

Министерство транспорта и коммуникаций  
Республики Беларусь

Белорусский государственный университет транспорта

**XI Международная научно-практическая конференция  
«ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ  
НА ТРАНСПОРТЕ»**

**Секция 1 «Безопасность транспортных систем»**

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ  
ПРОЦЕССА ИНТЕРВАЛЬНОГО СКАТЫВАНИЯ  
ОБЪЕКТОВ С РАЗНОУПРУГОЙ ПОВЕРХНОСТИ ИМИТАЦИИ  
СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ**

Презентация доклада А. К. Головнича, С. П. Новикова

Гомель, 2021

# МОДЕЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ КАК ОБЪЕКТА РЕКОНСТРУКЦИИ ПРОЦЕССА РОСПУСКА ВАГОНОВ

Реальный (натурный) образ



Идеальный (модельный) образ



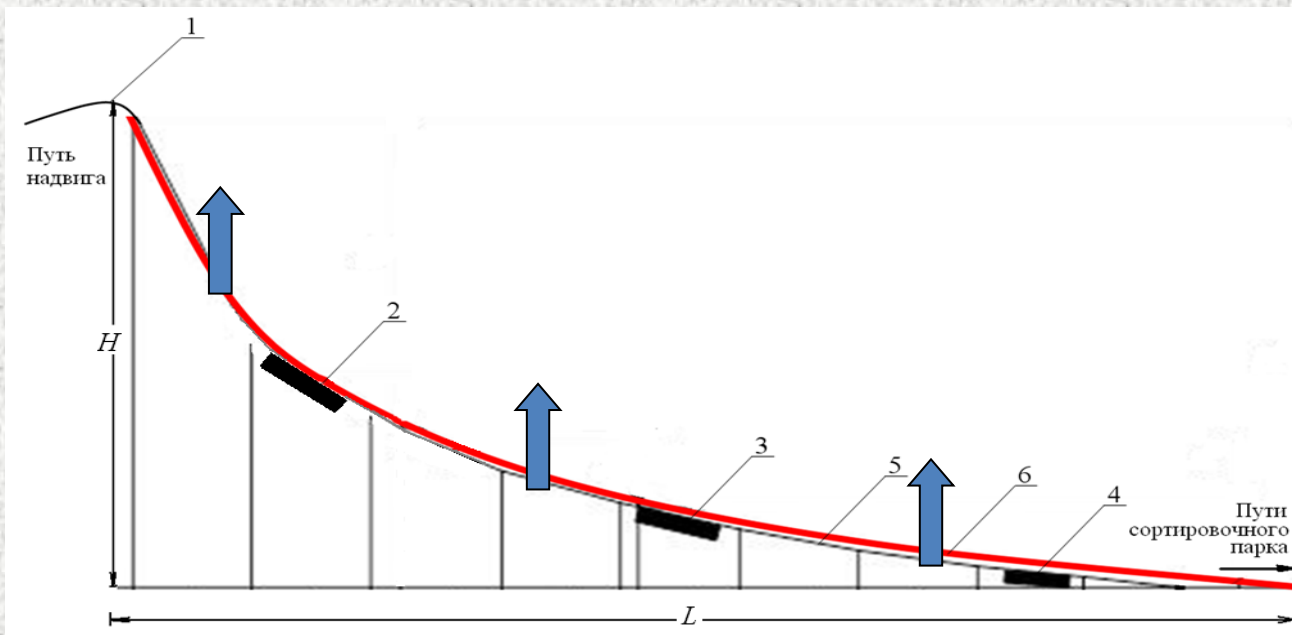
Схематичное визуальное представление



Трехмерная информационно-физическая  
реконструкция

# МОДЕЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ КАК ОБЪЕКТА РЕКОНСТРУКЦИИ ПРОЦЕССА РОСПУСКА ВАГОНОВ

Горка как объект, воспринимающий внешнюю нагрузку  
(рецептивный объект моделирования)



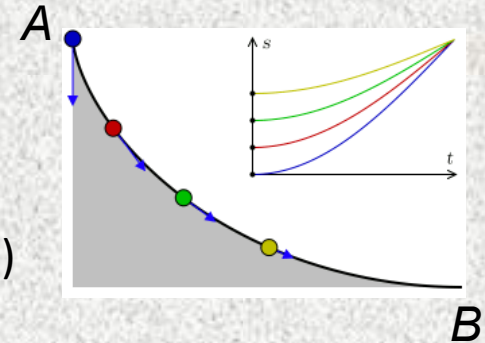
Продольный профиль спускной части сортировочной горки:

1 – горб горки; 2-4 – тормозные позиции замедлителей;

