

УДК 532.5:004.94

*Н. Л. РЫЧАК, Н. Н. КИЗИЛОВА*

*Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, Харьков, Украина*

## **МЕХАНИЧЕСКАЯ НАГРУЗКА И ПОВРЕЖДЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ГОРОДСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПРИ ШТОРМОВОМ ВЕТРЕ**

Глобальные изменения климата привели к повышению среднегодовой температуры воздуха и связанными с ним изменениями температуры и скорости глобальных океанических течений, генерации быстрых «волн тепла», снижению среднего уровня осадков при росте интенсивности локальных ливней и снегопадов, появлению внезапных штормовых ветров и торнадо. Все это повышает требования к механической прочности и штормоустойчивости городской застройки и инфраструктуры, что связано не только с новыми материалами и технологиями, но и с аэромеханическим дизайном городских территорий. В работе приведен краткий обзор предлагаемых подходов и приведены примеры решения соответствующих задач с помощью метода конечных элементов, реализованного в пакете прикладных программ ANSYS Fluent 2021R2. Обсуждаются возможности снижения механической нагрузки на городские здания с помощью модификаций геометрии застройки.

**Ключевые слова:** ветровая нагрузка, математическое моделирование, напряженно-деформированное состояние, разрушение конструкций.

**Введение.** Глобальные изменения климата, постепенно происходящие в последние годы за счет природных и антропогенных факторов, привели к повышению среднегодовой температуры атмосферы, испарению воды из океанов, увеличению температуры и солености рек, озер, морей, ускорению таяния глетчеров Антарктиды и Гренландии. Это вызывает внезапные изменения давления и температуры, повышение скорости ветра, количества осадков, отрицательно влияющих как на здоровье человека, так и на существование целых видов животных и растений, не приспособленных к новым природным условиям [1]. Значительную роль в прогнозировании неблагоприятных атмосферных явлений и разработке мер предупреждения играет математическое моделирование как на уровне локальных территорий и речных систем [2, 3], так и на уровне стран, земель, материков и планеты в целом. Особенно велико значение исследования влияния резких изменений температуры, давления и шквальных ветров на территориях городов, в которых сейчас проживает более 50 % населения Земли, а в 2050 г. этот показатель прогнозируется на уровне 70 % [1].

В работе представлен краткий обзор современных математических моделей динамики жидкости, которые позволяют анализировать влияние сильного ветра на городские технические сооружения и массивы деревьев, выполнены расчеты для конкретных участков городской застройки и их геометрических моделей с использованием данных сервиса GoogleEarth.

Аэродинамика играет фундаментальную роль в исследовании ветровых нагрузок, начиная с пионерских исследований [2], где было показано, что вызванную ветром статическую и динамическую механическую нагрузку можно определить путем сочетания местной «розы ветров», локального ветра, связанного с топографией местности, структурных аэродинамических характеристик (плотность, высота и форма построек, рисунок 1) и структурных динамических свойств (распределения массы, жесткости, коэффициентов амортизации, локальной «шероховатости» приповерхностного слоя воздуха над городской застройкой).

