | 3,074 | 2,953 | $С^{28}/_{35}$ | 5,128 | 4,704 | $С^{45}/_{55}$ | 7,299 | 6,670 |
| $С^{18}/_{22,5}$ | 3,706 | 3,275 | $С^{30}/_{37}$ | 5,475 | 4,928 | $С^{50}/_{60}$ | 4,904 | 7,068 |
| $С^{20}/_{25}$ | 3,986 | 3,566 | $С^{32}/_{40}$ | 5,994 | 5,258 | | | |
| $С^{22}/_{27,5}$ | 4,271 | 3,847 | $С^{35}/_{45}$ | 6,472 | 5,774 | | | |

Строим графически зависимости $КС_{10} = f(С, Ц_р)$ (рисунок 1). Выполняем (графически) анализ толщины карбонизированного бетона $l_{гр}$ сразу после его изготовления (с применением ТВО), для чего, откладывая на графических зависимостях $КС_{10} = f\ (С, Ц_р)$ для каждого класса бетона по прочности на сжатие рассчитанные значения $КС_{10}$, проецируя их на ось абсцисс, получаем соответствующие им значения $l_{гр}$ (см. рисунок 1). Линия «А» показывает зону полной карбонизации бетона (слева от линии «А»). В соответствии с ней сразу после изготовления бетонов (с применением ТВО) в верхних слоях бетон полностью карбонизирован и толщина прокарбонизированного бетона составляет от 13 до 42 мм.

*а*)




*б*)

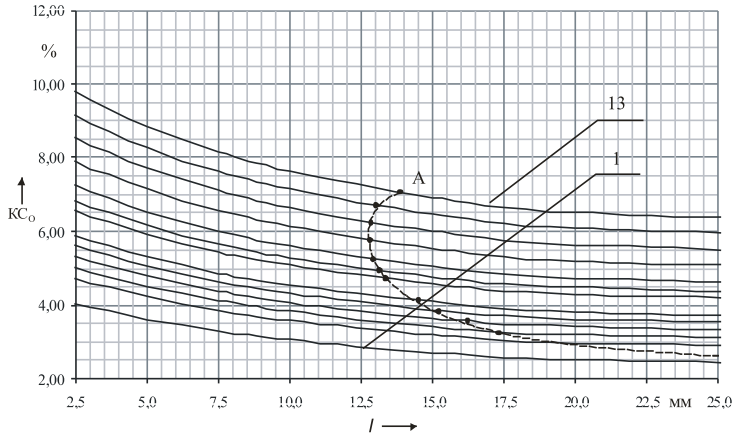



Рисунок 1 – Анализ распределения показателя $КС_{10}$ по сечению образцов бетона составов:
*а* – Ж1 (7 с) и *б* – Ж2 (15 с) сразу после ТВО для классов бетона по прочности на сжатие:
*1* – $С^{12}/_{15}$; *2* – $С^{16}/_{20}$; *3* – $С^{18}/_{22,5}$; *4* – $С^{20}/_{25}$; *5* – $С^{22}/_{27,5}$; *6* – $С^{25}/_{30}$; *7* – $С^{28}/_{35}$; *8* – $С^{30}/_{37}$; *9* – $С^{32}/_{40}$; *10* – $С^{35}/_{45}$; *11* – $С^{40}/_{50}$; *12* – $С^{45}/_{55}$; *13* – $С^{50}/_{60}$;
А – граница полной карбонизации для $КС_{10}$

Предложенная методика позволяет оценивать начальную карбонизацию бетона для любого проектируемого состава бетонной смеси, любого класса бетона по прочности на сжатие, а также любой марки по удобоукладываемости.

Проведенные исследования начальной карбонизации жестких смесей бетонов различных классов по прочности на сжатие (марки по удобоукладываемости Ж1 и Ж2) показали:

– на начальных этапах эксплуатации ЖБЭ, т. е. сразу после изготовления (с применением ТВО), значительная часть защитного слоя бетона полностью карбонизируется, при этом в бетонах класса по прочности на сжатие $C^{12}/_{15}$ и ниже полностью карбонизируется защитный слой;

– толщина карбонизированного слоя зависит от состава бетонной смеси (в первую очередь от количества использованного цемента).

**Список литературы**

1 **Васильев, А. А.** Прогнозирование фактической карбонизации с учетом технологических параметров бетона : монография / А. А. Васильев, А. М. Нияковский. – Гомель : БелГУТ, 2014. – 206 с.

2 **Баженов, Ю. М.** Технология бетона / Ю. М. Баженов. – М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2002. – 499 с.

УДК 621.01.004.58

## ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*А. А. ВАСИЛЬЕВ, М. И. ТКАЧЕВА, В. А. ДОЛЯ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Значение проблем технической диагностики строительных конструкций возрастает из года в год. Это объясняется рядом причин. Во-первых – значением обеспечения безопасности существующих зданий и сооружений. Данная проблема чрезвычайно многообразна. Наиболее ярко её значение для крупных инженерных сооружений (мосты, плотины, АЭС, торговые и развлекательные центры и т. п.), аварии которых могут привести к катастрофическим последствиям, включая массовые человеческие жертвы [1, 2].

Достаточно очевидно значение этой проблемы для промышленных, многоэтажных и общественных зданий, с одной стороны, количество которых растет из года в год во всех странах мира, с другой – значительная часть которых ежегодно перепрофилируется при реконструкции.

Во-вторых, практически во всех странах мира с каждым годом возрастает объем работ, связанный с реконструкцией зданий и сооружений. Непременные компоненты этих работ – проведение обследований с технической диагностикой строительных конструкций.

В-третьих, важнейшей задачей является объективное определение степени повреждения конструкций, пострадавших вследствие пожаров, взрывов, землетрясений и других неэксплуатационных воздействий.

Задачей технической диагностики железобетонных конструкций является определение таких качественных показателей, от которых максимально зависит эксплуатационная пригодность и долговечность конструкций. В первую очередь это относится к несущим конструкциям, для которых основные показатели качества – прочность, жесткость и трещиностойкость.

И если соответствие эксплуатируемых железобетонных конструкций требованиям жесткости и трещиностойкости при действующих на момент обследования нагрузках устанавливается прямым измерением, то более сложной задачей является оценка трещиностойкости и жесткости конструкций, имеющих дефекты и повреждения при изменяющихся во времени нагрузках. Еще более сложная задача – определение несущей способности эксплуатируемых железобетонных конструкций.

А самой важной и сложной задачей является прогнозирование несущей способности эксплуатируемых железобетонных конструкций для различных атмосферных сред.

Диагностика железобетонных конструкций – относительно молодая отрасль строительной науки. В связи с этим существует много вопросов, обязательных к разрешению. Три группы необходимых (первоочередных) исследований [1, 3]:

– разработка методов определения качественных признаков, от которых зависят прочность, жесткость и трещиностойкость эксплуатируемых конструкций;

– разработка методов поверочного расчета эксплуатируемых железобетонных конструкций;

– разработка методов расчета остаточного ресурса эксплуатируемых железобетонных конструкций.

Перечень требующих решения задач, которые, являясь элементами построения теоретических основ методов технической диагностики железобетонных конструкций, имеют самостоятельное прикладное значение:

– обобщение характерных дефектов и повреждений в конструкциях и создание классификатора дефектов для применения в практике обследования зданий и сооружений;

– разработка (совершенствование) методов оценки значимости дефектов и повреждений железобетонных конструкций;

– разработка методики статических испытаний железобетонных конструкций в составе зданий и сооружений;

– разработка методики динамических испытаний железобетонных конструкций в составе зданий и сооружений;

– проведение исследований по определению прочности бетона методом отрыва со скалыванием при малой глубине заделки анкерного устройства;

– проведение исследований по определению прочности бетона ультразвуковым методом с использованием продольных и поперечных волн;

– разработка методики контроля армирования с использованием магнитных приборов нового поколения;

– разработка методов дефектоскопии железобетонных конструкций с использованием ультразвуковых томографов;

– исследование статистических характеристик фактической прочности бетона железобетонных конструкций;

– исследование статистических характеристик геометрических параметров железобетонных конструкций;

– разработка общих принципов поверочных расчетов, основанных на детерминированном, полувероятностном и вероятностном подходах;

– разработка правил назначения расчетных схем при проведении поверочных расчетов конструкций;

– разработка методов поверочного расчета эксплуатируемых железобетонных конструкций, имеющих повреждения, с учетом влияния этих повреждений на напряженно-деформированное влияние конструкций и с учетом появления повреждений в конструкциях, находящихся под нагрузкой;

– разработка методик расчета несущей способности эксплуатируемых железобетонных конструкций с учетом выявляемых трещин различного характера, расположения и параметров;

– разработка методов оценки и прогнозирования коррозионного состояния бетона для различных атмосферных сред, включающих методики оценки показателей агрессивности сред и их влияния на бетон;

– разработка методов оценки и прогнозирования коррозионного состояния стальной арматуры в бетоне для различных атмосферных сред;

– разработка методов оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных конструкций по внешним признакам (визуальный осмотр; общее обследование);

– разработка методов оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных конструкций с учетом внутренних процессов в бетоне и стальной арматуре (детальное обследование);

– разработка методов оценки и прогнозирования физического износа железобетонных конструкций;

– разработка методов оценки и прогнозирования физического износа зданий и сооружений с применением железобетонных конструкций;

– разработка методик, повышающих объективность определения постоянного износа;

– разработка методов оценки и прогнозирования остаточного ресурса железобетонных конструкций;

– разработка методов оценки и прогнозирования долговечности железобетонных конструкций;

– разработка методов расчета долговечности железобетонных конструкций;

– разработка методик подготовки (переподготовки) специалистов в области неразрушающего контроля;

– разработка методик подготовки (переподготовки) специалистов в области оценки дефектов и повреждений железобетона;

– разработка методик подготовки (переподготовки) специалистов в области диагностики технического состояния железобетонных конструкций.

**Список литературы**

1 Железобетон в XXI веке. Состояние и перспективы развития бетона и железобетона в России / Госстрой России ; НИИЖБ. – М. : Готика, 2001. – 684 с.

2 **Васильев, А. А.** Предотвращение аварий зданий и сооружений / А. А. Васильев // БСГ. Строительная газета. – 2013. – № 29–30 (733–734). – С. 8–9.

3 **Васильев, А. А.** Оценка остаточного ресурса несущих конструкций / А. А. Васильев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2022. – № 1 (42). – С. 88–90.

УДК 620.197:691.32

## ПРОБЛЕМЫ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

*А. А. ВАСИЛЬЕВ, М. И. ТКАЧЕВА, О. Н. КОНОВАЛОВА, А. С. ЧУГУНОВА*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Железобетонные конструкции – основной тип несущих конструкций объектов транспортного строительства. Их долговечность определяет не только срок службы, но и, наверное, более важный аспект – безопасность огромного количества людей [1].

В подавляющем большинстве случаев основными причинами повреждений железобетонных конструкций являются коррозионные процессы в бетоне и (или) стальной арматуре, являющиеся следствием воздействия эксплуатационной атмосферной среды. Так, большинство железобетонных конструкций мостов и путепроводов, дорожные покрытия разрушаются от применения противогололёдных реагентов; из-за воздействия углекислого газа воздуха, из-за выделения в атмосферу окислов азота, сернистого и других газов, выбрасываемых двигателями внутреннего сгорания автотранспорта, промышленными предприятиями; в результате морозной деструкции бетона. Аварийные обрушения коммунальных тоннелей и, особенно коллекторов сточных вод, происходят, в первую очередь, в результате газовой коррозии железобетонных элементов. Значительную роль в ускорении выхода из строя железобетонных конструкций транспортных объектов играют вибрационные процессы.

Защита железобетонных конструкций от различных типов коррозии – одна из важнейших проблем обеспечения долговечности объектов транспортного строительства. В Республике Беларусь при проектировании зданий и сооружений используется система выбора видов первичной и вторичной защиты железобетонных конструкций с учетом прогнозируемых эксплуатационных условий на базе СН 2.01.07-2020 «Защита строительных конструкций от коррозии». В данном документе для бетонных и железобетонных конструкций рассмотрены степень агрессивного воздействия среды эксплуатации (классы по условиям эксплуатации); требования к материалам для бетона и конструкциям, находящимся в агрессивных средах (технологические требования, расчетно-конструктивные требования); требования по защите от коррозии поверхностей бетонных и железобетонных конструкций; требования по защите от коррозии стальных закладных деталей и соединительных элементов; требования по защите железобетонных конструкций от электрокоррозии.

Необходимо отметить, что в силу различных обстоятельств не всегда учитываются необходимые требования как при проектировании объектов строительства, так и при реконструкции существующих. Несоблюдение (иногда полное или частичное игнорирование) требований, направленных на обеспечение долговечности при проектировании состава бетона и изготовлении железобетонных изделий, проектировании, строительстве и эксплуатации объектов строительства, к воздействию на конструкции агрессивных параметров атмосферы в сочетании с низким качеством производства строительно-монтажных работ, очень часто приводит к выходу из строя строительных конструкций задолго до окончания нормативного срока службы.

Наиболее значимо вышеприведенное проявляется при эксплуатации инженерных объектов транспортного строительства, испытывающих к постоянному воздействию агрессивности эксплуатационной среды значительные нагрузки, зачастую различного характера и знаков.

К наиболее часто и быстро повреждаемым объектам транспортного строительства можно отнести мосты, путепроводы, подземные переходы и переходы над железнодорожными путями, дорожные покрытия, коммунальные тоннели, коллекторы сточных вод, проходные тоннели с линиями электроснабжения, связи, сетями холодного и горячего водоснабжения и т. п.

Долговечность объектов транспортного строительства может быть обеспечена применением коррозионно-стойких составляющих и железобетонных конструкций в целом. Их создание, помимо уже существующих, охватывает новые направления [2]:

– исследование коррозионной стойкости железобетона на вяжущих и заполнителях с использованием отходов производства (в том числе – строительного);

– создание методов оценки и прогнозирования коррозионной стойкости железобетона на вяжущих и заполнителях с использованием отходов производства (в том числе – строительного);

– создание методов оценки и прогнозирования долговечности железобетона на вяжущих и заполнителях с использованием отходов производства (в том числе – строительного);

– разработка мер обеспечения долговечности железобетонных конструкций при одновременном воздействии агрессивной среды и нагрузок различного характера;

– создание железобетонных конструкций повышенной коррозионной стойкости (в том числе к биокоррозии), изготавливаемых по экономичным технологиям с использованием отходов промышленности и сельского хозяйства, при этом необходимо уделять внимание:

- изучению процессов внутренней коррозии бетона при использовании местных сырьевых материалов с повышенным содержанием вредных примесей;

- исследованию процессов разрушения новых видов стальной арматуры при одновременном воздействии на железобетонные конструкции силовых нагрузок различного характера и агрессивной среды;

- изучению оптимальных технологических параметров изготовления новых видов высокопрочных арматурных сталей, обеспечивающих повышение стойкости против коррозионного растрескивания, разработке защитных покрытий по стальной арматуре и технологий их нанесения;

- созданию оптимальных технологических параметров и характеристик периодического профиля, позволяющих повысить надежность служебных свойств стальной арматуры и расширить области применения эффективных видов стали;

- разработке новых видов защитных материалов с использованием отечественного сырья, критериев и методов оценки их долговечности;

- совершенствованию химических способов удаления продуктов коррозии с поверхности стальной арматуры и коррозионностойких составов для ремонта эксплуатируемых конструкций;

– разработка расчетных методов прогноза долговечности подземных и наземных железобетонных конструкций, работающих под воздействием агрессивности жидких и газовоздушных сред;

– разработка и внедрение методов контроля параметров качества и долговечности железобетонных изделий на заводах-изготовителях и их сертификационная аттестация.

Результат таких исследований:

– развитие теории коррозии бетона и железобетона, совершенствование норм проектирования железобетонных конструкций повышенной долговечности и коррозионной стойкости с применением расчетных методов прогноза их долговечности;

– создание новых коррозионностойких сборных и монолитных железобетонных конструкций с гарантией расчетного срока службы несущих конструкций и увеличенными сроками межремонтного периода.

Для поднятия качества и повышения долговечности железобетонных конструкций уже на данном этапе необходимо оценку продукции производить с учетом параметров качества и долговечности (в соответствии со стандартами); при использовании железобетонных конструкций (в первую очередь со следами агрессивности эксплуатационной среды) и применении при производстве железобетонных изделий нетрадиционных материалов проводить экспертизы проектных решений необходимо со специалистами по данной проблеме.

Обеспечить долговечность железобетонных конструкций и объектов транспортного строительства можно, если проблему их долговечности рассматривать как основную при проектировании изделий, расчете, проектировании, изготовлении, монтаже и эксплуатации конструкций. Это не только обеспечит требуемую долговечность и увеличит остаточный ресурс железобетонных конструкций (зданий и сооружений в целом), но и уменьшит затраты в целом, снизив коррозионные потери.

**Список литературы**

1 **Васильев, А. А.** Оценка и прогнозирование технического состояния железобетонных конструкций с учетом карбонизации бетона : монография / А. А. Васильев. – Гомель : БелГУТ, 2019. – 215 с.

2 **Степанова, В. Ф.** Проблемы долговечности бетонных и железобетонных конструкций в современном строительстве / В. Ф. Степанова // Бетон на рубеже третьего тысячелетия : материалы 1-й Всерос. конф. по проблемам бетона и железобетона : в 3 кн. 3 кн. – М. : НИИЖБ, 2001. – С. 1403–1407.

УДК 69:007.52(496)

## ЦИФРОВИЗАЦИЯ И РОБОТИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

*А. В. ДЕРУЖИНСКАЯ, Н. И. СЕМЧЕНКО*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В современном мире строительство претерпевает изменения. Это связано с рядом факторов, среди которых дефицит рабочих кадров, необходимость повышения производительности труда с сокращением сроков производства работ для выполнения масштабных государственных программ, безопасность людей при выполнении строительно-монтажных работ, повышение качества готовой строительной продукции, снижение себестоимости строительства и др.

По данным McKinsey Global Institute на 2015 г., мировая строительная отрасль по отраслевому цифровому индексу была одной из наименее оцифрованных и занимала предпоследнее место в общем рейтинге [1].

К 2021 г. коренных изменений в уровне цифровизации относительно других отраслей в строительстве не произошло. По данным Института статистических исследований и экономики знаний НИУ ВШЭ РФ по Индексу цифровизации отраслей экономики и социальной сферы строительная отрасль занимает предпоследнее место в общем рейтинге (11,4 пункта), опережая только сферу операций с недвижимым имуществом (11 пунктов) и уступая лидерам: отраслям IT (33,9), информации и связи (28,6), высшего образования (23,9) и др. [2]. Значения Индекса определены суммой значений пяти субиндексов, которые для сферы строительства имели следующие значения: использование цифровых технологий – 2,72 (3,91) пункта; цифровизация бизнес-процессов – 3,43 (6,39); цифровые навыки персонала – 1,23 (13,96); затраты на внедрение и использование цифровых технологий – 0,2 (3,11); кибербезопасность – 3,8 (6,51). В скобках для сравнения приведены значения соответствующих показателей для IT-отрасли.

Низкий уровень продуктивности всей отрасли по сравнению с другими можно объяснить комплексом причин:

– значительное количество времени документооборота затрачивается на бумажную работу;

– отрасль в значительной степени зависит от ручного труда на строительной площадке;

– нет отлаженных коммуникаций между заказчиками, проектировщиками и подрядчиками, т. е. BIM-технологии пока в должной мере не работают, что вытекает, на наш взгляд, из следующей причины;

– дефицит кадровых ресурсов в целом и в частности IT-специалистов и работников, обладающих цифровыми навыками на уровне выше среднего.

С целью формирования прочного фундамента для успешного роста отрасли в стране разработана Стратегия развития строительного комплекса Республики Беларусь до 2035 г. (Стратегия) [3, 4], которая направлена на достижение основных целей, каждая из которых имеет свои задачи.

Одно из восьми определенных Стратегией направлений – развитие цифровизации организаций строительного комплекса, с которым, по нашему мнению, в той или иной степени смежны все остальные направления. Обратим внимание на два из них – развитие производственного потенциала организаций строительного комплекса и развитие научного и инновационного потенциала организаций строительного комплекса.

Технологическим прорывом в рамках указанных направлений Стратегии должна стать роботизация – не просто как инструмент оптимизации отдельных процессов, а системный драйвер перехода к принципиально новой парадигме в строительстве.

В Республике Беларусь процесс роботизации начинает динамично развиваться. Его основу на современном этапе составляют машины с элементами интеллектуализации и автоматизации. Речь идет о внедрении беспилотных строительных машин, оснащенных системами глобального позиционирования, позволяющих высокоточно выполнять заложенные в них работы по заранее загруженным цифровым моделям. Данная технология минимизирует человеческий фактор, обеспечивает экономию материалов и топлива за счет исключения ошибок и позволяет работать в условиях ограниченной видимости или в опасных зонах [5].

Другим критически важным аспектом является развитие аддитивных технологий в строительстве. Экспериментальные проекты по 3D-печати строительных конструкций демонстрируют колоссальный потенциал для скоростного возведения объектов. Инновационность данного направления заключается не только в автоматизации процесса укладки материалов, но и радикальном изменении проектной культуры – проектирование ведется исключительно в цифровом виде с максимальной оптимизацией формы и расхода материала, что напрямую соотносится с принципами устойчивого развития и ресурсосбережения. В Республике Беларусь первый опыт практического применения 3D-печати в промышленных масштабах уже имеется – на Минском комбинате силикатных изделий запустили первый в стране промышленный 3D-принтер для строительства [6], с помощью которого можно создавать крупногабаритные конструкции из бетона.

Нельзя обойти вниманием роботизацию «закрытых» и отделочных процессов. На предприятиях, производящих строительные конструкции (железобетонные изделия, элементы фасадных систем, оконные и дверные блоки), широко внедрены промышленные роботы-манипуляторы. Они осуществляют высокоточную сварку, фрезеровку и сборку. В строительном процессе начинают применяться роботизированные комплексы для укладки штучных элементов и нанесения штукатурных смесей. Китайскими и российскими производителями освоен выпуск современных робототехнических комплексов, которые уже доступны для поставок в Республику Беларусь [7]. Одним из примеров такого комплекса является робот-штукатур PMC-3000iE. Специалисты ОАО «НИИ Стройэкономика» установили, что при использовании данного робота по сравнению с механизированным и ручным способами ведения штукатурных работ происходит снижение показателя трудозатрат более чем в 3,5 и 7,3 раза соответственно, а срок окупаемости при 100%-й загрузке составит порядка 1,85 года [8]. Однако, несмотря на значительные преимущества, распространение подобных технологий в настоящее время сдерживается высокой капиталоемкостью, и поэтому вероятность резкого роста их применения в строительной отрасли Республики Беларусь в ближайшее десятилетие очень низкая.

Важнейшим инновационным пластом является симбиоз роботизации с технологиями информационного моделирования (BIM). BIM-модель выступает цифровым двойником будущего объекта и источником данных для управления роботизированной техникой. Данные с беспилотных летательных аппаратов (дронов), осуществляющих аэрофотосъемку, мониторинг строительной площадки и обмерные работы, в режиме реального времени интегрируются в BIM-модель, позволяя корректировать действия роботов и отслеживать ход строительства с высокой точностью. Таким образом, роботизация является неотъемлемым элементом сквозной цифровой цепочки от проектирования до введения объекта в эксплуатацию.