5 – реальный профиль скатывания вагонов; 6 – теоретическая кривая скатывания

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ УРАВНЕНИЯ КРИВЫХ СКАТЫВАНИЯ ТЕЛ С ИМИТИРУЮЩЕЙ СОРТИРОВОЧНУЮ ГОРКУ ПОВЕРХНОСТИ

**Кривая наискорейшего спуска:** среди плоских кривых, соединяющих точки  $A$  и  $B$ , найти такую кривую, двигаясь по которой точка с массой под действием силы тяжести, достигнет  $B$  за кратчайшее время (задача Иоганна Бернулли)



$$\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 = \frac{2r-y}{y}$$

Кривая 4-го порядка (брахистохрона, таутохрона, циклоида)

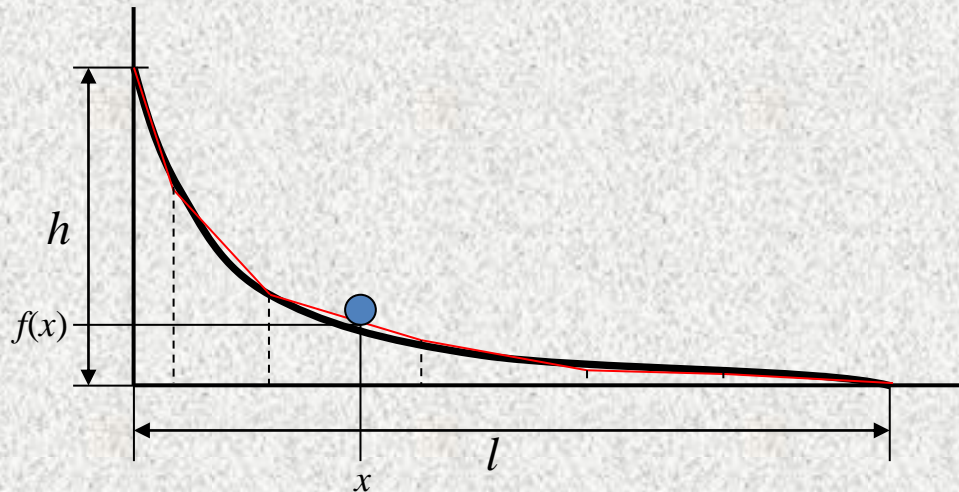
Уравнение в декартовых координатах

$$x = r \arccos \frac{r-y}{r} - \sqrt{2ry - y^2}$$

Параметрические уравнения кривой

$$\begin{aligned} x &= rt - r \sin t \\ y &= r - r \cos t \end{aligned}$$

## АППРОКСИМАЦИЯ ЦИКЛОИДЫ КРИВЫМИ НИЗКИХ ПОРЯДКОВ



Исходные данные для аппроксимации:

$V_{\text{над}} = 1,7 \text{ м/с}$ ,  $V_{\text{max}} = 8 \text{ м/с}$ ,  
 $m = 22-80 \text{ т}$ ,  $h = 1,5-4,0 \text{ м}$ ,  
 $l = 280-400 \text{ м}$ ,  $I_{\text{отц}} = 6 \text{ с}$ ,  
 рекомендуемые участки  $(i, l)$   
 для горок различной мощности

- параболическая

$$f(x) = \frac{h}{2} + \frac{pl}{2h} - \sqrt{px + \left(\frac{h}{2} - \frac{pl}{2h}\right)^2} \quad \begin{matrix} p = 0,025 \text{ (ГММ)}, \\ p = 0,07 \text{ (ГСМ, ГБМ)} \end{matrix}$$

- гиперболическая

$$f(x) = \frac{ph(l-x)}{l(x+p)} \quad \begin{matrix} p = 10 \text{ (ГММ)}, \\ p = 30-50 \text{ (ГСМ, ГБМ)} \end{matrix}$$

- кубическая парабола

$$f(x) = a(x-l)^3 + b(x-l)^2 + \left(bl - al^2 - \frac{h}{l}\right)(x-l) \quad \begin{matrix} a = -439 \cdot 10^{-10}, \\ b = 201,7 \cdot 10^{-7} \end{matrix}$$