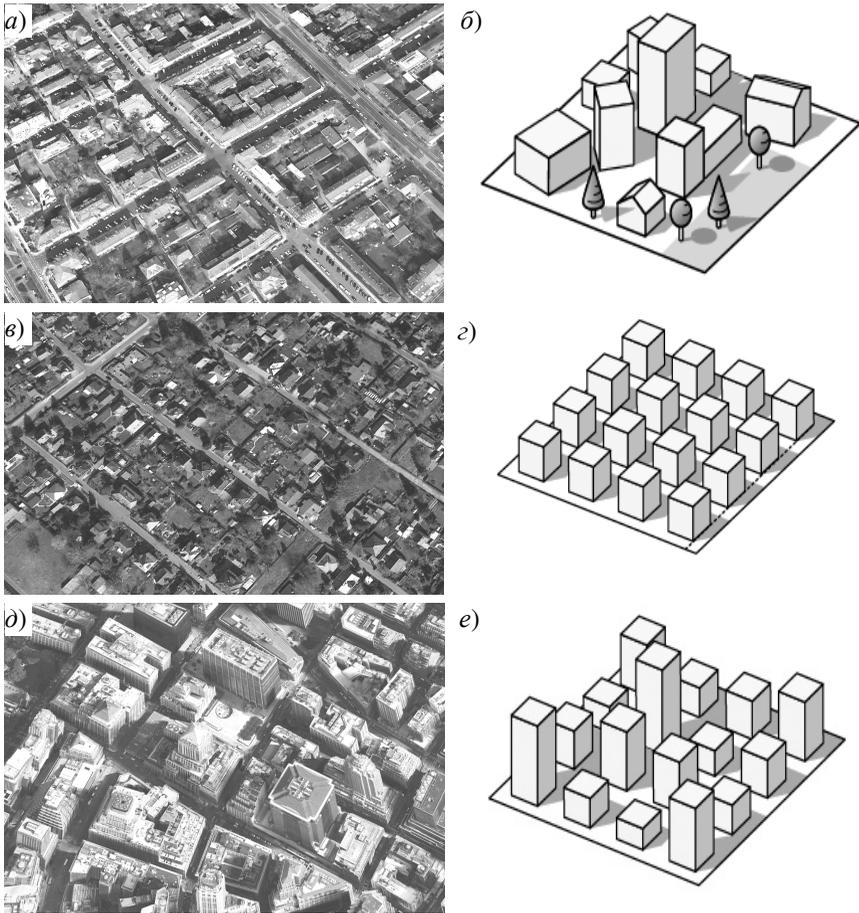


Рисунок 1 – Основные типы городской застройки: старый город (а), пригород (в), сити-центр (d) и их геометрические модели (б, з, е)

В результате сочетания рассматриваемых факторов (цепь Девенпорта) можно получить силы, действующие в данной местности с учетом геометрии городской застройки. Этот подход был использован в качестве базовой аэродинамической теории для ветротехники [3], нахождения механических нагрузок на малоэтажные [4] и высокие призматические дома [5, 6], включая наиболее критические случаи, когда направление штормового ветра перпендикулярно одной из вертикальных граней здания. Рассматривались приближения линейной упругой [7] и нелинейной неупругой деформации [8], а также стационарной и переменной ветровой нагрузки [9]. Более сложные модели учитывают не только потоки воздуха, но и конвективный перенос осадков (дождь, снег), влажность воздуха, солнечную радиацию и загрязнение [10], включая сильные дожди с ветром [11].

Ветровая нагрузка является случайным процессом, поэтому при ее моделировании часто используются спектральные методы в частотной области и теория случайных вибраций с возможностью использования результатов измерений в аэродинамической трубе с различными режимами течений воздуха. Для учета неожиданных порывов ветра используют различные аппроксимации функции плотности вероятности скорости ветра [10]. Данные измерений на поверхностях зданий и их моделях в аэродинамической трубе, в симуляторах торнадо (tornado simulators) и порывистых ветров (microburst simulators) показали, что возможные свойства ветрового давления могут сильно отличаться для различных геометрий зданий и режимов ветра [10, 11]. Значительное влияние оказывают турбулентные вихри, а также вихревые следы, возникающие вне каждого дома и взаимодействующие между собой, в том числе синергетически. Нелинейные взаимодействия ветровых следов за постройками могут приводить к формированию когерентных (в пространстве и по времени) структур, что ведет к значительному усилению ветровой нагрузки [12]. Как показали исследования, вихревой след дома может иметь вид одной пары противоположно вращающихся вихрей (дипольный след) или двух пар (квадрупольный след), переходы между которыми происходят с изменением направления и силы ветра (рисунок 2). Разрушительная сила ветра часто связана со срывом крыш, а ее величина сильно зависит от высоты и формы крыши [13]. За счет модификации геометрии городской застройки можно достичь эффекта защиты от вихрей, которые вызваны сильным порывистым ветром [14].

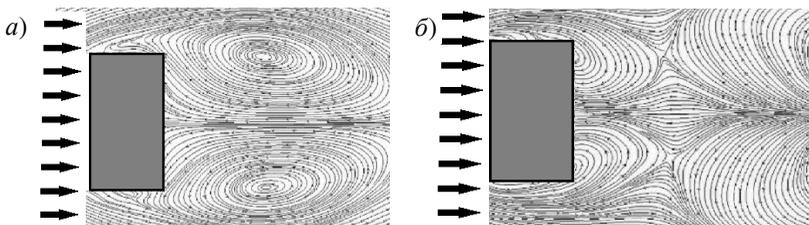


Рисунок 2 – Вихревые следы в воздухе за домом в виде одной (а) и двух пар (б) вихрей

В последние годы в связи с повышением цен на землю и прогрессом строительных технологий мировым трендом стало строительство высотных и сверхвысотных домов, уязвимых к ветровой нагрузке из-за своей высоты и гибкости. К ветровой вибрации они стали еще более восприимчивыми из-за использования легких строительных материалов, что оказалось значительной проблемой для проектировщиков. Вибрация может привести к повреждению конструкции и вызвать дискомфорт у жильцов. Невозможность ее ограничить при экстремальных ветровых штормах и торнадо может привести к катастрофическим последствиям [15, 16].