Однако, несмотря на широкие перспективы, внедрение роботизированных систем сталкивается с системой вызовов. Помимо высокой стоимости оборудования и программного обеспечения, необходимо обслуживать и ремонтировать все автономные процессы на строительной площадке, поэтому остро стоит вопрос кадрового обеспечения. Требуется подготовка новых специалистов, обладающих компетенциями в различных областях – строительства, программирования и робототехники. Кроме того, в стране необходима адаптация нормативно-правовой базы, регламентирующей использование роботов.

Важным аспектом является и безопасность при внедрении роботизированных технологий. Хотя роботы и снизят риск травматизма рабочих на строительной площадке, это не исключит вероятность возможных технологических сбоев и ошибок.

Таким образом, для сферы строительства Республики Беларусь роботизация представляет собой многогранный и стратегически важный этап. Его последовательное развитие является не вопросом выбора, а объективной необходимостью для повышения конкурентоспособности, технологического суверенитета и экономической эффективности одной из важнейших отраслей экономики.

**Список литературы**


1 Роботизация строительной отрасли – на один шаг ближе к BIM. Часть 1 // BIMLIB. – URL: https://bimlib.pro/articles/robotizaciya-stroitelnoj-otrasli-na-odin-shag-blizhe-k-bim-chast-1-620 (дата обращения: 28.07.2025).

2 Индекс цифровизации отраслей экономики и социальной сферы // Институт статистических исследований и экономики. – URL: https://issek.hse.ru/news/783750202.html (дата обращения: 28.07.2025).

3 Какой будет стройотрасль через 10 лет? Стратегию развития стройкомплекса до 2035-го приняли в Беларуси // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by/novosti/obshchestvenno-politicheskie-i-v-oblasti-prava/2025/february/80638/ (дата обращения: 01.08.2025).

4 Как будет развиваться строительный комплекс Республики Беларусь до 2035 года? // ibMedia. – URL: https://ibmedia.by/news/kak-budet-razvivatsya-stroitelnyj-kompleks-respubliki-belarus-do-2035-goda/ (дата обращения: 01.08.2025).

5 Беспилотная спецтехника в строительстве: будущее уже здесь. – URL: https://zoomlion-maz.by/obzory-novejshej-spectehniki/bespilotnaja-spectehnika-v-stroitelstve-budushhee-uzhe-zdes/ (дата обращения: 01.08.2025).

6 В Беларуси запустили первый строительный 3D-принтер. Он может печатать конструкции из бетона // Onliner. – URL: https://realt.onliner.by/2025/08/14/pervyj-stroitelnyj-3d-printer (дата обращения: 02.08.2025).

7 Роботизация в строительном комплексе // BUDexport: информационно-аналитическая система поддержки экспорта строительных услуг. – URL: https://budexport.by/robotics/ (дата обращения: 03.08.2025).

8 Роботы на стройке: от снижения трудозатрат до увеличения интенсивности выполняемых работ. Миф или реальность // ibMedia. – URL: https://ibmedia.by/news/roboty-na-strojke-ot-snizheniya-trudozatrat-do-uvelicheniya-intensivnosti-vypolnyaemyh-rabot-mif-ili-realnost/ (дата обращения: 01.08.2025).


УДК 330.342.24:69

## ПРИНЦИПЫ ЦИРКУЛЯРНОЙ ЭКОНОМИКИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ


*З. Н. ЗАХАРЕНКО, А. В. АСТРЕЛИНА*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*


Возведение объектов следует рассматривать с учетом так называемого жизненного цикла [1]. Этапы жизненного цикла должны включать не только экологические показатели по выбросам углекислого газа $CO_2$ в атмосферу, но и экономические.

Жизненный цикл объектов по выбросам углекислого газа принято разделять на этапы (таблица 1):

– до начала эксплуатации объекта – связанный с производством строительных материалов (А1–А3) и выполнением строительных работ (А4, А5);

– в процессе эксплуатации объекта – непосредственно связанный с эксплуатацией, техническим обслуживанием, капитальным ремонтом, модернизацией и реконструкцией (В1–В7);

– в период ликвидации объекта – связанный с демонтажем конструкций, их транспортировкой, переработкой отходов и, как следствие, ликвидацией объекта (С1–С4) [2].

*Таблица 1* – **Этапы жизненного цикла объекта в соответствии со стандартами по устойчивости (EN 15978 «Sustainability of Construction Works»)**

| Этапы жизненного цикла | Основные | Дополнительные |
|---|---|---|
| **А1–А3** – производство строительных материалов | **А1** – поставка сырья; **А2** – транспорт;<br>**А3** – изготовление строительных материалов | |
| **А4–А5** – возведение | **А4** – транспорт; **А5** – строительные работы | |
| **В1–В7** – эксплуатация | **В1** – эксплуатация; **В2** – техническое обслуживание; **В3** – капитальный ремонт;<br>**В4** – модернизация; **В5** – реконструкция | **В6** – бытовое потребление энергии;<br>**В7 –** бытовое потребление воды |
| **С1–С4** – конец жизненного цикла | **С1** – демонтаж конструкций; **С2** – транспорт;<br>**С3** – переработка отходов;<br>**С4** – ликвидация объекта | |

В зависимости от назначения объекта выбросы углекислого газа на разных этапах жизненного цикла различны. Установлено, что почти половина выбросов приходится на производство строительных материалов. Большая доля выбросов приходится на эксплуатацию зданий – 30–40 %. Оставшаяся доля на сам процесс строительства составляет 8–15 % и снос – 2–5 %.

С экономической точки зрения необходимо перейти от оценки стоимости возведения объекта с использованием линейной модели экономики к оценке с использованием циркулярной модели. Линейная модель экономики предполагает расчет стоимости возведения с начала подготовки территории строительства до окончания самого процесса строительства. В результате мы получаем конечный продукт – готовый к эксплуатации объект.

Циркулярная экономика, или экономика замкнутого цикла, как понятно уже из названия, учитывает, помимо стоимости получения конечного продукта, затраты на его эксплуатацию и снос, то есть все затраты, включая его утилизацию. Продлить жизненный срок объекта можно за счет его ремонта, модернизации и реконструкции. Циркулярная экономика также означает и безотходность: отходы одного производственного процесса преобразуются в материалы для другого.

Циркулярная экономика в строительстве базируется на следующих **принципах** [1, 3]:

– организационного подхода;
– портфельной стратегии инвестиций;
– продуманной стратегии проектирования;
– подбора эффективных систем инженерного оборудования;
– подбора эффективных строительных материалов и конструкций.

*Принцип организационного подхода* показывает, что при использовании циркулярной экономики очень важно на стадии проектирования: использовать типовые конструкции; разрабатывать стратегию дальнейшей разборки и утилизации материалов и конструкций; предусматривать обменные площадки используемых материалов; организовывать сотрудничество непосредственно с организациями – изготовителями строительных материалов и конструкций, избегая посредников; использовать «выездную услугу» на объект (когда поставщик строительных материалов или инженерных систем предлагает свой товар или услугу непосредственно потребителю, он приезжает на объект лучше подготовленным с образцами материалов); предусматривать сотрудничество с поставщиками альтернативных материалов; оптимизировать цепочки поставок материалов и конструкций; стимулировать новые бизнес-модели поставок и утилизации материалов и конструкций.

*Принцип портфельной стратегии инвестиций* основан на формировании пакета инвестиций. При ремонте, реконструкции, сносе существующего здания важно рассматривать стоимость утилизации отходов как повторное использование строительных материалов по всему портфелю инвестиций, показывать центры консолидации строительных отходов и составлять карты расположения местных ресурсов, рассматривать возможное совместное использование (аренду) помещений и услуг.

*Принцип продуманной стратегии проектирования* предполагает минимизацию отходов путем использования, например, облегченных конструкций. Так, использование перемещаемых перегородок позволит свободно осуществлять перепланировку на объекте. При таком принципе важно предусматривать возможность восстановления строительных элементов; определять уровень адаптивности для всех типов зданий, используя моделирование конструкций и материалов; проектировать альтернативные материалы на основе вариантного выбора; использовать восстановленные элементы из других отраслей промышленности; сотрудничать с альтернативными компаниями, поставляющими аналогичные строительные материалы.

*Принцип подбора эффективных систем инженерного оборудования* предусматривает использование энерго-, ресурсоэффективных систем, например многоразовых конструкций и систем. При этом проектирование систем должно происходить с учетом их демонтажа. Должна быть также предусмотрена адаптация систем для дальнейшего развития. При вариантном проектировании хорошо использовать альтернативные системы (тканевые воздуховоды и т. д.). В дальнейшем необходимо предусмотреть возможность восстановления или утилизации инженерных систем. Как вариант, при разработке бизнес-плана можно рассмотреть возможность аренды систем инженерного оборудования или работу с производителями со стимулируемым возвратом.

*Принцип подбора эффективных строительных материалов и конструкций* базируется на выборе переработанных материалов (повторно используемых материалов), конструкций, обеспечивающих их упрощенную разборку. При изменении функционального назначения объекта строительства важно отдать приоритет конструкциям, которые легко помогут адаптировать здание к новой функции. При отделке объекта предпочтение необходимо отдавать материалам, подходящим под дизайн. Адаптация позволит применять типовые решения без дополнительных затрат на индивидуализацию. Нельзя также забывать о материалах, изготовленных из отходов других отраслей промышленности. Это позволит расширить базу используемых вторичных материалов.

**Список литературы**

1 Национальная стратегия развития экономики замкнутого цикла (циркулярной экономики) Респ. Беларусь на период до 2035 года : утв. постановлением Совета Министров Респ. Беларусь № 393 от 29.05.2024 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22400393 (дата обращения: 07.08.2025).

2 EU Policy Whole Life Carbon Roadmap for buildings // World Green Building Council. – URL: https://worldgbc.-org/article/eu-policy-whole-life-carbon-roadmap-for-buildings/ (дата обращения: 07.08.2025).

3 **Cheshire, D.** The Handbook to Building a Circular Economy / D. Cheshire // RIBA Publishing. – 2021. – 144 p.

УДК 72.01:378.016

## МЕТОДИКА «ЦВЕТ – ОБРАЗ» В ОБУЧЕНИИ СТУДЕНТОВ АРХИТЕКТУРНЫХ И ДИЗАЙНЕРСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ

*А. А. КАРАМЫШЕВ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Анализируя значимость развития цветовых систем и цветопредставления в историческом контексте, а также исходя из понимания современного состояния этого вопроса, нельзя не отметить некоторую разрозненность и общую бессистемность подходов к применению цвета в дизайне. Несмотря на то, что современная цветовая систематика обладает значительным потенциалом колористических средств и номенклатур, практичных подходов к применению этих средств, а также конкретных методик использования цветовых сочетаний и взаимодействий недостаточно. Зачастую опыт предыдущих эпох не помогает современному дизайнеру в подборе цвета. Сегодня многие ищут свой колористический стиль интуитивно, хаотично используя обрывочные сведения о методиках тех или иных авторов. Для того чтобы в некоторой степени исправить эту ситуацию, нами была разработана методика «цвет – образ».

Цель методики заключается не в том, чтобы навязать методы работы уже практикующему архитектору или заставить студента следовать жесткому алгоритму. Архитектор и дизайнер – профессии творческие, во многом личностные. Директивность здесь не всегда уместна. Методика не обязывает, не заставляет, предполагая и учитывая творческую инициативу. Используя принципы, заложенные в системе, вы просто улучшаете свое понимание и выстраиваете правильные задачи, следуя собственной природе. Методика «цвет – образ» является органичным следствием метааналитического подхода к обобщению опыта предшественников. Важнейшим принципом при ее создании является принцип относительности восприятия цвета у различных людей. Мы исходим из понятия о том, что восприятие цвета и сочетаний цветов разнится не только от общества к обществу, от культуры к культуре, но и от человека к человеку, мало того, оно разнится в самом человеке в зависимости от контекста, настроения, физического самочувствия и т. д. [1]. Невозможно выделить какой-то цвет, сочетание цветов и зафиксировать его в строгом определении того, что это сочетание означает с точки зрения эмоции, символического смысла и др. Каждый раз такое сочетание цветов будет отличаться в восприятии даже одного и того же зрителя, не говоря уже о разных людях. Тем не менее принципы методики «цвет – образ» позволяют создавать сочетания цветов так, чтобы в любое время, в любую погоду, с разной освещенностью и окружающим контекстом ваше архитектурное сооружение не теряло требуемой смысловой нагрузки и казалось гармоничным.

В основе строительства любого сооружения проектировщик видит две основополагающие фундаментальные реальности: цвет и форму объекта строительства. Из этих двух концепций создается

облик здания, на них мы ориентируемся в процессе разработки эскиза. Цвет зависим от формы, а формы не существует без цвета. В концепции «Цвет – образ» мы исходим из полноценного равенства этих категорий.

**1 Идея.** Поиск цвета и формы. Идея внешнего облика здания всегда лежит в контексте его функциональной сущности. Структурный анализ колористического базиса в общей семантике концепции архитектуры в контексте постмодернистского дискурса говорит нам о том, что архитектура – это текст визуальной среды города. Говоря о синтаксисе архитектуры, мы понимаем архитектуру как текст. Любое здание, сооружение, архитектурная форма являются текстом, транслируемым в визуальную городскую среду. Визуальная среда города – пространство текстов разной степени связности и направленности, с соответствующими номинативными и коммуникативными языковыми единицами: улицами и микрорайонами, отдельными сооружениями. Совокупность действующих закономерностей в пространстве смыслов архитектуры регулирует построение синтаксических единиц этого пространства, выстраивая непротиворечивую картину городского образа [2]. Простыми словами – любое здание есть текст в структуре визуальной городской среды. Так почему бы не подойти к этому буквально? Необходимо выразить визуальные образы через печатный текст. Другими словами, начинать нужно с выражения идеи образа.

Студентам предлагается начать поиск концепции в виде фразы, словосочетания, слогана. Зачастую это самый сложный этап. На этом этапе требуется активное мышление. Предполагается понять, что ваше будущее здание будет говорить о себе людям. Здание как фраза, как некоторое рекламное предложение. Что оно говорит о себе? Важно, чтобы это был эмоциональный посыл. Потому что дизайн – это про эмоции. Люди покупают то, что их привлекает. Привлечься – значит быть эмоционально заинтересованным. На этом этапе студент привыкает мыслить в терминах рекламного маркетинга, четко и конкретно осознавать, чем его здание будет отличаться от остальных, в чем его уникальность, уникальность предложения, идея.

Сформировав словесный образ, обычно название здания рождается само собой. Название является важным этапом концентрации усилий. Название должно быть кратким и энергоемким. При работе с разными курсовыми проектами подобный подход весьма актуален не только для отдельных зданий, скажем, общественной направленности, но и для промышленных индивидуальных объектов, вполне подходит для жилых домов и, конечно же, для микрорайонов, малых архитектурных форм и т. д. Определив название и слоган, мы приступаем ко второй стадии разработки нашего проекта – к клаузуре.

2 **Клаузура.** В Московской академии архитектуры (МАРХИ) принято следующее определение: *«Клаузура – вид учебного упражнения в архитектурных, дизайнерских и художественных школах, которое выполняется учащимся самостоятельно (без помощи преподавателя) за строго определённый промежуток времени»* [3]. Однако такое определение не единственное. Фрэнк Гери предпочитает вслед за Ле Корбюзье говорить о клаузуре как о способе мыслить. То есть это не столько упражнение, сколько перевод текста в графику. Рожденную мысль, фразу мы переносим на бумагу в виде рисунка. Есть разница между клаузурой и эскизом. Эскиз может отличатся проработкой частей здания, деталей плана, цветового решения. Клаузура – это моментальный набросок в попытке уловить те или иные особенности. Это мысль, выраженная графически. Очевидно, что на этой стадии таких набросков должно быть несколько. В данном контексте полезно поработать с формальной композицией. Она предполагает не столько рисунок фасадов здания, сколько просто набор фигур и линий, объединенных между собой композиционными принципами визуального центра и равновесия.

Таким образом, уточнив нашу фразу, текст и название в графическом решении, мы формируем эскиз. Эскиз основывается на клаузуре, дорабатывается, шлифуется. Эскиз – это уже самостоятельное руководство к действию. На этом этапе очень важно уделить внимание колористике объекта. Как уже было сказано, цвет невозможен без формы, а формы не существует без цвета. Эти вещи взаимосвязаны. Так почему же мы зачастую забываем о цвете? Проблема в том, что разработав форму, какая бы она ни была идеальная с точки зрения композиции, если мы не наполнили ее цветом изначально, в дальнейшем сделать это будет практически невозможно. Цветовое решение разрабатывается одновременно с формальным.

3 **Цвет.** Выбор цветового решения строится на принципе цветовых гармоний. По И. Иттену, это могут быть полярные цветовые соотношения (контрасты) или тональные (родственные) [4]. Подбираются несколько цветов (от двух до пяти – не более, т. к. уравновесить больше пяти цветов прак-

тически сложно), которые привязываются к какому-нибудь современному каталогу и номенклатуре: CAPAROL, RAL, NCS, PANTON и др.

4 На четвертой стадии студент приступает к подробному проектированию объекта, в том числе к разработке планов здания, разрезам, генплану и фасадам (у которых уже имеется цветовое решение с конкретной выкраской).

Зачастую интуитивный поиск студента, еще на стадии клаузуры, хаотичен и не приводит к качественному результату именно потому, что не соблюдается эта простая, казалось бы, последовательность. Кто-то что-то «чувствует», «видит» и хватается за это видение, пытаясь реализовать цельную композицию. Таким образом, дисциплинируя свое сознание в контексте методики «цвет – образ», мы приходим к необходимым нам выводам качественнее и быстрее, чем если будем следовать своим подсознательным импульсам. Художник имеет право на интуитивность, ему необязательно высказывать свою мысль вслух. Дизайнер подобного права лишен.

**Список литературы**

1 **Карамышев, А. А.** Методика образно-цветовых ассоциаций в творчестве архитектора / А. А. Карамышев, А. Н. Ефремов // Архитектура и строительство. – 2020. – № 6. – С. 51–54.

2 **Карамышев, А. А.** Цвет в контексте исторической среды: лингвистические особенности и корреляции / А. А. Карамышев // Архитектура и строительство. – 2020. – № 4. – С. 34–37.

3 **Кувшинов, А. А.** Архитектурное проектирование. Клаузура, как метод работы архитектора : учеб.-метод. пособие / А. А. Кувшинов, Е. А. Фаворская. – М. : МАРХИ, 2018. – 51 с.

4 **Иттен, И.** Искусство цвета / И. Иттен ; пер. с нем. – 3-е изд. – М. : Аронов, 2004. – 96 с.

УДК 69.07

## ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ, ВЛИЯЮЩИХ НА НАДЕЖНОСТЬ ЗДАНИЙ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ

*О. Н. КОНОВАЛОВА*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Реконструкция – совокупность строительно-монтажных, пусконаладочных работ и организационно-технических мероприятий, направленных на использование объекта по новому назначению и (или) связанных с изменением его основных технико-экономических показателей и параметров; для магистральной инженерной инфраструктуры, распределительной инженерной инфраструктуры, транспортной инфраструктуры и сооружений на них – изменение их пропускной способности, направления и (или) места расположения (замена их участков).

Наиболее распространенным способом реконструкции в целях устранения морального и физического износа объекта, а также для решения градостроительной задачи является надстройка зданий.

Надстройка – это повышение этажности здания или его частей. Такой вид реконструкции является наиболее эффективным, поскольку в результате увеличивается общая и полезная площадь в находящихся границах сложившейся застройки. Решение об увеличении высоты зданий принимают исходя из результатов обследования. Обследование – процесс, включающий в себя контроль, испытания, анализ и оценку конструкций зданий и сооружений в целях выяснения эксплуатационных качеств конструкций, целесообразности реконструкции зданий и сооружений, прогнозирование поведения конструкций в будущем.

Целью обследования являются определение действительного состояния строительных конструкций, получение количественных оценок фактических показателей качества: прочности, устойчивости, сопротивления теплопередаче, соответствия архитектурно-строительным нормам с учетом выявленных возможных изменений свойств и технических параметров, конструкций и материалов, происходящих в процессе их эксплуатации.

По итогу выполняемого обследования даются рекомендации и вариантное решение задач реконструкции. Они сводятся к определению высоты надстройки по заданной этажности застройки, по обеспечению нормативных разрывов между смежными зданиями, плотности жилого фонда и населения, проживающего на территории. Надстройки, как правило, всегда ухудшают освещение и

инсоляцию соседних зданий, поэтому при решении вопроса о возведении надстроек в старых кварталах и об их высоте следует учитывать комплекс проблем: градостроительных, экономических, эстетических и социальных.

Здание состоит из взаимосвязанных конструктивных элементов: фундаментов, стен, отдельных опор, прогонов и перекрытий. Сочетание этих основных элементов, каждый из которых выполняет свои специфические функции, представляет собой несущий остов здания.

В зависимости от сочетания элементов, составляющих несущий остов здания, различают основные конструктивные схемы: бескаркасную, каркасную и комбинированную (с неполным каркасом).

На современном этапе проектирования реконструкции особое место занимает тип конструктивной схемы (таблица 1).

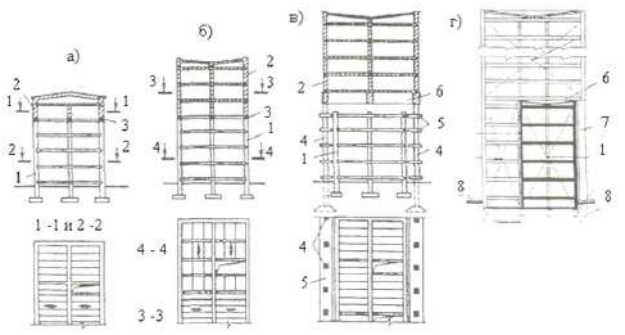
Выделим два типа конструктивных схем надстроек. К первому относят реконструкцию с восприятием нагрузки от надстраиваемых этажей на старое здание. Ко второму – передачу массы надстраиваемого объема на новые фундаменты. Таким образом, в первом варианте не требуется изменение объемно-планировочного решения здания, а рассматривается вопрос об усилении конструкций. В зданиях, запроектированных и построенных в 60–80-х годах прошлого столетия, заложен запас прочности в конструкциях стен и фундаментов, что обеспечивает многовариантное проектирование реконструкции.

При надстройках без усиления и с изменением конструктивной схемы обязательно предусматривают устройство поясов жесткости по верху всех старых стен для увеличения жесткости стенового остова и более равномерной передачи нагрузок от надстройки. По всему периметру здания на уровне стыка старой и новой кладки устраивают разгрузочные пояса. В пояса заанкеровывают балки перекрытий, создавая жесткую диафрагму. Пояс гасит деформации, препятствует появлению трещин и их распространению от старой кладки к новой и наоборот.