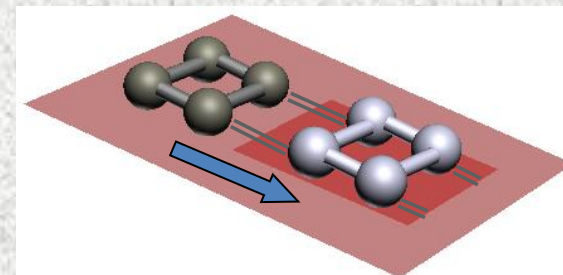
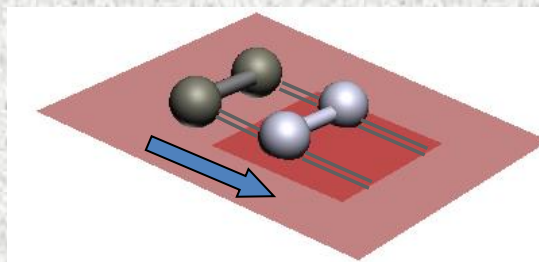
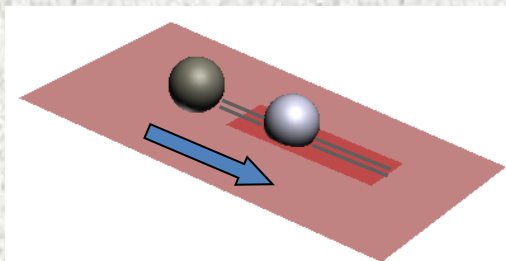
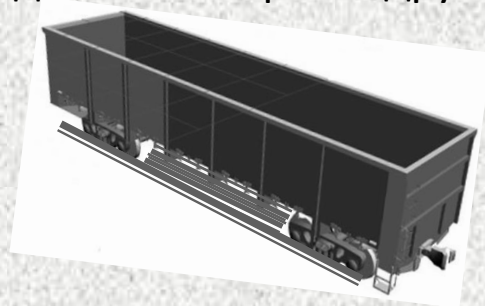
- экспоненциальная

$$f(x) = \frac{h(a^x - a^l)}{1 - a^l} \quad a = 0,985$$

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В МОДЕЛИ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ ИНЕРЦИОННЫХ АНАЛОГОВ КОЛЕСНЫХ ПАР И НИЗКОУПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОВЕРХНОСТИ СКАТЫВАНИЯ ТЕЛ

Физические аналогии тормозящих воздействий

1. Защемления реборды колеса вагона в шине замедлителя;
2. Движения в вязкой среде имитирующих тел (шара, шарнирных соединений шаров и других репродуцирующих элементов)



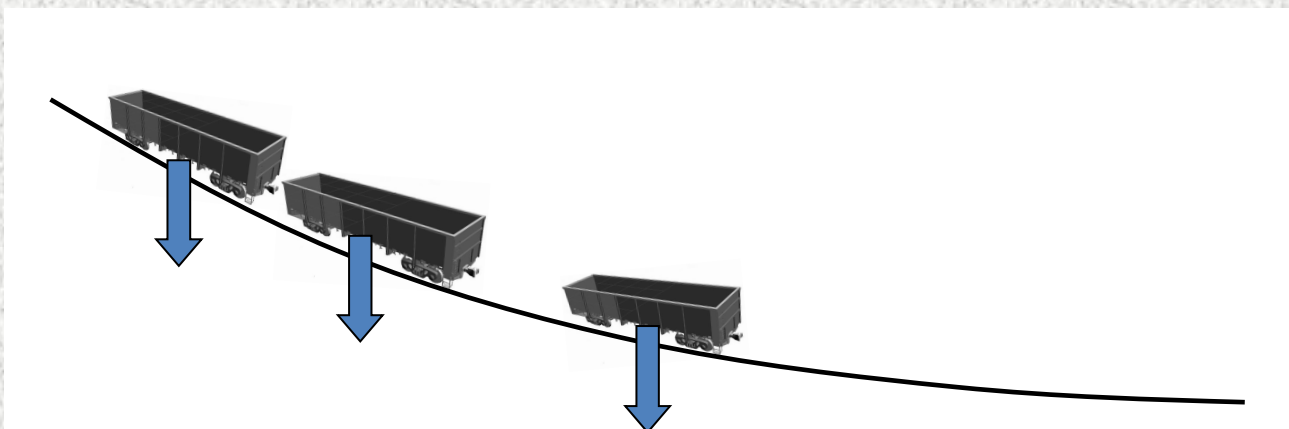
Шар как объект модельной системы трансформируется в определенный ряд формообразований с постепенным приближением к физически сложной многокомпонентной оболочке железнодорожного подвижного состава с упруго и неупруго деформируемыми конструктивными элементами кузова, тележки и ударно-тяговых устройств.