Конструкция пояса жесткости может быть в виде 6–8 рядов кладки с армированными стержнями диаметром 10 мм, а при требуемой большей высоте пояса жесткости применяется железобетон с армированием в виде прокатных профилей.

Расстояния между внутренними поперечными стенами или другими конструкциями, обеспечивающими пространственную жесткость, нормируются, что влияет на стратегию проектирования реконструкции. В обеспечении пространственной жесткости здания участвуют опоры, представляющие собой столбы или колонны, которые воспринимают нагрузки от вышележащих частей здания и передают их нагрузки на конструкции, расположенные ниже, или на свои собственные фундаменты.

*Таблица 1* – **Сравнительный анализ конструктивных схем**

| Графическое изображение плана, разреза | Основные характеристики |
|---|---|
|  | *а* – с передачей нагрузки на существующие несущие конструкции без изменения конструктивной схемы;<br>*б* – то же, с изменением;<br>*в* – с поперечными балками-стенками без передачи нагрузки на несущие конструкции существующего здания;<br>*г* – то же, с горизонтальными дисками-платформами (ростверками);<br>*1* – наружная стена до реконструкции;<br>*2* – наружная надстраиваемая стена;<br>*3* – покрытие/перекрытие;<br>*4* – колонны;<br>*5* – плиты балконов, лоджий;<br>*6* – плита покрытия;<br>*7* – самостоятельные наружные стены;<br>*8* – новые фундаменты |

Надстройка осуществляется без изменения конструктивно-планировочной схемы здания и существенного усиления его несущих элементов. По данному типу разрешается осуществлять надстройку не более двух этажей, используя резервы прочности, имеющиеся в стенах и фундаментах реконструируемого здания. Для равномерной передачи нагрузки от надстраиваемых этажей в верхней части существующего здания устраивают железобетонный пояс. Перепланировка надстраиваемых этажей решается с учетом несущих элементов существующего здания.

При увеличении этажности здания на 4 этажа нагрузку от надстройки переносят с поперечно несущих стен на продольно несущие в надстраиваемом объеме. При этом самонесущие стены до реконструкции требуют усиления, так же как и фундаменты.

При надстройке существующего здания от 5 до 10 этажей используют схему, которая предусматривает установку по периметру существующего здания на самостоятельные фундаменты несущие колонны каркаса, называемые колоннами «фламинго». Колонны устанавливают на самостоятельные фундаменты на расстоянии 1200–1500 мм от наружных стен существующего здания. Между колоннами и существующими наружными стенами укладывают горизонтальные плиты балконов или лоджий, что способствует увеличению ширины здания. В надстраиваемых этажах образуются однопролетные конструктивно-планировочные системы с поперечными балками-стенками, установленными через этаж, которые совмещают функции перегородок и несущих конструктивных элементов.

Таким образом, при реконструкции для обеспечения надежности зданий рассматриваются вопросы пространственного расположения и взаимосвязь всех несущих элементов, обеспечивающих его общую прочность, жесткость и устойчивость, и при необходимости заменяется конструктивная схема здания.

**Список литературы**

1 **Васильев, А. А.** Техническое обследование строительных объектов (с электронным приложением) : учеб. / А. А. Васильев. – Гомель : БелГУТ, 2020. – 429 с.

2 Об изменении законов : Закон Республики Беларусь от 28 июня 2024 г. № 15-З // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=Hk2300289 (дата обращения: 12.09.2025).

УДК 691.322

## О ПЕРСПЕКТИВАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАНОАКТИВНЫХ ДОБАВОК В БЕТОНАХ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

*В. А. КОНЫШКО, Т. В. ЯШИНА*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Экспериментальные данные 2020-х годов свидетельствуют о значительном улучшении ключевых эксплуатационных характеристик бетона при использовании наноактивных добавок. Наиболее выраженный эффект наблюдается при применении нанокремнезема (nano-$SiO_2$). Исследования Кембриджского университета демонстрируют, что введение 2 % nano-$SiO_2$ от массы цемента приводит к увеличению прочности на сжатие на 35 % по сравнению с контрольным образцом уже на 28-е сутки твердения [1]. Механизм упрочнения основан на исполнении наночастицами роли центров кристаллизации гидратных новообразований, значительно ускоряя гидратацию цемента, и одновременном заполнении мельчайших пор и капилляр размером менее 100 нм, которые являются концентраторами напряжений и основными путями проникновения агрессивных сред. Это подтверждается данными сканирующей электронной микроскопии, где наблюдается плотная, однородная микроструктура с минимальным количеством дефектов. Важным результатом является снижение проницаемости на 60 %, что напрямую повышает коррозионную стойкость конструкции в условиях воздействия хлоридов от противогололедных реагентов [1].

Углеродные нанотрубки проявляют себя иначе, их ключевая роль – микроармирование цементной матрицы на наноуровне. Работы Массачусетского университета показывают, что даже минимальная дозировка в 0,05 % от массы цемента повышает прочность на растяжение и трещиностойкость на 50 % [2], значит нагрузка, вызывающая образование трещин в модифицированном бетоне, значительно выше, а ширина раскрытия образующихся трещин существенно меньше. Это критически важно для ответственных конструкций путепроводов, испытывающих знакопеременные динамические нагрузки. Еще одним полезным эффектом является возникновение электропроводности (до $10^{-2}$ См/м) [2]. Это открывает возможности для создания «умных» конструкций, способных к самодиагностике путем измерения изменения электросопротивления при образовании дефектов.

Перспективы исследования по применению наноглин сфокусированы, в частности, на монтмориллоните. Его пластинчатые наночастицы создают в цементном камне барьерный эффект, существенно удлиняя и усложняя путь для проникновения воды и агрессивных ионов. Это подтверждается испытаниями на сульфатостойкость, где образцы с 3 % наноглины показали увеличение срока службы в 2 раза по сравнению с обычным бетоном [3]. Дополнительным преимуществом является снижение деформаций усадки на 40 %, минимизируя риск образования усадочных трещин в раннем возрасте.

Синергетический эффект наблюдается при использовании гибридных составов. Комбинация нанокремнезема и углеродных нанотрубок приводит к увеличению прочности на сжатие на 40–50 %, а ударная вязкость возрастает в разы. Это позволяет проектировать более легкие и изящные конструкции без потери несущей способности и ведет к экономии материалов и снижению постоянных нагрузок.

Однако при процессе применения наноактивных добавок имеется существенная проблема. Наноматериалы склонны к агломерации из-за высоких поверхностных энергий. Для достижения заявленных свойств необходимо обеспечить их равномерное распределение в объеме бетонной смеси. Это требует применения специального оборудования, такого как ультразвуковые диспергаторы, или использования поверхностно-активных веществ, что увеличивает сложность и стоимость технологии. Поэтому на сегодня лабораторные исследования направлены скорее на разработку эффективных и экономичных методов диспергирования и внедрения в промышленность нанодобавок, нежели поиск новых.

Экспериментальные данные находят конкретное воплощение в проектировании и возведении объектов транспортной инфраструктуры, где требования к долговечности и надежности наиболее критичны. При строительстве мостового перехода через реку Ока в составе скоростной магистрали М-12 использование наномодифицированного бетона позволило отказаться от дополнительной гидроизоляции опор в зоне переменного уровня воды, что дало экономию в 15 % от стоимости подводной части за счет уменьшения сечения элементов на 15–20 % при сохранении несущей способности и снизило постоянные нагрузки, позволяя применять более легкие фундаменты. Для дорожных покрытий и аэродромных плит ключевое значение имеет сопротивление усталостным нагрузкам и истиранию. Наноглина, благодаря своему барьерному эффекту, значительно снижает проникновение антигололедных реагентов и предотвращает коррозию арматуры в плитах. Исследования, проведенные на экспериментальном участке федеральной трассы М-4 «Дон», показали, что после 5 лет эксплуатации глубина износа наномодифицированного покрытия составила 0,8 мм против 2,3 мм у традиционного бетона. Такие показатели износа позволяют увеличить межремонтные интервалы с 10–12 до 20–25 лет. В тоннелестроении, где бетон подвергается комплексному воздействию влаги, химически агрессивных сред и динамических нагрузок, применяются составы с повышенным содержанием нанокремнезема и микрофибры. При строительстве тоннеля в обход города Выборг применение наномодифицированного бетона позволило отказаться от внешней гидроизоляционной мембраны, сэкономив около 36 дол. на 1 м² конструкции и сократив сроки работ на 15 %.

Экономический анализ для типового объекта показывает, что несмотря на увеличение стоимости бетонной смеси (20–25 %), суммарный экономический эффект в течение жизненного цикла объекта (100 лет) составляет 25–35 % [4]. Экспериментально доказана высокая эффективность наномодификации для кардинального улучшения ключевых эксплуатационных характеристик бетона. Комбинация нанодобавок позволяет не просто суммировать, а умножать положительные эффекты, достигая повышения прочности и ударной вязкости, что позволяет проектировать более легких и изящных конструкций сокращая материалоемкость без потери несущей способности.

Практическое применение в транспортном строительстве подтвердило не только техническую целесообразность, но и экономическую эффективность технологий. Несмотря на увеличение первоначальных затрат, совокупный экономический эффект в течение жизненного цикла возрастает за счет увеличения межремонтных интервалов с 10–12 до 20–25 лет и сокращения затрат на гидроизоляцию и ремонтные работы. Перспективными направлениями дальнейших исследований является разработка экономичных методов диспергирования наноматериалов, создание стандартизированных методик испытаний, разработка «умных» самодиагностирующих композитов и оценка долговременной (50+ лет) долговечности наномодифицированных конструкций в реальных условиях эксплуатации.

**Список литературы**

1 Impact of Nano-silica on the hydration, strength, durability, and microstructural properties of concrete: A state-of-the-art review / F. Althoey, F. Zaid, R. Martínez-García [et al.] // Sciencedirect.com. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509523001766 (date of access: 18.08.2025).

2 Physicomechanical Properties of Carbon Nanotubes Reinforced Cementitious Concrete / P. C. Chiadighikaobi, A. A. Abd Noor, J. P. Vladimir, A. S. Markovich // ResearChgate. – URL: https://www.researchgate.net/publication/375463365_Physicomechanical_Properties_of_Carbon_Nanotubes_Reinforced_Cementitious_Concrete_-A_Review (date of access: 21.08.2025).

3 **Affaf, N.** Montmorillonite (MMT) nanoclay in smart coatings for corrosion protection of metal alloy / N. Affaf, J. Alias, N. A. Alang // ResearChgate. – URL: https://www.researchgate.net/publication/377649897_Montmorillonite_MMT_nanoclay_-in_smart_coatings_for_corrosion_protection_of_metal_alloy_a_brief_review (date of access: 21.08.2025).

4 **Иноземцев, С. С.** Технико-экономическая эффективность применения наномодифицированного наполнителя для асфальтобетона / С. С. Иноземцев, Е. В. Королев // Cyberleninka. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tehnikoekonomicheskaya-effektivnost-primeneniya-nanomodifitsirovannogo-napolnitelya-dlya-asfaltobetona/viewer (date of access: 07.09.2025).

УДК 534.83:613.644

# АКУСТИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРИЯХ УО «БелГУТ»

*М. А. ЛИХАЧЁВА, А. В. ЩЕГЛОВА*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Акустическая безопасность является критически важным элементом системы охраны труда в любом учреждении, где присутствуют источники шума. Для Белорусского государственного университета транспорта (БелГУТ) – ведущего вуза в области подготовки инженерных кадров для транспортной отрасли – эта проблема стоит особенно остро. Испытательные лаборатории университета, где проводятся исследования тягового подвижного состава, элементов вагонов, дорожных машин, энергетических установок и других систем, являются зонами с потенциально высоким уровнем шума.

Цель данного исследования – проанализировать проблему акустической безопасности в испытательных лабораториях БелГУТа, выявить основные источники шума, оценить их воздействие на персонал и предложить комплекс мер по защите. Актуальность темы обусловлена необходимостью сохранения здоровья сотрудников и студентов, обеспечения точности и воспроизводимости экспериментальных данных, а также соблюдения строгих требований законодательства Республики Беларусь в области охраны труда.

Лаборатории, где уровень шума находится выше нормы: «Тормозные системы подвижного состава», «Электрические и электронные системы», «Динамика и прочность», «Комплектующие и материалы», испытательный полигон [1].

**Основные источники шума в испытательных лабораториях:**

1 Испытательные стенды двигателей и трансмиссий. Электродинамические тормоза, дизельные и электрические двигатели, работающие на различных режимах, системы вентиляции стендов генерируют шум широкополосного характера с высоким уровнем звукового давления (до 90–110 дБА).

2 Стенды для испытания узлов железнодорожного подвижного состава. Вибрационные установки, механизмы для испытания на ударную нагрузку, гидравлические прессы, работающие приводы создают интенсивный низко- и среднечастотный шум.

3 Аэродинамические работы. При работе вентиляторов мощных напора и тяги возникает высокочастотный шум, характерный для турбулентных потоков воздуха.

4 Электротехническое и электронное оборудование. Источники питания, трансформаторы, системы охлаждения высокомощного оборудования, генераторы сигналов могут быть источником постоянного гула.

5 Вспомогательное оборудование. Системы вентиляции и кондиционирования воздуха, компрессоры, насосные установки, станки в учебно-производственных мастерских.

Таким образом, шум в лабораториях часто является постоянным широкополосным с преобладанием средне- и высокочастотных составляющих, наиболее вредных для органа слуха.

Длительное воздействие повышенного уровня шума в лабораторных условиях может привести:

1 К специфическим последствиям:

– стойкому снижению остроты слуха (профессиональная тугоухость, нейросенсорная потеря слуха);

– шумовой болезни.

2 Неспецифическим последствиям:

– функциональным нарушениям нервной системы: повышенной утомляемости, раздражительности, снижению памяти и концентрации;

– расстройствам сердечно-сосудистой системы (тахикардия, повышение артериального давления);

– ухудшению зрительного восприятия, замедлению скорости психических реакций.

Кроме прямого вреда здоровью, шум негативно влияет на качество работы:

– повышает вероятность ошибок при проведении измерений;

– затрудняет речевое общение между сотрудниками, что может привести к непониманию команд и инструкций, особенно в аварийных ситуациях;

– снижает производительность труда и увеличивает психоэмоциональную нагрузку.

Методы оценки уровня шума в лабораториях:

1 Гигиеническая оценка. Проводится с помощью шумомера (например, «Октава-110А») и анализатора спектра. Измеряются уровни звука в дБА, эквивалентные и максимальные уровни, а также уровни звукового давления в октавных полосах частот.

2 Расчетный метод. Применяется на стадии проектирования лаборатории или нового оборудования для прогнозирования уровней шума.

3 Аттестация рабочих мест. Проводится в обязательном порядке с занесением результатов в карту аттестации, где указывается класс условий труда по фактору «шум».

Борьба с шумом должна вестись комплексно, с применением методов в следующей последовательности приоритетов: устранение источника → снижение на пути распространения → защита получателя [2].

**Коллективные средства защиты (инженерно-технические решения):**

1 Замена шумного оборудования на более современное и малошумное (например, использование электроприводов вместо пневматических).

2 Своевременное техническое обслуживание, смазка, балансировка вращающихся деталей.

3 Установка оборудования на виброизолирующие основания (амортизаторы, пружинные виброизоляторы).

4 Акустическая обработка помещений. Обшивка стен и потолков звукопоглощающими материалами (минераловатные плиты, акустические перфорированные панели, сэндвич-панели). Это позволит снизить уровень отраженного звука.

5 Звукоизоляция. Устройство звукоизолирующих кожухов, кабин и боксов для особо шумного оборудования (например, для компрессора или генератора). Использование глушителей шума в системах вентиляции.

6 Планировочные решения. Размещение особо шумных лабораторий в отдельных зданиях или изолированных крыльях, подальше от помещений для умственного труда.

**Индивидуальные средства защиты (СИЗ)** применяются, когда техническими методами не удается снизить шум до ПДУ.

К средствам защиты от шума относят:

– противошумные наушники (закрывают всю ушную раковину) – обеспечивают максимальную степень защиты;

– противошумные вкладыши (беруши) (вставляются в слуховой проход) – бывают одноразовые и многоразовые;

– противошумные шлемы – используются при очень высоких уровнях шума и одновременной необходимости защиты головы.

Обеспечение акустической безопасности в испытательных лабораториях Белорусского государственного университета транспорта – это не просто формальное требование законодательства, а комплексная научно-обоснованная и практическая задача. Ее успешное решение напрямую влияет на сохранение здоровья профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и студентов, а также на качество образовательного и научно-исследовательского процесса.

Наиболее эффективным путем является внедрение современных инженерно-технических решений на стадии проектирования и модернизации лабораторий. Однако даже в существующих условиях строгое соблюдение организационных мер, регулярный контроль уровней шума и обязательное использование СИЗ позволяют минимизировать профессиональные риски. Постоянное внимание руководства университета и каждой конкретной кафедры к этой проблеме является залогом создания безопасной и высокопроизводительной рабочей и учебной среды.

**Список литературы**

1 Испытательный центр железнодорожного транспорта БелГУТа : [сайт]. – Гомель, 2000–2025. – URL: https://www.bsut.by/science/izht/iczht/otdel-ispytanij-ob-ektov-zheleznodorozhnogo-transporta-i-infrastruktury (дата обращения: 19.08.2025).

2 СН 2.04.01-2020. Защита от шума : [сайт]. – Минск, 2020–2025. – URL: https://normy.by/tnpa/1/6858.pdf (дата обращения: 19.08.2025).

УДК 725.31: 711.6

## ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ВОКЗАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС В ПЛАНИРОВОЧНОЙ СТРУКТУРЕ ГОРОДА

*И. Г. МАЛКОВ, Ю. Н. ВЫЛЕТНИКОВА*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Формирование и развитие материально-технической базы государства напрямую связано с состоянием его транспортной инфраструктуры. Во многих странах она включает сети железнодорожного, автомобильного, воздушного, речного и морского транспорта. Для нашего государства с его относительно небольшой территорией велика роль железнодорожного и автомобильного транспорта. Об этом свидетельствуют и статистические данные объемов перемещенных грузов и перевезенных пассажиров.

В настоящее время железная дорога территориально находится в пределах границ Республики Беларусь, и ее эксплуатационная длина составляет 5,5 тысяч километров.

Наиболее крупные железнодорожные узлы – Минск, Брест, Гомель, Орша, Барановичи, Жлобин, Калинковичи, Могилев, Витебск, Полоцк. Железнодорожные перевозки – приоритетный для нашей страны вид транспорта в передвижении пассажиров на внегородских маршрутах. Одним из основных элементов в создании условий для передвижения пассажиров на транспорте являются вокзалы. На вокзалах ежедневно ведется обслуживание значительного числа людей, отправившихся в дорогу. Пассажирские вокзалы обычно рассчитываются на многолетнюю эксплуатацию и подобно иным общественным зданиям имеют в своем составе обширный перечень помещений, включающий площади для непосредственного обслуживания пассажиров, служебно-технические и вспомогательные. Кроме того, каждый вокзал с прилегающей площадью является частью градостроительной структуры города или поселка и непосредственно влияет на его архитектурно-планировочную композицию.

Для обслуживания пассажиров и пассажирского движения на сети железнодорожных дорог сооружают специальные станции. Они подразделяются на две категории: пассажирские станции, выполняющие операции по пропуску пассажирских поездов, посадке и высадке пассажиров и их обслуживанию, и пассажирские технические станции, на которых выполняют операции по подготовке пассажирских составов в рейс: мойку, экипировку, ремонт, снабжение и др.

Вокзалы, как правило, являются крупными общественными сооружениями общегородского значения и часто определяют первое впечатление от города, а иногда и от страны в целом. Эти обстоятельства влияют на те специфические требования, которые должны быть предъявлены к их архитектурной композиции.

Объемно-планировочные решения зданий вокзалов должны соответствовать следующим требованиям:

а) обеспечивать взаимосогласованную организацию движения пассажиров и посетителей с разделением главным образом в больших и крупных вокзалах потоков прибытия и отправления, а также потоков дальних, местных, транзитных и пригородных пассажиров;

б) предусматривать расположение операционных помещений и устройств (справочное бюро, билетные и багажные кассы, камеры хранения и др.) приближенно к главным путям движения основных потоков пассажиров;

в) предусматривать расположение помещений, предназначенных для ожидания пассажиров, а также предприятий общественного питания и торгово-бытового обслуживания пассажиров приближенно к перрону с отделением соответствующих помещений и зон от главных путей движения пассажиров;

г) предусматривать расположение комнат длительного ожидания, в том числе предназначенных для инвалидов, а также комнат матери и ребенка изолированно от наиболее шумных помещений и зон вокзала, возможно, даже с устройством для соответствующих категорий пассажиров специальных выходов на перрон;

д) обеспечивать удобство эксплуатации для персонала, а также перронных бригад с устройством для них отдельных выходов на перрон.

В решениях вокзалов, как и других общественных зданий, различают централизованные, блокированные и павильонные схемы. Централизованные, компактные решения характерны для отдельно стоящих «многофункциональных» зданий вокзалов, а блокированные – для объединенных вокзалов или вокзалов, кооперированных с административно-служебными, техническими или другими зданиями.

В композиции вокзальных комплексов исключительно большую роль играют элементы благоустройства и архитектуры малых форм, а также творчески осмысленное использование природного и городского окружения, например раскрытие из интерьеров вокзалов речных берегов или морских просторов, силуэта гор или группы деревьев, а также ценной в культурно-историческом или художественно-эстетическом отношении существующей или проектируемой застройки.

Наибольший художественно-эстетический эффект может быть достигнут только при взаимоувязанном решении всех зданий, сооружений и элементов, входящих в комплекс вокзала.

Существующие здания вокзалов Беларуси условно можно разделить на два типа по потенциальным возможностям активного влияния на формирование градостроительной структуры. Первые – сугубо функциональные вокзалы островного расположения по отношению к железнодорожным путям, не имеющие благоприятных возможностей формирования привокзальной территории и развития объемно-планировочного потенциала самого здания. Таковы, к примеру, вокзалы в городах Бресте и Орше. Железнодорожные станции этих городов, представляющие крупные узлы с большим пассажиропотоком, практически не имеют территориальных ресурсов для развития вокзальных комплексов. Участие таких вокзалов в формировании общей градостроительной композиции весьма ограничено и сводится к локальным композиционным решениям.

Второй тип – вокзалы с боковым или смешанным вариантом расположения по отношению к железнодорожным магистралям, которые являются частью градостроительных образований, непосредственно и органически вливаясь в их структуру. К этому типу следует отнести вокзалы в городах Минске, Гомеле, Витебске. Крупные здания этих вокзалов являются архитектурными доминантами, замыкая на своем объеме развитую привокзальную площадь и примыкающие либо завершающиеся возле них улицы. Такие вокзальные комплексы, включающие основное здание и привокзальную площадь, служат крупными политранспортными узлами городского и междугородного транспорта, являются важными архитектурно-композиционными элементами формированиями названных городов.

Принципы проектирования вокзальных комплексов претерпевают значительные изменения. Вокзалы из сугубо специализированных зданий по обслуживанию пассажиров превращаются в крупные общественные здания многофункционального назначения, играющие важную роль в формировании архитектурно-композиционного облика важнейших градостроительных зон городов. Являясь для каждого из приезжающих первым местом, где формируется представление о городе, они, кроме своего сугубо функционального назначения, должны являть образцы градостроительной эстетики и культуры конкретного населенного пункта.

**Список литературы**

1 Железная дорога Беларуси: История и современность / В. Г. Рахманько, А. Б. Бессольнов, В. А. Шоба [и др.] ; под общ. ред. В. Г. Рахманько. – Минск : Триолета, 2001. – 488 с.

2 **Малков, И. Г.** Архитектура железнодорожных вокзальных комплексов / И. Г. Малков, И. И. Малков, М. М. Власюк ; под общ. ред. И. Г. Малкова. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 116 с.

УДК 539.3+624.046+624.074.43

# ВЛИЯНИЕ КРИТЕРИЯ ОСТАНОВКИ МЕТОДА НЬЮТОНА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ОБОЛОЧЕК

*Н. А. МИШУРЕНКО*
*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Российская Федерация*

Оболочечные конструкции получили широкое распространение в различных отраслях промышленности ввиду разнообразия геометрических форм [1–3], используемых при изготовлении данных конструкций, материалов и т. д. [4–6]. В связи с этим важной задачей является развитие методов расчета данных конструкций [7–9].

В статье [10] авторами предложен вычислительный алгоритм для расчета НДС и устойчивости тонкостенных оболочек, построенный на применении комбинации численных методов: метода Ритца для сведения вариационной задачи о поиске минимума функционала к решению системы нелинейных алгебраических уравнений; метода Ньютона для решения полученной системы.

В качестве критерия остановки итерационного процесса в методе Ньютона принята норма абсолютной разности между текущей и предыдущей итерацией [10]:

$$\left\| \tilde{X}_n^m - \tilde{X}_n^{m-1} \right\| \le \varepsilon, \tag{1}$$

где $\tilde{X}_n^m$ и $\tilde{X}_n^{m-1}$ – векторы значений числовых параметров метода Ритца на текущей и предыдущей итерации в методе Ньютона; $\| \ \|$ – норма вектора; $\varepsilon$ – точность метода Ньютона; $n$ – номер итерации по нагрузке; $m$ – номер итерации в методе Ньютона.

К достоинствам данного подхода можно отнести простоту вычисления, однако оценка разности не дает гарантии получения истинного решения.

Модификацией критерия (1) является относительная норма разности решений между текущей и предыдущей итерацией [11]:

$$\frac{\left\| \tilde{X}_n^m - \tilde{X}_n^{m-1} \right\|}{\left\| \tilde{X}_n^m \right\|} \le \varepsilon. \tag{2}$$

Здесь обозначения переменных те же, что и в (1).

Вышеописанные условия остановки численного метода относятся к критериям, основанным на изменении решения. Также следует отметить группу критериев, основанных на вычислении невязки решения: абсолютная и относительная невязка. Общий подход по составлению условия остановки численного метода при вычислении невязки аналогичен определению разности.

Очевидным критерием остановки численных методов является введение максимального количества итераций для решения исследуемой задачи. Таким образом, получается избежать бесконечного решения задачи и внести корректировки в алгоритм для обеспечения его вычислительной эффективности.

Нередко при формировании вычислительных алгоритмов используют комбинации критериев остановки численного решения. Однако следует отметить, что в зависимости от исследуемой задачи, используемых численных методов и пр. наилучшая комбинация данных критериев может меняться.

**Список литературы**

1 **Старовойтов, Э. И.** Деформирование трехслойной круговой цилиндрической оболочки в температурном поле / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко, Д. В. Тарлаковский // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2016. – № 1. – С. 91–97. – EDN: VQBYST.

2 Параметрические колебания подземного и надземного нефтепровода / И. О. Разов, В. Г. Соколов, А. В. Дмитриев, А. В. Березнев // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 3 (105). – С. 48–60. – DOI: 10.31660/2782-232X-2023-3-48-60. – EDN: CKCLDB.

3 **Кузнецова, В. О.** К вопросу учета кинетики наводороживания на предельное состояние сферических оболочек из титанового сплава / В. О. Кузнецова // Строительные конструкции, здания и сооружения. – 2024. – № 2 (7). – С. 4–14. – EDN: SZJYCD.

4 **Пшеничнов, С. Г.** Нестационарные волновые процессы в цилиндре из функционально-градиентного вязкоупругого материала / С. Г. Пшеничнов // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика. – 2024. – № 2. – С. 37–44. – DOI: 10.55959/MSU0579-9368-1-65-2-5. – EDN: AAPONG.

5 **Трещев, А. А.** О механических испытаниях тонкостенных цилиндрических оболочек из композитных материалов / А. А. Трещев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 7. – С. 90–97. – DOI: 10.24412/2071-6168-2023-7-90-91. – EDN: ANDSZH.

6 **Петров, В. В.** Расчет неоднородных по толщине оболочек с учётом физической и геометрической нелинейностей / В. В. Петров // Academia. Архитектура и строительство. – 2016. – № 1. – С. 112–117. – EDN: VNRSEV.

7 **Каюмов, Р. А.** Большие прогибы, потеря устойчивости и закритическое поведение пологих панелей и арок переменной толщины на упругом основании / Р. А. Каюмов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2024. – № 2. – С. 33–41. – DOI: 10.15593/perm.mech/2024.2.04. – EDN: KFDQBX.

8 **Карпов, В. В.** Прочность и устойчивость подкрепленных оболочек вращения : в 2 ч. Ч. 1. Модели и алгоритмы исследования прочности и устойчивости подкрепленных оболочек вращения / В. В. Карпов. – М. : Физматлит, 2010. – 288 с. – EDN: UIRNWJ.

9 **Тумашик, Г. А.** Исследование статической и динамической прочности цилиндрической оболочки, контактирующей с круговой диафрагмой / Г. А. Тумашик, А. И. Фрумен // Вестник Московского авиационного института. – 2012. – Т. 19, № 5. – С. 192–196. – EDN: PIGEEH.

10 **Мишуренко, Н. А.** Вычислительный алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния и устойчивости тонкостенных оболочек / Н. А. Мишуренко, А. А. Семенов // Вестник МГСУ. – 2025. – Т. 20, № 6. – С. 850–866. – DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.850-866. – EDN: JBQTRI.

11 **Самарский, А. А.** Численные методы / А. А. Самарский, А. В. Гулин. – М. : Наука, 1989. – 432 с.

УДК 69.059.4

# ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПУТЕМ ВНЕДРЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*М. М. ПЕНЯЗЬ, О. Е. ПАНТЮХОВ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Актуальность проблемы повышения долговечности строительных конструкций обусловлена возрастающими требованиями к качеству и надёжности зданий и сооружений в Республике Беларусь. Современные условия эксплуатации предполагают значительную нагрузку на конструкции, обусловленную суровыми климатическими условиями, высокой степенью антропогенного воздействия и высокими стандартами безопасной эксплуатации. Поэтому возникает необходимость комплексного подхода к решению вопросов долговечности, направленного на внедрение инновационных материалов и технологий, позволяющих существенно увеличить срок службы конструкций и снизить затраты на ремонт и восстановление.

Характеристика инновационных материалов для повышения долговечности. Развитие науки и техники открывает новые горизонты для разработки инновационных материалов, способных существенно увеличить срок службы строительных конструкций. Рассмотрим наиболее важные категории таких материалов, доказавшие свою эффективность в условиях Республики Беларусь.

Углеволоконные композитные материалы. Углеволоконные композиты представляют собой уникальный класс материалов, состоящих из сверхпрочного углеволокна и смолы, образующей прочный каркас. Например, во время реставрации моста через реку Нёман использовалась углеволоконная сетка, установленная поверх старого железобетона, что повысило прочность конструкции почти вдвое.

Цементные композиции с микроармированием. Особый интерес представляют цементные композиции, обогащённые мелкими фракциями стекловолокна, арамидных нитей или полипропиленового волокна. Микроармирование позволяет существенно повысить устойчивость к растягивающим усилиям, предотвратить образование микротрещин и защитить бетон от агрессивных воздействий окружающей среды. Например, при строительстве торгового центра в Гомеле была использована система микрофибры, введённая в бетонную смесь, что сократило количество необходимых инъекций раствора и восстановлений.

Полимерные композиты и плёнкообразователи. Эта группа материалов представлена различными полимерными композициями, наносимыми в жидком состоянии на поверхность конструкций. Широкий ассортимент полимерных композиций позволяет подобрать оптимальное решение для любых видов строительных конструкций, будь то сталь, алюминий, бетон или дерево. Например, покрытия из полиуретана и полиамида наносятся на стальные трубы трубопроводов, предназначенные для подачи питьевой воды, предотвращая возникновение коррозии и обеспечивая бесперебойную подачу чистой воды населению.

Геосинтетические материалы. Геосинтетика – особый класс инновационных материалов, предназначенных для укрепления грунтов, стабилизации земляных насыпей и организации дренажа. Эти материалы изготавливаются из полиэстера, полиэтилена и других синтетических волокон, выдерживающих долговременные нагрузки и агрессивные воздействия. Например, георешётки использовались при восстановлении автомобильной трассы в Минской области, предотвратив размывание насыпи и сохранив проезжую часть в хорошем состоянии на протяжении долгих лет.

Антикоррозионные покрытия. Предназначены для защиты металла от коррозии, вызванной контактом с воздухом, влагой и химическими веществами. Они содержат активные компоненты, способные нейтрализовать вредные окислители и формировать плотную пленку, предотвращающую доступ кислорода и влаги к металлу. Например, многоэтажные резервуары нефтехранилища в Новополоцке защищены комбинацией толстослойного и тонкого антикоррозионного покрытия, гарантирующего полную герметизацию и защиту металла на многие годы вперед.

Фотокаталитические материалы. Обладают уникальным свойством разлагать загрязняющие вещества под действием света. Этот механизм основан на каталитических реакциях, происходящих на поверхности фотокатализа. Такая реакция запускается при контакте с ультрафиолетом, кислородом и водяным паром, превращая грязь и токсины в безвредные соединения. Например, новый медицинский корпус поликлиники в Минске оборудован окнами с покрытием из титанового диоксида, которое автоматически очищает поверхность от пыли и болезнетворных микроорганизмов, обеспечивая стерильную среду.

Газопроницаемые мембраны. Служат для создания воздухообмена и удаления лишней влаги из внутренних пространств. Мембранные покрытия пропускают водяной пар наружу, оставляя сухой внутренний слой, одновременно предотвращая попадание воды извне. Например, в ходе строительства школы-интерната в Борисове применялась особая мембрана «Tyvek», обеспечивающая идеальный баланс притока свежего воздуха и удержания тепла, тем самым улучшив условия пребывания детей и педагогов.

Огнезащитные материалы. Особое внимание уделяется огнестойким материалам, способным защищать конструкции от огня, дыма и токсичных газов. Существуют два класса огнезащитных материалов: огнестойкие краски и лаки, а также огнеупорные штукатурки и пропитки. Например, театральный зал областного театра в Орше прошёл обработку специальными огнезащитными красками, что гарантировало пожарную безопасность зрителей и артистов на долгие годы вперёд.

Представленные выше материалы и технологии формируют фундамент для эффективной борьбы с основными причинами сокращения долговечности строительных конструкций и позволяют создавать высококачественные и долговечные объекты, пригодные для длительного и продуктивного использования.

Проблемы и препятствия на пути внедрения инновационных материалов.

Несмотря на очевидные преимущества инновационных материалов, существует целый ряд препятствий, затрудняющих их массовое внедрение. Ниже приведены основные проблемы и предложены способы их преодоления.

1 Стоимость материалов. Высокая цена некоторых инновационных материалов является главным препятствием для их широкого распространения. Решение проблемы лежит в плоскости финансовой поддержки со стороны государства и льготного кредитования для покупателей и поставщиков.

2 Трудности в освоении новых технологий. Недостаточный уровень осведомленности о новых продуктах и технологиях усложняет принятие решений о внедрении инновационных материалов. Выходом из ситуации является организация образовательных курсов и конференций, посвящённых новым тенденциям в сфере строительства.

3 Законодательные ограничения. Отдельные нормы и правила мешают широкому распространению инновационных материалов. Требуется внесение поправок в законодательство, регламентирующих допуск новых материалов и упрощающих процедуру их регистрации и лицензирования.

Решение обозначенных проблем возможно только при активной поддержке правительства и общественности. Следует организовать координацию усилий между государственными органами власти, представителями науки и бизнесом, разработать стратегию совместного движения к достижению поставленных целей.

Вопрос повышения долговечности строительных конструкций является актуальным и многоаспектным. Успехи в науке и технике предоставляют прекрасные возможности для воплощения новых идей и технологий в жизнь. Используя представленные в работе материалы и советы, специа-

листы смогут значительно повысить долговечность конструкций, уменьшить затраты на ремонт и восстановление, а также гарантировать безопасный и комфортный быт людям.

**Список литературы**

1 **Андреев, С. Е.** Экологичные строительные материалы будущего / С. Е. Андреев, Н. Ю. Иванова // Строительная наука и техника. – 2024. – № 2. – С. 15–22.

2 **Морозова, Е. В.** Строительные материалы будущего / Е. В. Морозова, А. Н. Петров // Журнал строительной индустрии. – 2022. – № 1. – С. 8–15.

3 **Подлесная, Я. Ю.** Обзор инновационных архитектурных решений и материалов / Я. Ю. Подлесная // Альманах архитектора. – 2022. – № 4. – С. 57–62.

4 **Тихонова О. М.** Новые технологии строительства и качество жилой застройки / О. М. Тихонова // Вестник Академии наук Беларуси. Серия «Архитектура и градостроительство». – 2023. – № 4. – С. 21–29.

УДК 625.8

## КОЛЕБАНИЯ СВАИ ПРИ ВНЕЗАПНОЙ ОСАДКЕ ЧАСТИ ОСНОВАНИЯ

*А. А. ПОДДУБНЫЙ, Е. Е. КИЛЬЧЕНКО*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Сваи, являющиеся специализированными стержневыми элементами, играют критически важную роль в современном строительстве. Они служат для передачи нагрузки от зданий и сооружений через рыхлый и слабый слой почвы к более плотным и крепким глубоким слоям, тем самым обеспечивая устойчивость и надёжность различных конструкций. На сегодня сваи находят широкое применение практически повсеместно и в огромных количествах, что обусловлено их уникальными свойствами и способностью справляться с различными нагрузками в самых разных условиях.

Следует отметить, что свойства упругого основания, куда полностью или частично погружается свая, сильно влияют на динамику и стабильность конструкции. Это обусловлено тем, что сваи могут подвергаться значительным внешним воздействиям. Взаимодействие свай с основанием отражается в дифференциальных уравнениях изгиба сваи. В этом уравнении добавляется реакция основания в качестве дополнительной нагрузки, что, в свою очередь, обусловливает необходимость детального исследования данного аспекта.

На текущий момент в научной литературе накоплено множество работ, глубоко исследующих проблемы взаимодействия свай и поддерживающих их оснований. В рамках этих научных работ проводятся обширные эксперименты и моделирования, направленные на изучение таких ключевых вопросов, как прочность, динамика и устойчивость элементов системы «свая – основание». Среди представленных в исследовательских трудах моделей оснований, модель Винклера [1] заслуживает особого внимания, так как она является наиболее простой с точки зрения вычислительных методик и достаточно эффективной в применении. Однако это не единственный подход, который активно рассматривается научным сообществом. Также существует ряд других моделей оснований, включающих многопараметрические, нелинейные и неоднородные, которые, безусловно, расширяют горизонты исследования.

Что касается самих свай, то их моделирование может осуществляться с использованием различных методов, включая модели стержней Эйлера – Бернулли, Тимошенко, ступенчатые конструкции и конструкции с переменной изгибной жёсткостью. В рамках научных работ также рассматриваются многочисленные силы, формирующие напряжённо-деформированное состояние сваи, включая функциональные и тангенциальные силы, а также моменты. Кроме того, в ряде работ детально изучается влияние граничных условий и глубины погружения сваи, принимается во внимание многослойность основания, что, безусловно, имеет большое значение для полноты понимания процессов.

Важно отметить, что, помимо аналитических методов, которые обычно используются для решения задач динамики и устойчивости, учёные также активно применяют методы конечных элементов, методы конечных разностей, итерационные подходы, а также методы начальных параметров. Вопросы оптимизации устойчивости стержней на упругих основаниях также находят своё место в рамках данного направления исследований, что подчеркивает его многогранность.

Основная масса теоретических и экспериментальных работ, сосредоточенных на данной теме, имеет своей целью установление прямых зависимостей предельных напряжений и деформаций, критических сил, частот и форм собственных и вынужденных колебаний свай от изменяющихся па-

раметров системы «свая – основание». К числу таких параметров можно отнести размеры и форму поперечного сечения сваи, характеристики материалов, использованных в конструкции сваи и в основании, а также условия закрепления сваи.

Из более глубокого анализа современной научной литературы можно сделать вывод о настоятельной необходимости разработки методики, касающейся моделирования состояния системы «свая – основание», которое возникает в процессе эксплуатации в результате внезапного повреждения, изменяющего расчётную схему системы под нагрузкой. К примеру, максимально нагруженная свая, которая сталкивается с внезапной полной или частичной осадкой основания, теряя в этом случае боковую поддержку, начинает вести себя как свободный стержень. Этот процесс становится особенно интересным, так как непосредственно связан с наличием случайных эксцентриситетов сжимающей нагрузки, что, в свою очередь, приводит к возникновению моментного напряжённого состояния и первичного прогиба.

Вследствие этих изменений может происходить либо непрерывное наращивание изгибных деформаций без потери устойчивости, либо начало изгибных колебаний. В ходе этих колебаний также происходит рост и перераспределение напряжений и деформаций, что может привести к нарушению штатной работы конструкции и, в конечном счёте, к её разрушению. Поэтому такие системы с точки зрения строительной механики следует относить к конструктивно нелинейным объектам, которые изменяют свою расчётную схему под нагрузкой с динамическими догружениями, вызванными внезапными структурными перестройками [2].

В ходе научной работы была успешно решена новая задача, заключающаяся в исследовании динамического процесса во внецентренно сжатой свае, которая полностью погружена в упругое основание Винклера. Этот процесс может быть спровоцирован как частичной осадкой основания, так и образованием подземной полости вокруг сваи, также известной как пузырь. Актуальность данного исследования продиктована расширением применения тонких и длинных свай в конструкции морских сооружений, мостов, путепроводов, эстакад и других подобных объектов, которые полностью или частично погружены в многослойные основания и подвергаются воздействию значительных боковых, моментных и прочих нагрузок.

В рамках работы была использована новая матричная форма представления разрешающих задачу уравнений. Это достижение стало возможным благодаря применению подходов начальных параметров, а также введению векторов состояния произвольных сечений свай. Кроме того, была разработана матрица влияния начальных параметров на состояние этих произвольных сечений, что, безусловно, вносит значительный вклад в решение поставленных задач и открывает новые горизонты для дальнейших исследований в области строительной механики и свайных конструкций.

В результате проделанной работы была успешно построена математическая модель динамической реакции сваи, полностью погруженной в основание. Эта модель представляет собой сложную конструктивно нелинейную систему, которая изменяет свою расчетную схему в ответ на внезапную осадку основания. В рамках исследования был применен метод начальных параметров, который, в свою очередь, основывается на векторно-матричном представлении состояния произвольного сечения. На этой основе были разработаны алгоритмы для расчета начального статического состояния системы «свая – основание», а также для определения собственных и вынужденных изгибных колебаний сваи. Это особым образом важно, поскольку проблема статической и динамической устойчивости несущих конструкций становится все более актуальной в свете современных требований к безопасности и долговечности зданий.

Модель была реализована с учетом того, что свая состоит из двух участков: одного, который опирается на основание, и другого без основания. В процессе исследования было показано, что возможны три различных варианта статического напряженно-деформированного состояния, которые зависят от отношения между внешней сжимающей нагрузкой и введенным параметром системы «свая – основание» с размерностью силы, названным «условной» силой.

Это подразумевает, что величина нагрузки, оказываемой на сваю, может быть либо больше, либо меньше, либо равна условной силе, что, в свою очередь, существенно влияет на поведение системы.

При проведении динамического расчета также рассматривались три допустимых варианта, определяемых структурой уравнения собственных колебаний. Эти варианты зависят от состояния, будет ли основная частота больше, меньше или равна введенному параметру системы «свая – основание» – условной частоте, имеющей размерность частоты. Это важное различие является ключевым для понимания динамических характеристик модели.

Для всех рассматриваемых вариантов статического и динамического состояний были окончательно определены прогибы, изгибающие моменты, собственные частоты, а также формы собственных и вынужденных колебаний при различных механических и геометрических параметрах системы «свая – основание». Условия закрепления сваи были заданы как шарнирное опирание концов, что также влияет на динамические характеристики конструкции.

**Список литературы**

1 **Поддубный, А. А.** Методики расчёта критической силы сжатого стержня, погружённого в упругое основание / А. А. Поддубный, В. А. Гордон // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2019. – № 1 (38). – С. 49–52.

2 **Poddubny, A. A.** Dynamic loading of the rod a sudden change of elastic foundation structure / A. A. Poddubny, V. A. Gordon // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1079. – P. 1–18.

УДК 72.025.5

## ОСНОВНЫЕ ПРИЧИНЫ ПРОЦЕССА ПЕРЕПРОФИЛИРОВАНИЯ ЗДАНИЙ

*И. В. РУДЕНКОВА*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Явление массовой адаптации промышленных и общественных зданий, начиная с середины XX века, имеет ряд объективных предпосылок, объясняющих массовый характер этого явления и определивших его архитектурно-художественное своеобразие.

Послевоенная градостроительная политика стран Западной Европы и США подразумевала перемещение промышленных предприятий и коммерческих организаций из городского центра в пригород, в результате чего в историческом центре возникло множество пустующих зданий. В связи с массовым переездом жителей в новые районы многие общественные здания в центре города перестали использоваться по своему назначению, что привело к их невостребованности и даже разрушению.

Начиная с 1960-х годов в законодательстве Великобритании и США был поставлен акцент на активизацию процесса реновации и нового использования исторических объектов. Например, в Великобритании, согласно Закону о пустующих церквях и иных культовых сооружениях (1969 год), Законам о планировании городского и сельского строительства (1970-е годы) и о национальном наследии (1980-е годы), памятники архитектуры рассматривались в качестве неотъемлемой части ландшафта существующего исторического окружения. В реконструкции памятников промышленной архитектуры появилась возможность свободного творчества благодаря закреплению Венецианской хартией архитекторов и реставраторов в 1964 году за архитектурными объектами различный охранный статус. В рамках сохранения исторического наследия перепрофилирование зданий в большинстве случаев не учитывало стилистические особенности внутреннего пространства и архитектурные – ансамблей в целом.

К началу 80-х годов XX века, согласно британским исследователям Ш. Кантакузино и М. Страттону, стала очевидна важность определения социокультурной роли промышленных объектов, предваряющего работы по приспособлению их для новой функции. Так, многие европейские проекты конверсии зданий или их комплексов в конце 1980-х годов становились частью большой программы перепрофилирования общего городского пространства [1].