## **ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ:**

**Определить расчетные параметры динамической системы интервального регулирования «Поверхность скатывания – тела скатывания» с обеспечением условия циклоиды по минимальному времени скатывания**

# МОДЕЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СОРТИРОВОЧНУЮ ГОРКУ

Вагоны как объекты, передающие нагрузку  
(эфферентные объекты моделирования)



Окружение горки как влияющие на горку активные и пассивные источники  
(фоновые объекты)

Электромагнитное излучение, вибрация,  
атмосферные осадки, механические помехи,  
температурные деформации, отказ устройств



# ФОРМИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ

Объектная модель → Ситуативная модель

Критерии адекватности работы модели сортировочной горки

- **визуальный аспект (изоморфная модель)**
  - степень визуального подобия модели и прототипа;
  - субъективность восприятия информационных реконструкций
- **физический аспект (изофункциональная модель)**
  - модельная физика процессов
  - влияние статических и динамических фоновых объектов;





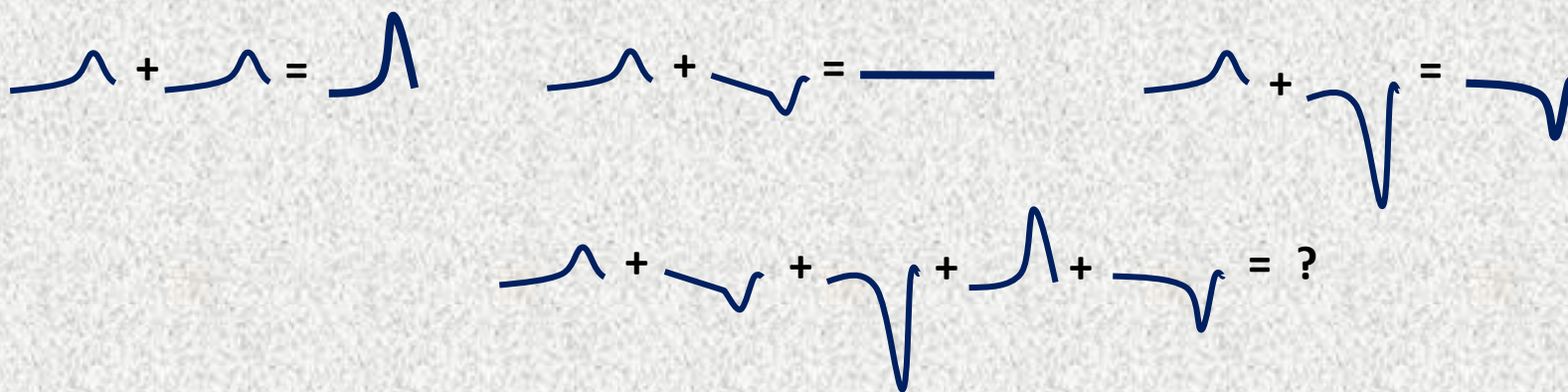
# ОБЩИЕ УСЛОВИЯ АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ

Учет влияния факторов:

- особенности конструкции вагонов;
- состояние путей и стрелочных переводов на горке;
- состояние подвижного состава;
- особенности скатывания отцепов различной массы и длины;
- изменение скорости надвига состава на горку;
- особенности воздействия тормозящего усилия замедлителей на различные отцепы;
- реальный план горочных путей и профиль скатывания вагонов;
- человеческий фактор (является ли конструктом модельной реставрации?)

## ПЕРЕМЕННАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ФАКТОРОВ

Факторная суперпозиция



↑ ускорение  
↓ замедление

Скорость движения отцепов

# МОДЕЛЬНОЕ ПРОТОТИПИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ И ПРОЦЕССОВ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ

10

Задача создания информационного двойника сортировочной горки



Информационная копия и реплика прототипа

Адекватное подобие моделирующих агентов и моделированных репродукций

Верифицированный репликат

Функционирование реплицированных объектов модели

Адаптивная техническая система  
включает компенсирующий механизм,  
переводящий **множество процессных вариаций**  $\{P_f\}$   
в счетное, на несколько порядков меньшее по мощности  
**множество конечных состояний**  $\{P_s\}$

$$\frac{\{P_f\}}{\{P_s\}} = 100 \dots 1000$$

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ

Достигаемые цели моделирования горочных процессов

1. Информационная поддержка принятия управленческих и проектных решений по текущему содержанию путей и реконструкции горки на основе актуализированной информации о плане и профиле горочных путей
2. Создание инструмента вариативной реконструкции процесса расформирования поездов с системной интеграцией данной модели по различным задачам управления вагонопотоками на станции
3. Повышение безопасности роспуска вагонов, сохранности подвижного состава, максимального использования наличной перерабатывающей способности горочных устройств

**Математические рассуждения не способны создать физику..  
Они должны заимствовать свой материал из тех наблюдений, которые уже имеются...**  
Ф. Розенберг (1934 г.)

**Наилучший способ создания новой теории – угадывать уравнения,  
не обращая внимание на физические модели или физическое объяснение.**  
Р. Фейнман (1976 г.)

**Благодарю за внимание!**