Работая над темой диссертационного исследования, автор статьи обнаружил ряд причин, по которым старые объекты утратили свою изначальную функциональную нагрузку. Ориентированные на них объекты и территории становятся неэффективными или невостребованными. Зачастую процесс современного использования объектов зависит исключительно от девелоперских компаний, личных интересов или рекламных предпочтений. Но можно выделить некоторые основополагающие критерии, по которым происходит выбор между сносом и повторным использованием.

1 **Историко-культурные.** Архитектурное наследие прошлых времён, когда-то успешно выполнявшее собственные функции, в условиях современного мегаполиса во многих случаях сегодня требует тщательной оптимизации. Реконструкция общественных сооружений является наиболее действенным и экономным способом привести их в соответствие с сегодняшними требованиями, предъявляемыми новым веком, сохраняя при этом первоначальное удачное положение. Обновление

старого центра города, его приспособление к требованиям современной жизни путем реконструкции разномасштабных торговых, производственных предприятий должны осуществляться таким образом, чтобы это не вело к его разрушению, физическому уничтожению сложившейся застройки и традиционного облика города.

Культурно-историческое наследие сегодня рассматривается как элемент развития социально-экономической сферы, обладающий высокой ценностью. Одним из способов сохранения объектов культурного наследия является их приспособление для современного использования. Это самый универсальный способ сохранения, включающий в себя и ремонт, и реставрацию. Так как речь идет о памятнике, охраняемом государством, то любые работы на нем должны соответствовать существующим требованиям. Ни во время проведения работ по его приспособлению для современного использования, ни во время эксплуатации сооружения уже в новом качестве не допускается никакого урона для его сохранности и историко-художественной ценности. К таким обязательным требованиям относятся сохранение первоначального облика здания, его конструктивно-планировочных решений и особенностей, оригинального интерьера, а также ненарушенность исторически сложившегося окружающего ландшафта. Другим приемом сохранения является перепрофилирование сооружения. В первую очередь к подобным строениям относятся такие памятники архитектуры, как промышленные здания, военные, жилые или хозяйственные постройки и даже старые тюрьмы. Во всем мире такие сооружения успешно превращаются в гостиницы, кафе, торговые объекты, сохраняя внешний исторический облик города или другой местности. Использовать их по прямому назначению в современных условиях невозможно, но они являются памятниками градостроительства, архитектуры, а также стали частью исторически сложившегося городского ландшафта.

2 **Социально-экономические предпосылки**. Перепрофилирование позволяет не только сохранять исторические здания с интересной архитектурой, но и «социализировать» их в современном обществе. К социально-экономическим изменениям в обществе относятся реконструкция недостроев – ввод в эксплуатацию объектов незавершенного строительства; освоение подвалов и первых этажей жилых зданий в центре города; исправление последствий строительного бума конца 1980–1990-х гг.; изменение бальности сейсмичности; реконструкция 5-этажных домов 1960–1970-х гг.; перепрофилирование под торговые и общественные здания. К социальным предпосылкам можно отнести креативность проектировщиков и дизайнеров, чьи художественные замыслы не помещаются в скучные планировки, им хочется городского пространства и недвижимости с размахом. Тем самым можно объяснить появление новых форматов жилой застройки в крупных городах, так называемых лофтов, объединяющих жилье, мастерские и различные студии.

Экономическая эффективность капитальных вложений в перепрофилирование зданий значительно выше, чем новое строительство, так как в данном случае предполагается частичное переустройство сооружения, т. е. величина вложений меньше, реконструкция в 1,5–2 раза дешевле нового строительства.

3 **Территориальные или градостроительные**. Важной особенностью в изучении объекта является изучение его географического расположения в структуре населенного пункта. Проблема промышленных зон в пределах центра белорусских городов – особенная тема для градостроителей. Отсутствие свободных территорий для возможных инвестиций от застройщика или организации жилья – одна из причин популярности перепрофилирования зданий. В большинстве случаев устаревшее здание находится в центральной части города и более не может служить первоначальной своей функции. Примером могут служить нефункционирующие промышленные объекты, которые зачастую перепрофилируют в объекты сферы обслуживания населения или жилье. Например, электромеханический завод «Агат» в границах улиц Волгоградской и Кедышко г. Минска давно приметили для преобразования, с 2023 года проводятся начальные работы по его преобразованию [2].

4 **Экологические.** Относительно новым требованием к строительным объектам является экологизация. В общих случаях экологизация включает нормирование бытовых и технологических отходов, атмосферных выбросов загрязняющих веществ, отведение бытовых и технологических сточных вод, сброс в водные объекты неорганизованного поверхностного стока талых и дождевых сточных вод с территории объекта. В отношении ранее построенных объектов новые экологические требования выступают как существенная предпосылка реконструкции.

5 **Технические.** Можно выделить следующие критерии, по которым определяется возможность процесса изменения функции: обследование технического состояния (полуразрушенное состояние, выявление дефектов, препятствующих эксплуатации); изучение местоположения (здание не должно

располагаться в промышленной зоне, отсутствие необходимой социальной инфраструктуры); соответствие конфигурации здания (соответствие высоты потолков, размеров проемов требованиям, предъявляемым к жилью); обследование инженерных коммуникаций и возможность их подведения. Без учета всех вышеперечисленных критериев процесс перепрофилирования в данном направлении не представляется возможным.

**Список литературы**

1 **Чайко, Д. С.** Современные тенденции нового использования исторических промышленных объектов / Д. С. Чайко // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 3 (45). – URL: https://research-journal.org/archive/3-45-2016-march/sovremennye-tendencii-novogo-ispolzovaniya-istoricheskix-promyshlennyx-obektov (дата обращения: 13.09.2025).

2 Из промышленной зоны — в жилой квартал. Как будет выглядеть территория бывшего завода «Агат»? // Onliner. – URL: https://realt.onliner.by/2025/09/11/zavod-agat (дата обращения: 13.09.2025).

УДК 004.8:[658.51+69]

## ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В УПРАВЛЕНИИ СТРОИТЕЛЬНЫМИ ПРОЕКТАМИ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ

*М. А. СКИБУНОВ, В. В. ШЕЛЮТО, В. М. ПРАСОЛ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Строительная отрасль, являющаяся ключевым сектором мировой экономики, традиционно характеризуется низкими темпами цифровизации, высокой сложностью координации множества участников и значительным объемом рутинных операций [1, 2]. В этих условиях технологии искусственного интеллекта предлагают инструменты для кардинального повышения продуктивности и управляемости проектов. Если в предоставленном материале основное внимание уделено применению ИИ в проектировании и мониторинге состояния конструкций, то данная статья фокусируется на применении ИИ в процессном управлении на протяжении всего жизненного цикла строительного проекта – от инициации до эксплуатации.

Основные направления применения ИИ в управлении проектами:

1 Автоматизация планирования и календарирования. Алгоритмы машинного обучения, в частности рекуррентные нейронные сети (RNN) и методы оптимизации, способны анализировать исторические данные по завершенным проектам для создания более точных календарных графиков. Они могут прогнозировать сроки выполнения задач, автоматически учитывать зависимости и ресурсные ограничения, а также моделировать различные сценарии развития событий для выявления потенциальных задержек [3].

2 Мониторинг хода работ и контроль качества. Компьютерное зрение на основе сверточных нейронных сетей (CNN) позволяет автоматизировать процесс контроля на строительной площадке. Анализ изображений и видео с дронов и стационарных камер в реальном времени позволяет отслеживать прогресс, идентифицировать оборудование и материалы, а также автоматически обнаруживать дефекты и отклонения от проектных решений (например, трещины, деформации) [4, 5], что было подробно рассмотрено в исходном материале применительно к мониторингу состояния конструкций.

3 Управление рисками и прогнозирование. Предиктивные модели ИИ анализируют совокупность данных, включая метеорологические условия, отчеты о безопасности, загрузку ресурсов и логистические цепочки, для прогнозирования вероятности наступления рисковых событий (срыв сроков, перерасход бюджета, несчастные случаи). Это позволяет менеджерам проектов принимать проактивные меры по их уменьшению.

4 Интеллектуальный анализ документации. Обработка естественного языка (NLP) и генеративный ИИ используются для анализа контрактов, технических заданий, спецификаций и отчетов. Системы могут извлекать ключевые условия, отслеживать соблюдение требований, автоматически составлять сводки и выявлять противоречия в документации, снижая юридические и административные риски [6].

Несмотря на очевидные преимущества, массовое внедрение ИИ в управление строительными проектами сталкивается с рядом серьезных трудностей [7, 8], которые были систематизированы в исходной статье.

Фрагментированность данных. Данные в строительстве часто хранятся в изолированных системах (BIM, CAD, ERP, Excel), что затрудняет их консолидацию для обучения моделей ИИ.

Высокие первоначальные инвестиции. Затраты на лицензирование ПО, приобретение вычислительных мощностей, привлечение специалистов по data science и интеграцию с существующей ИТ-инфраструктурой могут быть непосильны для средних и малых компаний.

Дефицит квалификации. Отрасли не хватает специалистов, обладающих одновременно глубокими знаниями в области строительства и компетенциями в области ИИ и анализа данных.

Нормативная неопределенность. Отсутствуют четкие правовые рамки, регламентирующие ответственность за решения, принятые на основе рекомендаций ИИ, а также стандарты валидации и сертификации таких систем.

Сопротивление изменениям. Консервативность отрасли и нежелание персонала переходить от привычных методов работы к новым, алгоритмизированным процессам.

Искусственный интеллект обладает значительным потенциалом для трансформации управления строительными проектами, переводя его от реактивного к проактивному и предиктивному. Внедрение ИИ-решений позволяет оптимизировать использование ресурсов, повысить точность планирования, усилить контроль качества и безопасности, а также минимизировать риски.

Однако для успешной реализации этого потенциала необходим комплексный подход, включающий не только выбор технологий, но и инвестиции в инфраструктуру данных, развитие кадрового потенциала, адаптацию процессов управления и формирование благоприятной нормативно-правовой среды. Преодоление указанных барьеров позволит строительной отрасли выйти на новый уровень эффективности и устойчивости.

**Список литературы**

1 Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges / Sofiat O. Abioye, Lukumon O. Oyedele, Lukman Akanbi [et al.] // Journal of Building Engineering. – 2021. – Vol. 44. – P. 1–13.

2 AI in Construction: A Strategic Guide for Industry Leaders [2025–2030] // StartUS insights. – URL: https://www.startus-insights.com/innovators-guide/ai-in-construction-a-strategic-guide/ (date of access: 20.07.2025).

3 Artificial Intelligence in Construction Project Management: A Structured Literature Review // Publications. – 2023. – Vol. 5, № 3.

4 **Fulvio Re Cecconi**. Building Tomorrow: Unleashing the Potential of Artificial Intelligence in Construction / Fulvio Re Cecconi, Ania Khodabakhshian, Luca Rampini. – 2025. – 122 p.

5 **Chen, C.** NB-CNN: Deep Learning-Based Crack Detection Using Convolutional Neural Network and Naïve Bayes Data Fusion / C. Chen, M. R. Jahanshahi // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2018. – Vol. 65 (5). – P. 4392–4400.

6 **Atha, D. J.** Evaluation of deep learning approaches based on convolutional neural networks for corrosion detection / D. J. Atha, M. R. Jahanshahi // Structural Health Monitoring. – 2018. – Vol. 17 (5). – P. 1110–1128.

7 The Impact of AI on Present State of Construction // BIM Corner. – URL: https://bimcorner.com/the-impact-of-ai-on-present-state-of-construction/ (date of access: 20.07.2025).

8 Artificial Intelligence Methods for the Construction and Management of Buildings / S. Ivanova, A. Kuznetsov, R. Zverev, A. Rada // Sensors. – 2023. – № 23 (21). – P. 1–35.

УДК 528.48

## ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

*Н. С. СЫРОВА, И. П. ДРАЛОВА, С. С. КОЖЕДУБ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Без точных современных геодезических данных невозможно гарантировать надежность и безопасность любого современного здания и сооружения. Они обеспечивают надежность на всех этапах строительства, что напрямую влияет на устойчивость и долговечность. Роль геодезии – это непрерывный контроль за пространственным положением всех элементов конструкции, соблюдением геометрических параметров, отсутствием недопустимых деформаций. До начала строитель-

ства закладывают основу будущей безопасности, создается опорная геодезическая сеть. На участке закрепляют пункты с точно известными координатами и высотами, что является гарантией правильности выполнения разбивочных работ. Использование электронных приборов (тахеометры, теодолиты, цифровые нивелиры, GNSS-приемники, лазерные сканеры, беспилотные летательные аппараты) позволяет выполнять измерения с высокой точностью и надежностью [1]. Оборудование – это лишь инструмент, его эффективность определяют четкие нормативы и методики. Реперы, вынесенные за пределы зоны работ, являются главными и неизменными точками на весь срок строительства, без них невозможно возвести безопасный и долговечный объект. Пренебрежение геодезическим контролем приводит к катастрофическим последствиям, деформациям, трещинам, обрушениям. Высокоточные приборы минимизируют погрешности и повышают точность измерений.

Современные технологии производят комплексную систему измерений и контроля, что предупреждает риски на этапе проектирования, минимизирует ошибки в процессе строительства, мониторит и диагностирует состояние объекта при эксплуатации. Созданная геодезическая разбивочная основа (ГРО) является системой отсчета на площадке. Все измерения выполняются в режиме реального времени (RTK). Квалификация персонала – один из самых важных факторов надежности. Геодезист должен понимать теорию и практику, математическую обработку измерений, соблюдать методику производства работ. Любые измерения неизбежно содержат погрешности (грубые, систематические, случайные). Методы уравнивания используют еще на стадии проектирования сетей [2].

Значительное увеличение объемов измерительной информации, получаемой в настоящее время при выполнении геодезических, фотограмметрических, астрономических работ, обработке результатов научных экспериментов, ставит задачу разработки и внедрения новых методов математической обработки измерений.

Новейшие теоретические достижения вычислительной и прикладной математики в сочетании с использованием современных технологий открыли широкие возможности построения оптимальных математических моделей реальных явлений по измерительным данным их характеристик. В настоящее время широкое применение в теоретических уравнительных вычислениях получили математические методы, основанные на классическом принципе метода наименьших квадратов (МНК). Имеющийся опыт применения МНК прекрасно подтвердил возможность решать с его помощью большинство возникающих уравнительных задач. В основе эффективного использования МНК лежат следующие основные предположения относительно характера ошибок измерений: они должны подчиняться нормальному закону, быть некоррелированными между собой и обладать нулевым математическим ожиданием. Только в этом случае МНК-оценки в классе всех линейно-несмещенных оценок обладают минимальной дисперсией (даже при конечном числе измерений), являются асимптотически нормальными и асимптотически состоятельными.

Наряду с МНК в последнее время выделяют так называемые устойчивые или робастные методы обработки, которые позволяют получать устойчивые результаты при анализе измерений, ошибки которых обладают распределениями близкими к некоторым геодезическим (чаще всего к нормальному закону).

Хорошие результаты при применении робастных методов были получены в случае обработки измерений с грубыми ошибками и промахами. Однако для широкого круга уравнительных задач оценки, получаемые робастными методами, не являются оптимальными. Более предпочтительным представляется здесь применять такие методы обработки, которые сочетали бы робастные свойства, сохраняя оптимальные вероятностные свойства для широкого класса распределений ошибок. Таким методом является метод $L_P$-оценок (метод наименьших степеней, основанный на минимизации n-х-степеней остаточных уклонений).

Вопросы уравнивания оценки точности нуль-свободных геодезических сетей не содержащих исходных пунктов является актуальной задачей геодезического производства в связи с широким использованием GPS измерительных систем. Не менее актуальной является проблема обработки больших потоков информации методом $L_P$-оценок. В настоящие время произошло резкое увеличение количества измерительной информации. Когда количество результатов измерений достигает тысяч, начинают все более отчетливо проявляться негауссовы особенности ошибок, присущие данному ряду или даже данному методу наблюдений. Методы обработки таких измерений, отличные от метода наименьших квадратов, более сложные и требуют большего объема вычислений. Однако, в связи с развитием САПР, сейчас эта задача вполне решаема. К преимуществам метода $L_P$-оценок

можно отнести и то, что он позволяет выполнить обработку измерений в соответствии с законом распределения ошибок. Еще более сложной задачей является объединение методов регуляризации с методами $L_P$-оценок. Проблема поиска грубых ошибок измерений всегда была актуальной, особенно при переходе к автоматизированным технологиям сбора и обработки геодезической информации. Грубые ошибки можно находить до уравнивания, применяя коррелатный способ, вычисляя свободные члены условных уравнений по поправкам в измерения, полученным после уравнивания геодезической сети параметрическим способом. Параметрический способ уравнивания справедливо признается наиболее удобным для программирования, так как освобождает от необходимости составления условных уравнений, более сложных и разнообразных, чем коррелатные.

Все точки геодезической сети после уравнивания вычисляются в единой системе координат, где взаимное положение является математически согласованным для строительства зданий и сооружений. После того как узнали результаты, происходит оптимальное размещение пунктов и выбирается необходимая методика измерений, что является гарантией правильности строительства здания или сооружения. В процессе всего жизненного цикла объекта геодезисты обеспечивают точность, контроль, мониторинг, влияющий на надежность и безопасность.

Внедрение новых технологий повышает качество измерений, способствует повышению конкурентоспособности предприятия. Комплекс внедрения цифровых подходов, методов и организационных мероприятий способен обеспечить более высокую продуктивность полевых и камеральных работ, снижать затраты на материалы, трудовые ресурсы и обеспечить рост качества. Производство изыскательских работ без цифровизации невозможно в современном мире.

Геодезические работы предусматривают разделение труда при росте длины и гибкости глобальных и отраслевых производственных цепочек, что ведет к снижению издержек и стоимости строительства. В контексте экологии высокотехнологическое оборудование значительно снижает воздействие на окружающую среду и потребление энергетических ресурсов.

Обработка облаков точек достигается за счет оптимизации производственных процессов внедряются современные ТИМ-технологии, в том числе робототехники (робототизированные тахеометры), ГНСС-приемники, инструменты лазерного сканирования, цифровые нивелиры, электронные теодолиты и др. Сбор, хранение и обработка больших массивов данных производится с помощью использования облачных сервисов и облачных вычислений.

Эффективное решение инженерно-геодезических задач является залогом обеспечения надежности и безопасности зданий.

**Список литературы**

1 Инженерная геодезия и фотограмметрия / Е. К. Атрошко, И. П. Дралова , Г. М. Куновская, Н. С. Сырова. – Гомель : БелГУТ, 2021. – 100 с.

2 **Атрошко, Е. К.** Прикладная геодезия и современные инженерно-геодезические технологии / Е. К. Атрошко, И. П. Дралова, Н. С. Сырова. – Гомель : БелГУТ, 2023. – 98 с.

УДК 624.012.45:624.153.522

## АРМИРОВАНИЕ СБОРНЫХ ФУНДАМЕНТНЫХ ПЛИТ СТЕКЛОКОМПОЗИТНЫМИ СТЕРЖНЯМИ

*В. В. ТАЛЕЦКИЙ, А. Н. НЕВЕЙКОВ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Сборные железобетонные плиты по серии Б1.012.1-2.08 «Плиты железобетонные ленточных фундаментов» [1] предназначены для устройства ленточных фундаментов зданий и сооружений различного назначения в сухих и водонасыщенных грунтах с неагрессивной степенью воздействия на железобетонные конструкции. Плиты выполняются из тяжелого бетона класса С16/20 и С20/25 в зависимости от группы по несущей способности. Рабочая арматура плит из стальных стержней периодического профиля класса S500.

Предлагается заменить стальную рабочую арматуру на стеклокомпозитную арматуру АСК по ГОСТ 31938-2022 [2], обладающую большей прочностью и высокой коррозионной стойкостью. Если характеристическое сопротивление стальной арматуры 500 МПа, а расчетное 435 МПа, то у

стеклокомпозитной арматуры минимальный нормативный предел прочности на растяжение составляет 800 МПа и соответственно расчетное сопротивление 695 МПа. В результате за счет увеличения прочности уменьшится требуемая площадь рабочей арматуры АСК.

Уменьшить площадь рабочей арматуры АСК можно также за счет увеличения эффективной высоты бетонного сечения, то есть уменьшения защитного слоя бетона. В плитах по серии защитный слой бетона 50 мм. Он учитывает сцепление стальной арматуры с бетоном и воздействие окружающей среды на арматуру после образования трещин в бетоне. Фундаменты относятся к классу экспозиции XC2-XC4, допускаемая ширина раскрытия трещин 0,3 мм. При установке стеклокомпозитной арматуры ширина раскрытия трещин значительно превысит эту величину, так как модуль упругости стальной арматуры ($E_s$ = 200 ГПа) в 4 раза больше модуля упругости стеклопластиковой арматуры ($E_{сп}$ = 50 ГПа). С учетом коррозионной стойкости стеклокомпозитной арматуры ширина раскрытия трещин в бетоне не повлияет на долговечность фундаментной плиты. Поэтому защитный слой бетона можно назначить величиной 25 мм только для учета сцепления стеклокомпозитных стержней с бетоном.

В качестве примера замены армирования стальной арматуры класса *S*500 на стеклокомпозитные стержни рассмотрим фундаментную плиту марки ФЛ16. Ширина плиты 1600 мм, толщина 300 мм. Эффективная высота сечения зависит от диаметра арматуры и группы по несущей способности. Расчеты ведем на условную длину, равную 1,0 м. Вначале определяем несущую способность расчетного сечения плиты по серии, а затем по несущей способности определяем требуемую площадь арматуры из стеклокомпозитных стержней. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

*Таблица 1* – **Определение требуемой площади стеклокомпозитной арматуры на 1 пог. м фундаментной плиты марки ФЛ16**

| Группа плиты по несущей способности | Класс бетона | Диаметр рабочей арматуры S500, мм | Площадь арматуры S500 на 1 пог. м, см$^2$ | Несущая способность сечения, кНм/м | Требуемая площадь арматуры АСК 800, см$^2$/м | Количество стержней АСК 800 и диаметр на 1 пог. м | Площадь арматуры АСК 800, на 1 пог. м длины, см$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ФЛ16…-1 | С16/20 | 8 | 4,86 | 50,4 | 2,8 | 6∅8 | 3,018 |
| ФЛ16…-2 | С16/20 | 10 | 7,85 | 78,2 | 4,4 | 6∅10 | 4,71 |
| ФЛ16…-3 | С16/20 | 12 | 11,3 | 108,5 | 6,3 | 6∅12 | 6,78 |
| ФЛ16…-4 | С20/25 | 14 | 15,4 | 146,1 | 8,44 | 6∅14 | 9,24 |
| *Площадь соответствует 10 стержням для всех групп плит по несущей способности. | | | | | | | |

Результаты расчетов показали, что площадь рабочей стеклокомпозитной арматуры АСК 800 на 40 % меньше по сравнению со стальной арматурой класса S500.

Стоимость стеклокомпозитной арматуры на рынке РБ снижается с каждым годом из-за увеличения количества производителей и прихода на рынок КНР. В настоящее время стоимость стеклокомпозитной арматуры приведенных диаметров ниже стоимости стальной арматуры периодического профиля класса S500. Примерные цены, (бел. руб.)/м, приведены в таблице 2.

*Таблица 2* – **Стоимость арматуры на рынке РБ**

| Диаметры арматуры, мм | Стальная арматура S500 | Стеклокомпозитная арматура АСК800 |
|---|---|---|
| 8 | 0,9 | 0,8 |
| 10 | 1,4 | 1,1 |
| 12 | 2,0 | 1,3 |
| 14 | 2,3 | 1,8 |

**Выводы.** 1 Замена рабочей стальной арматуры класса S500 на стеклокомпозитную АСК800 при изготовлении сборных бетонных фундаментных плит приведет к снижению их стоимости как за счет меньшей площади поперечного сечения арматуры, так и за счет её меньшей стоимости.

2 Ширина раскрытия трещин в растянутой зоне сечения фундаментных плит при армировании стеклокомпозитными стержнями значительно превышает допустимую нормами для условий эксплуатации XC2-XC4, но не повлияет на долговечность плит из-за высокой коррозионной стойкости стеклокомпозитной арматуры.

**Список литературы**

1 Серия Б1.012.1-2.08. Плиты железобетонные ленточных фундаментов. Выпуск 1. Материалы для проектирования. Выпуск 2. Плиты железобетонные ленточных фундаментов. Рабочие чертежи. Выпуск 3. Арматурные и закладные изделия. Рабочие чертежи.

2 ГОСТ 31938-2022. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия. – Взамен ГОСТ 31938-2012. – М. : Российский институт стандартизации, 2022. – 19 с.

УДК 669.97.035

# ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ СТЕНОВЫХ ОГРАЖДЕНИЙ В ТЕПЛОВЫХ УСТАНОВКАХ ДЛЯ ТЕПЛОВЛАЖНОСТИ ОБРАБОТКИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

*А. Г. ТАШКИНОВ*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Распространенным типом установок для тепловлажности обработки (ТВО) бетонных и железобетонных изделий (ЖБИ) являются пропарочные камеры ямного типа. Они широко применяются в поточно-агрегатной технологии, особенно при выпуске изделий разнообразного ассортимента, поскольку в каждой камере можно осуществить оптимальный для данного вида изделий режим термообработки. В качестве теплоносителя в камерах чаще всего применяется паровоздушная смесь с температурой 80–95 °С. Существующие ямные пропарочные камеры имеют низкий коэффициент полезного использования тепловой энергии (КПИ), представляющий собой отношение полезного используемого тепла к его суммарному расходу. Это обусловливается главным образом большим значением тепловой ёмкости массивных ограждений из бетона (стены и днище) и металла (крышка). В результате периодического характера работы камеры тепло, аккумулированное ограждениями, безвозвратно теряется при перерывах в работе для выгрузки и загрузки изделий.

Стеновые ограждения камер пропаривания подвержены сложным воздействиям, которые вызваны случайными ударами крышек и форм при загрузке и выгрузке изделий, давлением грунта (для заглубленных камер), температурно-влажностными напряжениями и деформациями от неравномерного нагрева и увлажнения стенки по её толщине.

Исходя из этого, ограждающие конструкции ямных камер пропаривания должны отвечать ряду требований: обладать достаточной прочностью, долговечностью при циклическом нагреве и увлажнении, сохраняя при этом высокие теплоизоляционные показатели. Указанными качествами обладают построенные по проекту БелГУТа на заводе КПД Гомельского ДСК малоинерционные пропарочные камеры из сборных многослойных теплоизолированных панелей [1]. Конструкция панелей включает следующие слои: внутренний (со стороны рабочего объёма камеры) защитный слой – из армированного тяжелого бетона класса В20 толщиной 50 мм, пароизоляция из термостойких плёнок, теплоизоляция толщиной 100–150 мм и наружный слой (несущий вес крышки и самой панели) из армированного керамзитобетона класса В10 толщиной 100 мм.

Испытания камер показали, что традиционные теплоизоляционные материалы: минеральная вата, блочное пеностекло (средней плотности 100–200 кг/м$^3$) требуют надёжной пароизоляции от увлажнения паровоздушной средой камеры. Плёночные материалы, располагаемые внахлест, показали низкую эффективность: влажность минераловатных плит уже через 2 месяца эксплуатации достигла 40 % массы. Склеивание (сваривание) кромок пароизоляции в сплошной ковер снижает влажность утеплителя до 4–6 %. Дополнительный эффект по высушиванию утеплителя в панели до влажности 3–4 % и поддержанию его влажности на низком уровне в течении длительного времени (срок наблюдения 2 года) достигается устройством вентиляционных каналов. Вентканалы изготавливались из разрезанных на отдельные волны фрагментов волнистых асбестоцементных листов (высота волны 40–54 мм), которые укладывались с шагом 0,5–1 м по утеплителю при формировании панелей. Оголовки вентканалов выполнялись из металлических труб диаметром 100 мм.

Расход теплоносителя (пара) в камерах определялся при режимах тепловлажностной обработки бетонных и керамзитобетонных изделий с одним оборотом форм в сутки (предварительное выдерживание в камере после бетонирования при закрытой крышке – 2 ч, подъем температуры до 85 °С – 3 ч, период изотермической выдержки – 5 ч, остывание при закрытой крышке – 8 ч, остывание при

открытой крышке – 2 ч). Полный цикл ТВО составлял: τ = (2) + 3 + 5 + 8 + (2) = 20 ч. На распалубку, чистку форм, бетонирование и установку изделий в камеру приходилось 4 ч. Удельный расход пара в теплоизоляционных камерах при коэффициентах заполнения (отношение объёма пропариваемых изделий к внутреннему объёму камеры) 0,05–0,1, составил 150–200 кг/м$^3$ при КПИ = 0,6…0,7.

Дальнейшее повышение надёжности и эффективности теплоизолированных стеновых ограждений в установках для ТВО ЖБИ достигается при использовании вместо традиционных теплоизоляционных материалов с высокими значениями открытой пористости и водопоглощения специальных теплогидроизоляционных материалов. В этом случае отпадает необходимость в устройстве пароизоляции для защиты утеплителя от увлажнения паровоздушной средой пропарочной камеры. В БелГУТе разработан теплогидроизоляционный пенополимербетон, сочетающий в себе функции тепло- и гидроизоляции [2]. Пенополимербетон получают пропиткой крупнопористого (беспесчаного) керамзитобетона вспенивающейся композицией на основе эпоксидных диановых смол, обладающей в отвержденном состоянии высокой водостойкостью, водо- и паронепроницаемостью при температурах до 100 °С.

Основные характеристики пенополимербетона:

– средняя плотность 500–600 кг/м$^3$;

– предел прочности при сжатии 3–6 МПа;

– коэффициент теплопроводности 0,1–0,2 Вт/(м·°С);

– водопоглощение 4–6 % объёма.

Использование пенополимербетона позволяет упростить конструкцию ограждения, сделав её двухслойной: внутренний слой из пенополимербетона и наружный несущий слой из керамзитобетона.

Такая конструкция не только более технологичная (трудоёмкость изготовления меньше на 17–29 %), но и теплотехнически более эффективная, чем трёхслойная с защитным железобетонным экраном, поскольку у неё меньше тепловая инерция и, соответственно, теплопотери на нагрев ограждения (на 7,6–7,8 МДж/м$^2$). В результате этого уже при толщине пенополимербетона 50–100 мм КПИ утеплённой им пропарочной камеры достигает 0,7–0,9, а удельный расход пара составляет всего 90–150 кг/м$^3$ (210–350 МДж/м$^3$). Благодаря малой толщине облицовки пенополимербетон может быть использован не только для утепления вновь строящихся пропарочных камер, но и для реконструкции существующих. Во втором случае внутренний объём пропарочной камеры, облицованной изнутри 50 мм пенополимербетонными плитами, уменьшается незначительно, и после реконструкции в камере сохраняется возможность тепловлажностной обработки изделий с прежними габаритными размерами (как до утепления).

Следует учитывать, что стеновые облицовки из пенополимербетона не обладают прочностью, достаточной для восприятия возможных ударов стальных форм при загрузке изделий в камеру и их выгрузке. Поэтому необходимо пропарочные камеры с двухслойными ограждениями оборудовать защитными бетонными или металлическими упорными стойками или стойками типа СМЖ-293 с поворотными кронштейнами для укладки изделий.

Пропарочные камеры, открыто расположенные на полигонах заводов ЖБИ, и камеры с продолжительными режимами ТВО имеют повышенную величину теплопотерь в окружающую среду. Для них рекомендуется конструкция ограждений с повышенным уровнем тепловой защиты, предусматривающая устройство за полимербетонной теплоизоляцией дополнительного слоя из легких эффективных материалов: минераловатных плит и пенопластов малой плотности. При этом 50 мм плиты пенополимербетона служат надёжной паро- и гидроизоляцией, защищающей от увлажнения размещённые за ними гигроскопичные теплоизоляционные материалы. Их использование более рационально, чем простое увеличение толщины пенополимербетона, вследствие низкой стоимости, меньшей плотности и теплопроводности.

Дополнительная экономия тепловой энергии может быть получена при замене периода изотермической выдержки с подачей пара на термосное остывание. Как показывают опытные данные [3], скорость остывания теплоизолированной камеры составляет 0,8–2,2 °С в час, в зависимости от коэффициента заполнения установки. Чем больше заполнена камера, тем больше тепла аккумулирует бетон пропариваемых изделий и, следовательно, остывание заполненной камеры будет происходить медленнее. При таком режиме, когда пар подаётся в камеру только в период подъёма температуры, расход пара снижается ещё на 20–30 %. Похожий эффект даёт применение режимов с пониженными температурами нагрева, когда заданную отпускную прочность бетон набирает за более длительный срок.

**Список литературы**

1 **Ташкинов, А. Г.** Исследование стеновых ограждений пропарочных камер для ускоренного твердения бетона / А. Г. Ташкинов, В. А. Радченко // Актуальные проблемы развития транспортных систем и строительного комплекса : материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : БелГУТ, 2001. – С. 324–325.

2 **Ташкинов, А. Г.** Эффективные стеновые ограждения для ямных пропарочных камер / А. Г. Ташкинов, В. А. Михневич // Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса : материалы III Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : БелГУТ,2013. – С. 411–412.

3 **Ташкинов, А. Г.** Оптимизация расходов тепловой энергии при производстве сборных бетонных и железобетонных изделий // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 24–25 нояб. 2022 : в 2 ч. Ч. 2. – Гомель : БелГУТ, 2022. – С. 64–65.

УДК 727.1-027.25

# ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ШКОЛЬНЫХ ЗДАНИЙ КАК ОБЪЕКТОВ С ПОВЫШЕННЫМИ ТРЕБОВАНИЯМИ К БЕЗОПАСНОСТИ

*Т. С. ТИТКОВА, А. В. ЩЕГЛОВА*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Школа – это не просто образовательное учреждение, а пространство, где ежедневно находятся дети, педагоги и технический персонал. Безопасность школьной среды напрямую влияет на здоровье, психологическое состояние и успеваемость учащихся. В условиях современных вызовов – от техногенных угроз до эпидемиологических рисков – проектирование школьных зданий требует особого внимания к архитектурным, инженерным и организационным аспектам.

В Республике Беларусь принят ряд нормативных документов, регулирующих проектирование школьных зданий: СН 3.02.02-2019 «Общественные здания», ТКП 45-3.02-1-2004 «Состав и площади помещений общеобразовательных школ, учебно-педагогических комплексов, детских садов-школ», СН 2.02.05-2020 «Пожарная безопасность зданий и сооружений», «Специфические санитарно-эпидемиологические требования к содержанию и эксплуатации учреждений образования» и др.

Эти документы определяют минимальные стандарты по прочности, устойчивости, энергоэффективности и безопасности зданий.

Выделим три ключевых направления для обеспечения необходимой безопасности на этапе проектирования:

1) физическая безопасность;
2) психологическая безопасность;
3) экологическая безопасность.

**Физическая безопасность** здания школы определяется системой мер, направленных на защиту от внешних и внутренних угроз.

*Планировка школьного участка* должна обеспечивать безопасное движение пешеходов и служебного транспорта. Обозначение границ школьной территории, установка систем видеонаблюдения обеспечивают базовый уровень безопасности и создают предпосылки для защищённой образовательной среды. Четкое зонирование территории на учебную, спортивную, хозяйственную и рекреационную зоны помогает детям легко ориентироваться, а при чрезвычайных ситуациях – быстро и организованно эвакуировать людей.

*Архитектурно-планировочные решения* здания школы также строятся на принципах функционального зонирования (учебные классы, лаборатории, административные помещения, зона культурно-массовых мероприятий, столовая, спортивный зал, кабинеты трудового обучения), что делает структуру здания логичной и визуально читаемой, а пространство – понятным и предсказуемым. Разделение потоков (отдельные входы для учеников, персонала и посетителей, разграничение начальной школы и средней) минимизирует пересечения находящихся в здании людей, снижая риск конфликтов, травм и несанкционированного доступа.

Для соблюдения норм *пожарной безопасности* требуется обеспечить комплекс архитектурно-планировочных, конструктивных и технических мер, соответствующих действующим нормативным документам: необходимое количество эвакуационных выходов, достаточную ширину коридоров и лестниц для беспрепятственного движения, установить световые и звуковые оповещатели, а также аварийное освещение, автоматическое оповещение, противопожарные системы.

*Санитарно-гигиеническая безопасность* должна обеспечиваться комплексом инженерно-технических решений. Здания учреждений образования оборудуются централизованными системами хозяйственно-питьевого, горячего водоснабжения и водоотведения, отопления, системами механической вентиляции и кондиционирования воздуха. Нормами установлены требования к освещению, санитарно-техническому благоустройству школьных зданий и санитарно-гигиеническому содержанию помещений [1].

Физическая безопасность также предполагает обеспечение безбарьерной среды как на территории школы, так и внутри здания: наличие пандусов и подъемников для физически ослабленных лиц, адаптированных санузлов, отсутствие порогов и автоматических дверей.

**Психологическая безопасность.** Для создания психологического комфорта в школе следует проектировать пространства для уединения, которые снижают стресс (например, читальные зоны). Наличие открытых зон или остекленных стен, минимум «слепых» коридоров и замкнутых пространств способствуют наблюдаемости и предотвращению буллинга.

Мощным психологическим инструментом, который напрямую влияет на эмоциональное состояние, поведение и даже успеваемость школьников, является цвет. Поэтому его грамотное использование критически важно для создания психологически безопасной среды в школе: зонирование по цвету помогает детям ориентироваться в пространстве, цветовые акценты могут обозначать безопасные зоны, пути эвакуации или места для отдыха.

Цвет влияет на настроение (бежевый, светло-зелёный, голубой способствуют расслаблению и чувству защищённости), помогает сосредоточиться (нейтральные и холодные оттенки способствуют концентрации, особенно в учебных зонах), снижает стресс (зелёный и голубой) [2].

**Экологическая безопасность** представляет собой один из ключевых факторов, определяющих архитектурно-планировочные, эксплуатационные и экологические характеристики школьных зданий. На этапе проектирования образовательных учреждений выбор строительных материалов не только формирует конструктивную основу объекта, но и напрямую влияет на безопасность, комфорт, энергоэффективность и устойчивость среды обучения.

Экологическая безопасность обеспечивается применением негорючих, прочных и устойчивых к механическим повреждениям материалов, которые снижают риски травматизма, пожаров и разрушений в учебных заведениях. Современные композитные панели, армированные бетоны и ударопрочные стеклопакеты позволяют создавать безопасные и долговечные конструкции, соответствующие современным нормативным требованиям.

Комфорт в учебных помещениях достигается за счет использования экологически чистых и «дышащих» материалов: древесные плиты, пробка, целлюлозные утеплители. Выбор данных материалов способствует поддержанию оптимального уровня влажности, снижению концентрации вредных веществ и улучшению качества воздуха.

Применение материалов с высокими теплоизоляционными свойствами, включая современные фасадные системы и оконные блоки с низким коэффициентом теплопередачи, позволяет существенно сократить энергопотребление здания школы [3].

Использование возобновляемых ресурсов в строительстве школ, в свою очередь, способствует снижению углеродного следа, поддержке экономики и адаптации зданий к устойчивому развитию среды обучения в соответствии с климатическими условиями региона.

Таким образом, проектирование школьной среды с учетом требований к физической, психологической и экологической безопасности является неотъемлемым условием формирования благоприятной образовательной атмосферы.

Интеграция этих аспектов в архитектурно-планировочные решения требует междисциплинарного подхода, включающего знания из области психологии, урбанистики, архитектуры и инженерии. Современные школы должны проектироваться как пространства не только соответствующие нормативам, но и способствующие развитию личности, социализации и сохранению психического здоровья [4].

Таким образом, обеспечение комплексной безопасности при проектировании зданий учебных заведений позволяет инвестировать в будущее для достижения качественного школьного образования с заботой о здоровье и благополучии подрастающего поколения.

**Список литературы**

1 Об утверждении санитарно-эпидемиологических требований к устройству, содержанию и организации режима работы учреждений общего среднего образования : постановление Совета Министров Республики Беларусь № 525 от

07.08.2019 // Министерство образования Республики Беларусь. – URL: https://edu.gov.-by/...525.RTF (дата обращения: 11.09.2025).

2 Цвет в образовательной среде: влияние на психологическое состояние учащихся // EduDesign. – URL: https://edudesign.ru/color_part_1 (дата обращения: 11.09.2025).

3 **Гусев, П. А.** Энергоэффективные технологии в проектировании школьных зданий / П. А. Гусев // Строительство и архитектура. – 2020. – № 7. – С. 33–39.

4 Рекомендации по выбору материалов и технологий для школы с акцентом на использование местных материалов и современных технологий // Электронная библиотека КиберЛенинка. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/rekomendatsii-po-vyboru-materialov-i-tehnologiy-dlya-shkoly-s-aktsentom-na-ispolzovanie-mestnyh-materialov-i-sovremennyh-tehnologiy (дата обращения: 11.09.2025).

УДК 691.32:624.012.45/.46

# ЗАВИСИМОСТЬ СТЕПЕНИ ФАКТИЧЕСКОЙ КАРБОНИЗАЦИИ ОТ ПОКАЗАТЕЛЯ ЩЕЛОЧНОСТИ ПОРОВОЙ ЖИДКОСТИ БЕТОНА

*М. И. ТКАЧЕВА, А. Ю. КРУПОДЕРОВ, А. А. ВАСИЛЬЕВ, Е. В. МЕДВЕДЕВА*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В ходе установления взаимосвязи степени фактической карбонизации бетона и состояния его защитных свойств по отношению к стальной арматуре в [1] были произведены детальные обследования, на основании которых получены 600 проб бетона для дальнейших исследований, отобранные из различных железобетонных элементов (ЖБЭ), эксплуатируемых в течение разного времени и различных условий эксплуатации. Для повышения качества проводимых изысканий выборка проб была увеличена до 1000 исследуемых образцов. Полученная область значений параметров pH (величина показателя щелочности поровой жидкости бетона) и СФК (степень фактической карбонизации) приведена на рисунке 1.

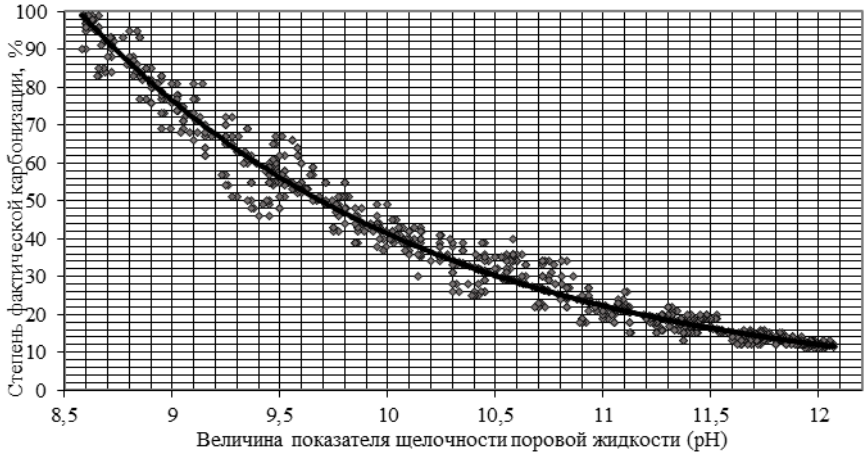



Рисунок 1 – Область значений параметров pH и СФК

Путем обработки полученных данных в пакете MS «Excel» была получена зависимость регрессионного вида степени фактической карбонизации от показателя pH СФК = *f*(pH):

$$\text{СФК} = 19787e^{(-0,617\text{pH})}. \quad (1)$$

Проверка значимости регрессионной зависимости (1) производилась в программе «Statgraphics» методами математической статистики в соответствии с методикой [2].

Для принятия полученной зависимости как адекватной руководствовались следующими положениями:

– отличие экспериментальных данных (т. е. фактических значений СФК, полученных в результате проведенных обследований) от полученных значений СФК не более чем на 20 %, что соответствует погрешности измерения степени карбонизации ФФТ;

– значимо отличное от нулевого значение коэффициента детерминации (в соответствии со статистическим критерием F-Фишера), показывающее, что полученная зависимость в значительной степени описывает реально существующую;

– полученные остатки (отклонения) фактических и полученных в результате расчета значений СФК соответствуют определению взаимно независимых случайных величин. Для установки «независимости» остатков проверка проводилась по критериям «серий»;

– полученные остатки являются случайными величинами с одинаковым распределением (по нормальному закону), постоянной дисперсией и математическим ожиданием. Проверка отклонений на «нормальность» проводилась по критериям $\chi^2$-Пирсона, λ-Колмогорова и Шапиро – Вилка. Проверка равенства математического ожидания отклонений (остатков) нулю, а также отсутствия «систематической ошибки» определялась на основе статистического критерия *t*-Стьюдента.

Все вышеуказанные проверки выполнялись для уровня значимости α = 0,05, принятого в инженерной практике. Итоги проверки адекватности регрессионной зависимости (1) по указанным критериям приведены в таблице 1.

*Таблица 1* – **Проверка адекватности регрессионной зависимости степени фактической карбонизации СФК = *f*(pH)**

| Параметр | «Нормальность» остатков | | | «Независимость» остатков | | | Отсутствие систематической ошибки | Значимость коэффициента детерминации |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Статистика Шапиро – Вилка, P-Value | Критерий $\chi^2$-Пирсона, P-Value | Критерий λ-Колмогорова, P-Value | Критерий пересечений медианы, P-Value | Критерий спадов и возрастаний, P-Value | Критерий Бокса – Пирса, P-Value | *t*-статистика Стьюдента, P-Value | Статистика Фишера |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Остатки | 0,113405 | 0,722467 | 0,396752 | 0,145058 | 0,875388 | 0,113486 | 0,409662 | 1754,3922 |

Проведенная проверка полученной регрессионной зависимости показала, что:

– «нормальность» распределения отклонений (остатков) (критерии $\chi^2$-Пирсона, P-Value = = 0,722467; Шапиро – Вилка, P-Value = 0,113405; Колмогорова – Смирнова, P-Value = 0,396752) показала, что по данному критерию гипотеза о нормальном распределении отклонений согласуется с экспериментальными данными. Проверяемые критерии показали результаты выше уровня значимости α = 0,05;

– взаимная «независимость» отклонений (остатков) (критерии спадов и возрастаний, P-Value = 0,875388; Бокса – Пирса, P-Value = 0,113486; пересечений медианы, P-Value = 0,145058) показала, что гипотеза о независимости отклонений согласуется с экспериментальными данными. Проверяемые критерии показали результаты выше уровня значимости α = 0,05;

– равенство математического ожидания отклонений (остатков) нулю (*t*-статистика Стьюдента; P-Value = 0,409662) показывает отсутствие «систематической ошибки», что соответствует экспериментальным данным. Проверяемый критерий показал результат выше уровня значимости α = 0,05;

– уравнение регрессионной зависимости, полученное путем обработки данных в пакете MS «Excel», имеет коэффициент детерминации $R^2$ = 0,9951, значимо отличающийся от нуля. Статистический критерий F-Фишера F = 1754,3922 выше критического. Полученные данные показывают, что проверяемая зависимость описывает реально существующую;

– полученные в результате расчета значения степени фактической карбонизации отличаются от полученных в ходе забора проб менее чем на 10 %.

Проверка адекватности регрессионной зависимости степени фактической карбонизации от pH (величины показателя щелочности поровой жидкости) показала, что предлагаемая зависимость в значительной степени описывает существующие физические процессы карбонизации бетона. Регрессионная зависимость может быть использована в дальнейшей работе для прогнозирования степени карбонизации бетона и диагностики технического состояния эксплуатируемых строительных конструкций.

**Список литературы**

1 **Васильев, А. А.** Оценка и прогнозирование технического состояния железобетонных конструкций с учетом карбонизации бетона : монография / А. А. Васильев. – Гомель: БелГУТ, 2019. – 215 с.

2 **Васильев, А. А.** Расчетно-экспериментальная модель карбонизации бетона : монография / А. А. Васильев. – Гомель : БелГУТ, 2016. – 263 с.

УДК 691-033:574

# ПРИМЕНЕНИЕ ВТОРИЧНЫХ МАТЕРИАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

*А. С. ЧУГУНОВА*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Складирование, хранение вторичных материальных ресурсов (отходов) промышленности является огромной экологической и, конечно, экономической проблемой не только городов, но и страны в целом. Острота проблемы отходов связана с глобальными масштабами их образования. По оценкам международных экспертов, в мире ежегодно собирается около 1,3 млрд тонн отходов, в том числе вторичных ресурсов. Появление самостоятельной области природоохранной политики вызвано необходимостью решения проблемы отходов, направленной на развитие методов переработки (использования), сжигания, захоронения, а также стимулирование мероприятий по вовлечению вторичных материальных ресурсов в оборот и предотвращению образования отходов в источниках их образования [1].

На территории Республики Беларусь ежегодно образуется более 20 млн т отходов. На транспортирование отходов, их переработку, содержание свалок в среднем расходуется 10 % стоимости основной продукции. Известный факт, что всего небольшой процент переработанного сырья на промышленном предприятии войдет в себестоимость выпускаемой продукции, а остальное сырье попадет в отходы, что безоговорочно ухудшает экологию. Они отрицательно влияют на окружающую среду, включая земельные ресурсы, недра, подземные и поверхностные воды, растительность и леса в целом, а также на среду обитания животных, воздушную среду и иные компоненты и объекты окружающей среды [1]. Изменения в природной среде, которые неизбежны и очень заметны в городах с крупными предприятиями, значительно ухудшили среду обитания человека и ее качество. Применение в производстве вторичного сырья позволит уменьшить количество существующих отходов, что в свою очередь существенно улучшит экологическую обстановку.

В Национальной стратегии по обращению с твердыми коммунальными отходами и вторичными материальными ресурсами в Республике Беларусь на период до 2035 года определяется система целей, задач, принципов, приоритетов и направлений действий. Согласно [1] основными задачами Национальной стратегии являются:

– оценка текущего состояния в области обращения с твердыми коммунальными отходами и вторичными материальными ресурсами в Республике Беларусь с учетом международного опыта;

– определение основных направлений развития системы обращения вторичных материальных ресурсов (ВМР), ориентированных на улучшение экологической безопасности существующих и будущих мест захоронения, совершенствование инфраструктуры и выбор эффективных технологических решений по обращению ВМР, повышение эффективности деятельности поставщиков услуг по обращению с ВМР;

– определение прогнозного объема необходимых инвестиций в соответствии с инвестиционным планом Национальной стратегии по обращению с твердыми коммунальными отходами и вторичными материальными ресурсами в Республике Беларусь [1].

Безусловно, вышеуказанные задачи Национальной стратегии обязывают производственные предприятия ставить перед собой задачи разработки прогрессивных технологий, обеспечивающие повышение эффективности использования вторичного материального сырья. Одним из вариантов решения является стремление к использованию отходов в технологии безотходного производства (рециклинга), а также применение вторичных отходов на предприятиях других отраслей.

В целом понятие «рециклинг» включает в себя способ переработки отходов для возможности повторного применения сырья, что способствует снижению затрат на производство и повышению эффективности использования сырья.

К наиболее экологически неблагоприятным вторичным производственным отходам можем отнести отходы металлургической отрасли, предприятий топливно-энергетического комплекса, а также машиностроительной отрасли. Основную массу отходов вышеуказанных предприятий составляют золошлаковые отходы, шламы, шлаки и пр. При этом в большинстве из всех полученных отходов наибольшая часть остается на хранение в отвалах.

Сравнивая с международным опытом, можно отметить, что в Европе используется около 70 % отходов, а целью является полное отсутствие захоронения отходов в отвалах.

Одним из вариантов использования вторичных материальных ресурсов в строительстве является их применение в качестве активных минеральных добавок при получении композиционных вяжущих, а также в качестве модификаторов для бетона. Это является значимым достижением цементной промышленности, которое может позволить увеличить ресурсы гидравлических вяжущих, а также снизить расход топлива на их производство.

Активные минеральные добавки в процессе гидратации и твердения обладают пуццолановыми и гидравлическими свойствами. Пуццолановые свойства подразумевают способность материала, в составе которого есть известь, образовывать соединения гидросиликатов кальция, а значит проявлять гидравлические свойства. В свою очередь, гидравлические свойства – это способность тонкодисперсного материала, затворенного водой, твердеть и набирать прочность как на воздухе, так и в воде. В качестве минеральных добавок, обладающих вышеуказанными свойствами, используют, например, гранулированный шлак, золу уноса.

Качественные характеристики активных минеральных добавок, таких как зола уноса, напрямую зависят от чистоты сырья, температуры в зоне сжигания, времени горения частиц и химического состава топлива. Если говорить о применении составляющей вяжущего, то наличие примесей в виде необожженных глинистых материалов, несгоревших частиц угля сказываются отрицательно на качестве итогового материала. Отсюда возникает необходимость контроля качества для нужной активности золы.

Согласно [3], при использовании золы уноса с добавлением микрозема в составе строительного раствора и тяжелого бетона прочность при сжатии увеличивается. Особенно важны чистота и степень измельчения порошка, дисперсность золы уноса. Поровая структура камня меняется в зависимости от тонкости помола. Кроме механической характеристики повышается подвижность смеси при использовании золы уноса. При использовании этой комплексной минеральной добавки возможно получать растворы и бетоны с высокими прочностными показателями из самоуплотняющихся смесей. Такие смеси способны укладываться в опалубку без дополнительного уплотнения в виде вибрации и равномерно распределяться с сохранением однородности [3].

Также зола уноса может послужить материалом для минерального порошка при производстве асфальтобетона. Например, с зольными отходами Бишкекской ТЭЦ проведены исследования, по результатам которых установлено: асфальтобетонные смеси, изготовленные на основе золоотходов, отвечают требованиям ГОСТ по своим физико-механическим характеристикам [5].

Немаловажным является и то, что выброс вредных веществ при производстве портландцемента достаточно высок, а использование золы уноса позволяет сократить количество выбросов, безусловно, только улучшая окружающую среду.

Внедрение вторичных материальных ресурсов, в том числе отходов тепловых электростанций, в сферу строительства позволит не только уменьшить их количество на существующих отвалах, но и предупредить их накопление.

**Список литературы**

1 Национальная стратегия по обращению с твердыми коммунальными отходами и вторичными ресурсами в Республике Беларусь на период до 2035 года // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by (дата обращения: 02.09.2025).

2 Переработка шлаков и безотходная технология в металлургии / М. И. Панфилов, Я. Ш. Школьник, Н. В. Орининский [и др.]. – М. : Металлургия, 1987. – 238 с.

3 **Урханова, Л. А.** Высокопрочный бетон с применение золы уноса и микрозема / Л. А. Урханова, В. Е. Розина. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vysokoprochnyy-beton-s-ispolzovaniem-zoly-unosa-i-mikrokremnezema/viewer (дата обращения: 08.09.2025).

4 **Истомина, К. Р.** Возможные технологии использования золы уноса / К. Р. Истомина, А. М. Бургонутдинов, К. А. Хусаинова // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2022. – № 1. – С. 36–44.

5 **Маданбеков, Н. Ж.** Применение в асфальтобетонных смесях минерального порошка из золошлакового уноса ТЭЦ г. Бишкек / Н. Ж. Маданбеков, Б. Ж. Осмонова // Вестник КГУСТА. – 2016. –№ 1 (51). – С. 99–103.

УДК 69:[658.513.4+004.4]

# ОПТИМИЗАЦИЯ НАДЕЖНОСТИ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНО-КОММУНИКАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЧЕРЕЗ ИННОВАЦИОННОЕ КАЛЕНДАРНО-СЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

*В. В. ШЕЛЮТО, Т. В. ЯШИНА*
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Надежность транспортно-коммуникационной инфраструктуры (ТКИ) – ключевой фактор устойчивого развития экономики и безопасности государства. Надежная инфраструктура обеспечивает непрерывность транспортных и информационных потоков, снижает риски сбоев поставок, повышает качество жизнедеятельности населения.

Календарно-сетевое моделирование (КСМ) играет важную роль в обеспечении надёжности объектов ТКИ: правильно спланированный график работ позволяет оптимизировать сроки строительства и эксплуатации, а также оперативно реагировать на непредвиденные ситуации. Надежность в инженерии – способность технической системы сохранять заданные функции в течение заданного времени при определенных условиях эксплуатации. В ТКИ это охватывает параметры доступности, отказоустойчивости, ремонтопригодности и долговечности. Надежность характеризуется такими показателями, как MTBF (среднее время наработки на отказ), коэффициент готовности и допустимый уровень отклонений от графика (schedule variance), Availability (доступность) ПО.

Инновационное КСМ включает цифровые методы планирования: интеграцию BIM (Building Information Modeling), алгоритмов искусственного интеллекта, цифровых двойников (Digital Twins), стохастических моделей. Их внедрение в проектирование и реализацию объектов ТКИ позволяет не только оптимизировать временные и ресурсные показатели, но и повысить точность исполнения и устойчивость к сбоям. Существуют следующие методологии:

– классические: CPM (Critical Path Method), PERT;
– гибкие: SCRUM, Agile Construction;
– цифровые: BIM-интеграция, 4D/5D-моделирование, AI-оптимизация расписаний.

Методы отличаются по адаптивности и уровню цифровизации (таблица 1).

*Таблица 1* – **Сравнительный анализ влияния методологий КСМ на ключевые показатели надежности объектов ТКИ [1]**

| Метод КСМ | Снижение ошибок планирования, % | Улучшение MTBF, % | Рост Availability, % | Потенциал/ограничения в РБ |
|---|---|---|---|---|
| CPM/Gantt | 5–10 | 2–5 | 3–7 | Доступно; ограничено в гибкости |
| BIM (4D/5D) | 25–35 | 10–20 | 15–25 | Высокий потенциал; нехватка кадров, ПО |
| Agile | 15–20 | 5–10 | 10–15 | Требует изменения контрактов |
| Стохастическое КСМ | 30–40 | 20–25 | 25–30 | Перспективно; нет нормативной базы |

Исторически КСМ в РБ развивалось от ручного графирования, MS Excel к использованию инновационных программ типа MS Project, Primavera и других программ, использующих за основу диаграмму Ганта. С 2020-х годов начата цифровая трансформация, включающая внедрение BIM, разработку соответствующих современным требования ТНПА и создание платформы «Госстройпортал» [2]. Тем не менее остаются проблемы внедрения в отрасли Республики Беларусь и на международный рынок (таблица 2).

*Таблица 2* – **Факторы риска для надежности объектов ТКИ: международные и белорусские аспекты [1]**

| Категория риска | Общепризнанный фактор | Специфический для РБ | Эффективность, % |
|---|---|---|---|
| Кадры | Недостаток специалистов BIM | Дефицит преподавателей, отставание вузов | До 30 |
| Нормативы | Устаревшие стандарты | Отсутствие регламентов КСМ | До 25 |
| Финансы | Высокая стоимость ПО | Нестабильное госфинансирование | До 20 |
| Техническая инфраструктура | Недостаточная мощность серверов | Ограниченный интернет на объектах | До 15 |

Инновационные подходы (особенно BIM) позволяют учитывать неопределенности, обеспечивать проактивное управление и адаптивное планирование. В РБ данный потенциал реализуется частично из-за барьеров. Необходима комплексная стратегия преодоления ограничений. На основе анализа текущей ситуации сформулированы стратегические направления внедрения инновационного КСМ в РБ. К ним относятся внедрение обязательных образовательных программ по КСМ и BIM в строительных специальностях; создание национальных стандартов и регламентов КСМ; инвестирование в цифровую инфраструктуру и ПО (серверы, лицензии); стимулирование практики 4D-планирования на госзаказах; развитие пилотных проектов цифровых двойников инфраструктуры. Каждое направление согласуется с мировыми трендами и учитывает местный контекст. Например, обязательное обучение инженеров IT-технологиям позволит преодолеть «кадровый разрыв», а современные ТНПА гарантируют совместимость использования данных и их актуализацию.

Проведённый анализ показывает, что внедрение инновационного КСМ в РБ реально повысит надёжность ТКИ, но лишь при преодолении существующих барьеров. Результаты таблиц 1–3 указывают, что BIM-интегрированные расписания и цифровые технологии снижают риски задержек и простоев. Однако *риск кадрового дефицита* может нивелировать эти преимущества: без достаточного числа обученных проектировщиков высокотехнологичные графики останутся вне досягаемости, это подтверждается и в других исследованиях.

Оценивая реалистичность стратегий, отметим, что государственные «инициативы» (стандарты BIM, порталы, планы мероприятий) стимулируют инновации, но требуют ресурсов. Прогноз повышения надежности при их реализации условно благоприятный: при господдержке и инвестициях можно ожидать уменьшения частоты сбоев в строительстве и эксплуатации от 10 до 20 % за счет более точного планирования. Однако без полноценного финансирования и нормативного сопровождения некоторые проекты могут отклоняться от намеченных целей.

Пути реализации стратегий связаны с развертыванием образовательных и административных программ. Необходимо включить дисциплины КСМ/BIM в учебные планы университетов и колледжей; провести квалификационные курсы для действующих инженеров; принять распоряжения о постепенном введении стандартов КСМ (СН и СП, ГОСТ, ISO) и о требовании 4D-моделирования при госфинансировании; обеспечить доступ к современному ПО (через образовательные лицензии или господдержку предприятий); развивать пилотные цифровые двойники крупных инфраструктурных объектов с целью оценки практических выгод. При этом важно обеспечить достаточное финансирование, например, для создания центра компетенций и грантов для внедрения новых методик. Международный опыт показывает, что успех подобных шагов сопровождается координацией между правительством, вузами и бизнесом.

**Список литературы**

1 План цифровизации строительной отрасли Республики Беларусь на 2021–2025 гг. // Минстройархитектуры РБ. – URL: https://www.minstroy.gov.by/ (дата обращения: 12.07.2025).

2 Стандарт недели. СТБ 2599-2021. Информационное моделирование зданий // Республиканская научно-техническая библиотека. – URL: https://rlst.by/2023/04/26/standart-nedeli-stb-2599-2021-informatsionnoe-modelirovanie-zdanij (дата обращения: 12.07.2025).

## С О Д Е Р Ж А Н И Е

Приветствия участникам конференции ..... 3

**1 БЕЗОПАСНОСТЬ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ**

*Ван Синь.* Влияние распространения задержек поездов на безопасность работы технических станций: анализ и оценка рисков ..... 4
*Давыдов А. М., Кокин С. М., Куренков П. В.* Российские инновации в проектировании и строительстве ВСМ Москва – Санкт-Петербург ..... 5
*Ерофеев А. А., Бабарико И. Н.* Применение цифровых двойников на железнодорожном транспорте ..... 7
*Ерофеев А. А., Науменко А. А.* Основные подходы идентификации отклонений в интеллектуальной системе управления сортировочной станции ..... 10
*Зенкевич А. Г.* Структура социально-психологических характеристик руководителей различных уровней руководства Белорусской железной дороги при формировании кадрового резерва ..... 12
*Козлов В. Г.* Оценка перевозочного потенциала железнодорожной инфраструктуры на основе моделирования транспортных потоков ..... 14
*Кондакова А. Д., Кущенкова Л. С.* Развитие международного сотрудничества Российской железной дороги .. 16
*Кос О. И., Смирнов В. Ю.* Расчет времен оптимальных замен или ремонтов элементов сложных технических систем на железных дорогах ..... 18
*Кудрина А. А., Коровкина О. И., Чернышев К. А.* Актуальные особенности расчета величины рисков нарушений безопасности движения на железных дорогах России ..... 20
*Кузнецов В. Г., Литвинова И. М.* Исследование параметров расформирования составов на участковой станции при моделировании процесса распределения сортировочной работы ..... 21
*Кузнецов В. Г., Литвинова И. М., Заводцов Е. Н.* Структурное и временное резервирование процессов поездной работы на технических станциях и железнодорожных участках ..... 24
*Кузнецов В. Г., Млявая О. В.* Оценка устойчивости эксплуатационной работы технических станций и железнодорожных участков ..... 26
*Лисогурский О. Н., Кузнецов В. Г.* Влияние условий транспортного рынка на подходы к развитию системы показателей эксплуатационной работы ..... 28
*Науменко А. А.* Дерево решений как метод оперативного управления работой железнодорожной станции . 30
*Негрей В. Я., Дорошко С. В.* Безопасность функционирования железнодорожных линий ..... 32
*Негрей В. Я., Пожидаев С. А.* Вопросы стратегического развития и повышения безопасности транспортных систем ..... 33
*Негрей В. Я., Пожидаев С. А.* Обеспечение развития и повышения безопасности работы горочных комплексов железнодорожных станций ..... 34
*Пучков Д. Д.* Оценка гладкости сопряжения элементов продольного профиля сортировочных устройств с помощью метода IRI ..... 36
*Сладкевич А. Н., Ерофеев А. А.* Постановка задачи выбора оператором подвижного состава рационального маршрута следования вагонопотоков ..... 39
*Федин В. М., Чернышев К. А., Сидоров А. Ю.* Повышение надёжности горочных тормозных башмаков. Актуальное состояние и перспективы развития ..... 41
*Фёдоров А. И., Никончук Ю. А.* Обеспечение безопасности транспортной инфраструктуры в мирное и военное время ..... 43
*Филатов Е. А.* Безопасность маневровой работы в стрелочных горловинах железнодорожных станций ..... 45
*Хорошевич А. А.* Сценарное планирование и имитационное моделирование как инструменты обеспечения экономической безопасности грузового железнодорожного транспорта ..... 47
*Хотько О. А., Шевко Н. М.* Регулятивная и охранительная функции права при обеспечении безопасности транспортной деятельности и устойчивости транспортной системы ..... 49
*Цыбулько В. В.* Защита элементов транспортной инфраструктуры от воздействия беспилотных летательных аппаратов – опыт специальной военной операции ..... 51
*Шапкин И. Н., Сугоровский Ан. В., Сугоровский Арт. В.* Критерии и локальные показатели эффективности как инструмент повышения надежности в управлении грузовой и поездной работой ..... 52
*Шкурин К. М., Шкурин М. И.* Современные подходы к управлению на транспорте как фактор повышения безопасности перевозочного процесса ..... 54

## 2 БЕЗОПАСНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА И СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ


*Антюхин Г. Г., Иванов К. В., Силюта А. Г., Абдоян М. А., Струнгарь С. А.* Влияние конструктивного исполнения форсунок песочницы локомотива на безопасность движения ..... 57

*Афанаськов П. М., Белогуб В. В., Емельянова К. А., Комиссаров В. В., Коновалов Е. Н., Пастухов М. И., Целковикова Л. П., Чернин Р. И., Путято А. В.* Исследование статической и усталостной прочности цельнокатаных колес электровоза БКГ ..... 59

*Бурченков В. В., Коленчиков А. В., Крот П. А., Скворцов С. А.* Повышение надежности передачи и информативности сообщений о техническом состоянии подвижного состава в движении ..... 60

*Владимиров Д. С., Кириллов А. В., Назаров Д. В.* Инновационные решения в области тормозного оборудования как ключевой фактор повышения безопасности на железнодорожном транспорте ..... 63

*Воронцов Н. В., Кущенкова Л. С.* Внедрение двухэтажных пассажирских вагонов в России ..... 65

*Галушко В. Н.* Метод обнаружения короткозамкнутых витков в обмотках трансформаторов и асинхронных двигателей при работе под нагрузкой на основе сверточных нейронных сетей ..... 67

*Гегедеш М. Г., Ворожун А. В.* Исследование аэродинамики сцепа платформ с грузами различной конфигурации ..... 69

*Гегедеш М. Г., Комаровский Н. В., Рахимов Р. В.* Анализ напряженно-деформированного состояния боковой рамы тележки вагона ..... 71

*Гучинский Р. В.* Единый подход к расчету усталостных повреждений металлоконструкций экипажной части ..... 73

*Демьянчук О. В.* Обтекание потоком воздуха вагона-платформы ..... 75

*Евдасев И. С.* Определение пускового тока светодиодных светильников при неполноте исходных данных 77

*Ермоленко Д. В., Галушко В. Н.* Метод обнаружения короткозамкнутых витков в обмотках трансформаторов и асинхронных двигателей на основе частотного анализа ..... 79

*Загорцев В. А., Ананьева О. С.* Выполнение электрических расчетов с учетом изменения напряжения на токоприемнике электроподвижного состава метрополитена ..... 81

*Загорцев В. А., Подольская В. Н.* Применение накопителей электроэнегии на электрическом подвижном составе метрополитена ..... 83

*Зайчик В. С., Кебиков А. А., Роговенко М. А.* Актуализация требований безопасности при сертификации железнодорожной продукции ..... 85

*Комиссаров В. В.* Наука, образование, производство: инновационная триада под руководством Л. А. Сосновского ..... 87

*Комиссаров В. В.* Прорывные достижения научной школы Л. А. Сосновского ..... 88

*Комиссаров В. В., Таранова Е. С.* Прямой и обратный эффекты в системе «колесо – рельс»: как управлять надежностью через трибофатику ..... 89

*Косимов У. Д., Турсунов Н. К.* Исследование влияния толщины детали на процесс отверждения изделий из полимерных композиционных материалов ..... 90

*Маркавцов А. А.* Влияние характеристик перевозимых во флекситанках жидких грузов на динамику их относительного движения ..... 91

*Остриков О. М.* Роль зерна поликристалла у устья остаточного клиновидного микродвойника в формировании полей механических напряжений в крупном сдвойникованном зерне ..... 93

*Отока А. Г., Устиловский П. А., Холодилов О. В.* Магнитопорошковый контроль наконечников тормозных соединительных рукавов вагонов ..... 95

*Пигунов А. В., Пигунов В. В., Калашников М. А., Гогонов А. А.* Анализ эксплуатационной нагруженности универсальной платформы с целью снижения массы тары рамы ..... 98

*Пигунов А. В., Пигунов В. В., Калашников М. А., Максименко А. М.* Обзор конструкций скоростных платформ ..... 99

*Пигунов В. В., Пигунов А. В., Калюко О. В.* Основные тенденции развития трехэлементных тележек грузовых вагонов ..... 101

*Приходько А. П.* Управление проскальзыванием в колесно-рельсовой системе ..... 103

*Разон В. Ф.* Потребность в ремонтной базе для периодических ремонтов грузовых вагонов ..... 104

*Разон В. Ф.* Влияние срока службы грузовых вагонов на потребность в периодических ремонтах ..... 108

*Самодум Ю. Г., Лисичкин И. А.* Использование результатов диагностики состояния локомотива для обучения локомотивных бригад ..... 109

*Сахаров П. А., Бельченко М. Е.* Оценка безопасности движения поездов в кривых участках пути ..... 111

*Третьяк З. Ю., Свириденко К. В., Альховская Е. М.* Определение требований безопасности к оборудованию железнодорожного подвижного состава, работающему под избыточным давлением ..... 113

*Турсунов Н. К., Крень А. П., Уразбаев Т. Т., Рахимов У. Т.* Исследование механических характеристик высокопрочного чугуна с использованием метода микроударного индентирования ..... 116

*Турсунов Н. К., Саидирахимов А. А.* Исследование механических характеристик литых деталей подвижного состава железнодорожного транспорта ..... 118
*Турсунов Н. К., Саидирахимов А. А.* Термодинамический анализ образования неметаллических включений в стали марки 20ГЛ ..... 121
*Турсунов Н. К., Тоиров О. Т.* Энергосберегающие технологии использования теплоизоляционных смесей в литейном производстве ..... 125
*Турсунов Н. К., Уразбаев Т. Т., Турсунов Т. М.* Разработка теоретических основ процессов рафинирования и модифицирования металлических расплавов для модернизации технологических режимов плавки ..... 126
*Чернин Р. И., Моисейчикова О. М.* Оценка влияния загрузки вагона на изменение эквивалентных напряжений на поверхности ступицы цельнокатаного колеса, напрессованного на подступичную часть оси колёсной пары ..... 128
*Шилько С. В., Орешкевич Е. Г., Сазанков А. П.* Методика автоматизированного определения геометрических параметров трещины при проведении механических испытаний конструкционных материалов ..... 130
*Шимановский А. О., Карацюба Ю. Д.* Конечно-элементное моделирование работы резинокордной муфты локомотива под нагрузкой ..... 132
*Шимановский А. О., Козаченко В. В.* Перспективы практического применения технологии передачи электроэнергии по оптоволокну ..... 134

## 3 ИНФОРМАЦИОННАЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНИКИ И СВЯЗИ

*Алуев Е. А.* Усовершенствование системы мониторинга отвлечения водителя ..... 136
*Бочков К. А., Медведев Д. Д., Жигалин И. О.* Особенности определения максимальной длины тональных рельсовых цепей ..... 137
*Бочков К. А., Харлап С. Н., Литвинов Е. П.* Обзор архитектуры, особенностей и методов обеспечения безопасности в автоматизированных системах управления ответственными технологическими процессами железнодорожного транспорта ..... 140
*Власенко Д. В.* Оценка уязвимости персонала к атакам социальной инженерии: нечетко-множественный подход ..... 143
*Володин Д. Н.* Методы обнаружения и предотвращения кибератак на системы телемеханики и SCADA ..... 145
*Воробьёв С. Ю., Ханчевский Е. А.* Практическая реализация проекта внедрения системы менеджмента информационной безопасности в деятельность предприятия энергетической отрасли ..... 146
*Громыко И. Л.* Диагностика предотказного состояния трансформаторов на основе частотного анализа ..... 148
*Ефанов Д. В.* К организации контроля самодвойственности булевых функций на выходах дискретных устройств на основе логической коррекции сигналов и равновесных кодов ..... 150
*Ефанов Д. В.* Методика синтеза самоквазидвойственных дискретных устройств с контролем вычислений по двум диагностическим признакам ..... 152
*Ефанов Д. В., Елина Е. И.* Метод синтеза самопроверяемых дискретных устройств на основе композиции равновесных кодов «1 из 4» и «3 из 4» ..... 155
*Ефанов Д. В., Пивоваров Д. В.* Способ синтеза кодеров полиномиальных кодов в виде комбинационных логических схем ..... 157
*Каменский В. В.* Использование многомерной матрицы при реализации ответственных команд в системах автоматики на железнодорожных станциях ..... 159
*Кейзер А. П., Голдобина Т. А., Козловский А. Е., Долгомыслова С. Н.* Модификация математического аппарата и программного обеспечения расчета оптимальных по расходу топлива режимов ведения грузовых поездов *в САВ* ..... 161
*Кильченко Е. Н., Сатырев Ф. Е., Поддубный А. А., Поддубный П. А.* Применение программно-аппаратного комплекса «Innotech Network Monitor» на объектах информационной инфраструктуры транспортных систем ..... 163
*Ковальчук А. Ю., Адиб Менькова К.* Модернизация информационной инфраструктуры для оптимизации процессов создания систем защиты информации ..... 165
*Комнатный Д. В.* Модель анализа и прогнозирования помехоустойчивости микропроцессорные СЖАТ к электромагнитным импульсам преднамеренного воздействия ..... 167
*Комнатный Д. В.* Расчет распространения импульсных помех в линиях передачи сигналов электронных узлов операторным методом ..... 169
*Комнатный Д. В.* Расчет распространения импульсных сигналов в активно-емкостных цепях с распределенными параметрами ..... 171
*Корниенко К. И.* Применение искусственного интеллекта на железнодорожном транспорте ..... 173
*Пенькова Н. Г., Ипатов С. В.* Математическая модель определения показателей безопасности механических изделий подвижного состава ..... 175

*Рязанцева Н. В., Минин В. Е., Кухаренко И. С.* Информационная безопасность системы дистанционного обучения ... 177
*Сатырев Ф. Е. Литвин В. Н.* Опорное управление исполнительной станцией на базе типовых решений ДЦ «Неман» ... 178
*Соколов М. М., Ходкевич А. Г., Петракова К. В.* Анализ изменения входного сопротивления рельсовой цепи в различных режимах ... 180
*Стажарова Л. Н., Вылупко А. П.* Разработка лабораторного макета переездной сигнализации АПС-04 ... 182
*Харлап С. Н., Литвинов Е. П.* Модернизация программного комплекса для автоматизации проведения FMECA-анализа систем ЖАТ ... 184
*Харлап С. Н., Яковцева О. И.* Метод количественной оценки достижимого уровня полноты безопасности систем ЖАТ на основе архитектурных ограничений ... 186
*Швалов Д. В., Ревенко Е. С.* Модель и алгоритм выявления обрыва стрелочных соединителей, не обтекаемых сигнальным током ... 189
*Шкрабов А. В.* Обеспечение информационной надежности и диагностической достоверности в автоматизированной системе анализа глазодвигательных нарушений ... 191

## 4 ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

*Велюго Е. С.* Многофакторное моделирование и оптимизация двухступенчатой схемы очистки воды с применением методов машинного обучения ... 194
*Вербицкий П. С., Подвойский Н. А.* Шумоизоляционные материалы: безопасность и эффективность применения ... 196
*Вострова Р. Н., Пехота А. Н., Малофей В. А.* Выращивание рулонных газонов с удобрениями на основе осадков сточных вод ... 198
*Вострова Р. Н., Пехота А. Н., Малофей В. А.* Осадки сточных вод в зеленом строительстве магистральных трасс ... 200
*Горелая О. Н.* Морфологический анализ магнитного сорбента из осадков промывных вод станций обезжелезивания ... 202
*Гриб А. А.* Мероприятия по борьбе с пенообразованием и вспуханием активного ила в аэротенках ... 203
*Дадабоев Р. М.* Перспективы использования водородного топлива в автомобилях ... 205
*Журавлева М. А., Зубрев Н. И., Кокин С. М.* Оценка загрязнения тяжёлыми металлами территорий вблизи железной дороги ... 207
*Кабулова Н. Ж.* Проблема утилизации токсичных отходов автомобильной промышленности ... 209
*Kadirov S. M., Dadaboev R. M., Ulkanov S. S.* Use of a gasoline-hydrogen mixture to increase the dynamic characteristics of a gasoline vehicle ... 210
*Каримходжаев Н., Мойдинов Д. А., Эргашев Д. П.* Особенности эксплуатации автомобильных двигателей в жарко климатических условиях Узбекистана ... 212
*Каюмов Б. А., Эргашев Д. П.* Оптимизация аэродинамической формы кузова автомобиля как фактор повышения энергетической и экологической безопасности транспорта ... 214
*Клименкова М. В., Новикова О. К.* Инновационные подходы к проектированию и управлению системами канализации: зарубежный опыт ... 216
*Ковалева И. Н., Пигунов А. В.* Экотрибология смазки для железнодорожного транспорта ... 218
*Комиссарова К. М., Макеев В. В.* Метод анализа многокомпонентных газовых смесей для определения концентрации общего органического углерода в промышленных выбросах в атмосферу от железнодорожных предприятий ... 220
*Кудина Е. Ф., Приходько И. В., Курицын П. А., Гончаров Г. Р., Онгарбеков А. К.* Влияние собственной вибрации на работу электрических машин ... 223
*Лемешевская А. В.* Материалы и технологии шумоподавления ... 224
*Мордас М. С., Акулич Н. М., Клименков Е. О.* Модификация битумов с использованием отходов промышленного производства ... 228
*Овчинников В. М., Макеев В. В.* Современное энерго-экологическое решение эксплуатации наземного транспорта ... 230
*Пропольский Д. Э.* Эффективность осаждения оксида железа на поверхности модифицированных фильтрующих материалов ... 234
*Ратникова А. М., Салянко И. А.* Анализ факторов, влияющих на надежность трубопроводных систем ... 235
*Роденко А. А.* Инновационные технологии реконструкции очистных сооружений: опыт модернизации с применением биологического удаления азота и химического осаждения фосфора ... 237
*Середа Н. П.* Комплексное обследование повысительных насосных станций ... 239
*Слепцова В. И.* Особенности организации строительных работ при реконструкции и перепланировке производственных объектов ... 242

*Слепцова К. А.* Особенности организации отведения и очистки поверхностных сточных вод предприятий машиностроения ..... 244
*Соколов М. М., Рыбина Л. А.* Гармонический состав питающего напряжения в устройствах железнодорожной автоматики и телемеханики ..... 245
*Толочко О. Н.* Правовое обеспечение энергетической и экологической безопасности транспорта ..... 247

## 5 БЕЗОПАСНОСТЬ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

*Абрашитов А. А.* Повышение поперечного сопротивления сдвигу рельсошпальной решетки в загрязненном балласте пневматическим суфляжем ..... 250
*Афанасенко А. А.* Эффективные стабилизирующие добавки на основе местного вторичного сырья для асфальтобетонов с высоким содержанием вяжущего ..... 254
*Ахраменко Г. В., Дралова И. П., Никитенко М. Ю.* Оценка воздействия дорожной инфраструктуры на компоненты окружающей среды ..... 257
*Ахраменко Г. В., Никитенко М. Ю., Абраменко А. А.* Анализ опыта применения габионных конструкций на дорогах Республики Беларусь: проблемы и перспективы ..... 259
*Ахраменко Г. В., Никитенко М. Ю., Кожедуб С. С.* Влияние геометрических параметров пересечений на поведение водителей и безопасность дорожного движения ..... 261
*Боровик В. В., Биндюк С. А., Ковтун П. В.* Роль наставничества в обеспечении безопасности движения на железнодорожном транспорте ..... 263
*Габец П. Д., Хачатурян В. В., Александров Д. Ю.* Пути снижения рисков производственного травматизма при выполнении работ по ликвидации ямочности и герметизации трещин ..... 265
*Гнездилов С. А.* Влияние химического воздействия на прочность железобетонных шпал ..... 267
*Гринь Е. Н.* Влияние предупреждений об ограничении скоростей движения поездов на показатели перевозочного процесса ..... 269
*Довгелюк Н. В., Масловская Е. М., Кононович Л. П.* Повышение скорости движения поездов ..... 272
*Довгелюк Н. В., Трушко И. С., Бараболкин П. Н.* Возможность электрификации участка «Жлобин – Могилев» Белорусской железной дороги ..... 274
*Жуковский Е. М.* Применение теории надежности при проектировании нежестких дорожных одежд в Республике Беларусь ..... 276
*Зикратьев В. В.*, *Пискун В. Ю.* Устройство пассивной защиты путей подвоза и эвакуации от огневых ударов беспилотных летательных аппаратов ..... 278
*Коваленко А. Н.* Производственно-нормативное планирование – современное направление сбалансированного распределения ресурсов в путевом хозяйстве железных дорог ..... 285
*Корончик А. В., Жуковский Е. М.* К вопросу проведения текущего ремонта местных проездов и подъездных дорог с использованием органического вяжущего в виде нефтешлама ..... 286
*Куртиков Р. М.* Мероприятия по организации и обеспечению безопасности движения на пересечении автомобильных и железных дорог ..... 288
*Лапушкин А. С.* Защитные покрытия для пружинных прутковых клемм промежуточных рельсовых скреплений ..... 292
*Мамсиков Н. В., Корик С. В.*, *Ковтун П. В.* Задачи путевого хозяйства Белорусской железной дороги и пути их решения ..... 294
*Мамсиков Н. В., Кравченко А. А., Ковтун П. В.* Технология машинизированного текущего содержания пути на Белорусской железной дороге ..... 296
*Мордас М. С., Исаеня З. А., Жуковский Е. М.* Возможности использования дренирующих асфальтобетонов для повышения безопасности объектов транспортной инфраструктуры ..... 298
*Никитенко М. Ю., Ахраменко Г. В., Гулевич Е. А.* Особенности сооружения водопропускных труб на автодорогах методом продавливания ..... 300
*Никитенко М. Ю., Строев Е. Д., Гулевич Е. А.* Оценка экологических последствий реконструкции дорожных объектов в контексте устойчивого автодорожного сервиса ..... 302
*Никитин Е. В., Ковтун П. В.* Инновационные подходы к снегозадержанию на стрелочных переводах ..... 304
*Носов Н. Р.* Определение факторов, влияющих на угон остряков и сердечников крестовин на скоростных стрелочных переводах и в уравнительных стыках ..... 306
*Певзнер В. О., Баронайте Р. А., Шарова В. О.* Новые аспекты в системе технического обслуживания пути в условиях высокоскоростного движения ..... 309
*Петрусевич В. В., Томашов В. В., Дашук К. Д., Грищенков Я. М., Коваленко В. С.* Обзор основных технологий для выполнения ямочного ремонта асфальтобетонного покрытия на дворовых территориях ..... 311
*Рахимов Д. Б.* Дорожная инфраструктура и «зелёные» элементы как фактор замедления реагирования пожарно-спасательных подразделений ..... 313
*Романенко В. В.* Верификация численных и математических методов исследования ..... 315
*Романенко В. В.* Определение оптимальных размеров узлов соединения составных деревянных шпал ..... 317

*Романенко В. В., Горбань Е. А., Волков И. М.* Сравнение жизненного цикла стрелочного перевода на железобетонном и деревянном основаниях ..... 319
*Романенко В. В., Горбань Е. А., Волков И. М.* Перспективы комплексной переукладки стрелочных переводов с заменой деревянного основания железобетонным ..... 321
*Романенко В. В., Терех А. В., Сороговец В. А.* Продление срока службы металлических элементов стрелочных переводов ..... 323
*Савельева Э. А.* Продление сроков службы рельсов на участках железнодорожного пути с повышенным ресурсом ..... 325
*Савин А. В., Варава С. П.* Участки переменной жесткости безбалластного пути для высокоскоростных магистралей ..... 327
*Савин А. В., Гнездилов С. А.* Состояние шпал при организации движения тяжеловесных длинносоставных поездов ..... 329
*Сазанчук Э. П., Шишко Н. И.* Использование пьезоэлектрических элементов для повышения безопасности на дорогах ..... 331
*Смирнов Н. Р.* Учет прогнозных моделей изменения климата при разработке комплекса мероприятий по ремонту дорожной одежды ..... 332
*Соломатин Е. В.* Зависимость устойчивости бесстыкового пути на железобетонных шпалах от сопротивления кручению в узле анкерного рельсового скрепления ..... 334
*Суслов О. А., Гришина М. А., Трушкин В. А.* Обеспечение безопасности бесстыкового пути на основе многофакторного анализа условий его эксплуатации ..... 336
*Суслов О. А., Трушкин В. А., Гришина М. А.* Исследование напряженно-деформированного состояния стыка с применением шарнирных накладок ..... 338
*Трунаев А. М., Холодов И. А., Грабский К. А.* Перспективные подходы и технологии повышения безопасности на железнодорожных переездах ..... 340
*Ходан Е. П., Жуковский Е. М., Кравченко С. Е.* Использование методов неразрушающего контроля качества асфальтобетонов ..... 341
*Ходжакулов М. Н.* Транспортная безопасность на горных перевалах ..... 343
*Храмцов А. Л., Царенкова И. М., Александров Д. Ю.* Организация совместной научно-исследовательской деятельности в области дорожного строительства ..... 345
*Царенкова И. М., Зуев И. П.* Оптимизация процесса диагностирования и оценки технического состояния жёстких дорожных покрытий ..... 347
*Чернышов О. В., Казмерчук В. И.* Инновационные технологии и системы защиты транспортных средств и инфраструктуры ..... 350
*Шебзухов Ю. А., Гаранин В. Н.* Повышение долговечности анкерных узлов эстакад транспортных комплексов uST с выработкой технических решений для их проектирования ..... 352
*Шишко Н. И., Дашковский А. Ю.* Популяризация активного образа жизни: насколько пешеходная инфраструктура готова к обеспечению безопасности ..... 354
*Юницкий А. Э., Артюшевский С. В.* Свойства объектов транспортной инфраструктуры на примере струнного транспорта ..... 356
*Яцевич П. П.* Влияние способа модификации и концентрации полимера на комплекс свойств асфальтобетона .. 358

## 6 НАДЕЖНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

*Атрошко Е. К., Дралова И. П.* Геодезические методы определения крена инженерных сооружений ..... 361
*Васильев А. А., Агеева К. Э., Круподеров А. Ю., Сверж В. Ю.* Начальная карбонизация бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12}/_{15}$–$C^{50}/_{60}$ для жестких смесей ..... 362
*Васильев А. А., Ткачева М. И., Доля В. А.* Техническая диагностика железобетонных конструкций ..... 365
*Васильев А. А., Ткачева М. И., Коновалова О. Н., Чугунова А. С.* Проблемы долговечности железобетонных конструкций объектов транспортного строительства ..... 367
*Деружинская А. В., Семченко Н. И.* Цифровизация и роботизация строительной отрасли Республики Беларусь ..... 369
*Захаренко З. Н., Астрелина А. В.* Принципы циркулярной экономики в строительстве ..... 371
*Карамышев А. А.* Методика «цвет – образ» в обучении студентов архитектурных и дизайнерских специальностей ..... 373
*Коновалова О. Н.* Особенности конструктивных схем, влияющих на надежность зданий при реконструкции. 375
*Конышко В. А., Яшина Т. В.* О перспективах использования наноактивных добавок в бетонах для транспортного строительства ..... 377
*Лихачёва М. А., Щеглова А. В.* Акустическая безопасность в испытательных лабораториях УО «БелГУТ». 379
*Малков И. Г., Вылетникова Ю. Н.* Железнодорожный вокзальный комплекс в планировочной структуре города ..... 381
*Мишуренко Н. А.* Влияние критерия остановки метода Ньютона на устойчивость вычислительного алгоритма расчета оболочек ..... 383

*Пенязь М. М., Пантюхов О. Е.* Повышение долговечности строительных конструкций путем внедрения инновационных материалов ..... 384
*Поддубный А. А., Кильченко Е. Е.* Колебания сваи при внезапной осадке части основания ..... 386
*Руденкова И. В.* Основные причины процесса перепрофилирования зданий ..... 388
*Скибунов М. А., Шелюто В. В., Прасол В. М.* Искусственный интеллект в управлении строительными проектами: современное состояние и перспективы внедрения ..... 390
*Сырова Н. С., Дралова И. П., Кожедуб С. С.* Геодезические технологии обеспечения безопасности зданий и сооружений ..... 391
*Талецкий В. В., Невейков А. Н.* Армирование сборных фундаментных плит стеклокомпозитными стержнями ..... 393
*Ташкинов А. Г.* Повышение надёжности и эффективности стеновых ограждений в тепловых установках для тепловлажности обработки железобетонных изделий ..... 395
*Титкова Т. С., Щеглова А. В.* Особенности проектирования школьных зданий как объектов с повышенными требованиями к безопасности ..... 397
*Ткачева М. И., Круподеров А. Ю., Васильев А. А., Медведева Е. В.* Зависимость степени фактической карбонизации от показателя щелочности поровой жидкости бетона ..... 399
*Чугунова А. С.* Применение вторичных материальных ресурсов в строительстве ..... 401
*Шелюто В. В., Яшина Т. В.* Оптимизация надежности объектов транспортно-коммуникационной инфраструктуры через инновационное календарно-сетевое моделирование ..... 403

Научно-практическое издание

**ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ НА ТРАНСПОРТЕ**

Материалы XIV Международной научно-практической конференции,
посвященной пятилетке качества
(Гомель, 20–21 ноября 2025 г.)

Часть 1

Издается в авторской редакции

Технический редактор *В. Н. Кучерова*
Корректоры: *А. А. Павлюченкова, Е. Г. Привалова, Д. В. Марцинкевич*
Компьютерная верстка: *Т. М. Маруняк, С. В. Ужанкова, Т. Л. Федькова*

Подписано в печать 10.11.2025 г. Формат 60×84 1/8.
Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 47,90. Уч.-изд. л. 46,18. Тираж 50 экз.
Зак. №. 1976. Изд. № 41.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский государственный университет транспорта.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/361 от 13.06.2014.
№ 2/104 от 01.04.2014.
№ 3/1583 от 14.11.2017.
Ул. Кирова, 34, 246653, Гомель

ISBN 978-985-891-231-4
9 789858 912314