**Математическая постановка задачи.** В соответствии с классической теорией динамики общий вид уравнения импульсов для механической системы [8]

$$[M] \frac{d^2 \bar{\theta}}{dt^2} + [C] \frac{d \bar{\theta}}{dt} + [N] \bar{\theta} = \bar{F}(t, \bar{r}),$$

где  $\bar{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \theta_3)^T$  – вектор деформаций;  $T$  – операция транспонирования;  $[M]$ ,  $[C]$  и  $[N]$  – матрицы масс, коэффициентов сопротивления и жесткости;  $\bar{F}(t, \bar{r})$  – ветровая нагрузка.

Для оценки влияния ветровой загрузки используются коэффициенты подъемной силы  $C_L = F_L / qA$ , трения  $C_D = F_D / qA$  и момента сил  $C_M = F_M / qA$ , где  $F_L$  и  $F_D$  – интегралы нормальных и тангенциальных компонент сил, которые действуют на поверхность сооружения;  $F_M$  – соответствующий момент сил;  $A$  – характерное поперечное (миделево) сечение сооружения;  $q = \rho v^2$ ,  $\rho$  и  $v$  – плотность и скорость движения воздуха.

Наиболее популярными для расчетов ветровых и температурных нагрузок на городские сооружения являются методы конечных/граничных элементов/объемов, которые позволяют производить подробные численные расчеты на сложных геометриях (см. рисунок 1) с использованием различных моделей турбулентных течений, а именно  $k$ - $\epsilon$  модели Колмогорова и ее модификаций, Steady Reynolds Averaged Navier – Stokes, Large Eddy Simulation и Detached Eddy Simulations [17–20].

В данной работе исследуется влияние ветровой нагрузки на жилые массивы с растительными насаждениями разной высоты, а также способов расположения городских застроек на территории с известной «розой ветров» (рисунок 3, а, б). Схема расположения с открытого ресурса Google Maps размещалась в модели аэродинамической трубы в виде параллелепипеда с размерами 30×300×300 м (высота, ширина и длина соответственно). Размер сетки составлял 10×10 см с использованием функции inflation ко всем жестким поверхностям. Рассматривались различные последовательные комбинации расположения зданий по высоте (рисунок 3 в, г).

Течение жидкости вокруг обтекаемого тела в случае ламинарного течения ( $Re < 1200$ ) моделировалось уравнениями Навье – Стокса

$$\operatorname{div}(\vec{v}) = 0, \quad \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}, \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \vec{v},$$

Где  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости.

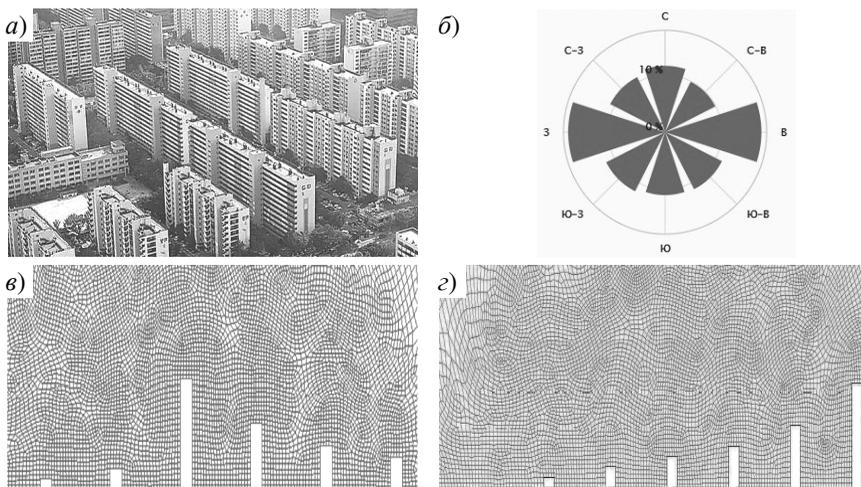


Рисунок 3 – Участок городской застройки (а) с известным распределением ветровой нагрузки (б) и геометрическая модель с немонотонным (в) и монотонным (г) по высоте расположением зданий

Турбулентное течение анализировалось с применением уравнений  $k-\omega$  SST модели, которая используется при аэродинамических расчетах [18]:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + (\bar{u}, \nabla) \bar{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \bar{u} - \overline{u' u'};$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + (\bar{u} \nabla)(\rho k) = \operatorname{div}((\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k) + P - \beta^* \rho \omega k;$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + (\bar{u} \nabla)(\rho \omega) = \operatorname{div}((\mu + \sigma_\omega \mu_t) \nabla \omega) + \frac{\alpha \omega}{k} P - \beta \rho \omega^2,$$

где  $\mu_t = \rho k / \omega$  – турбулентная вязкость;  $P = \tau_{ik} du_i / dx_k$ ,  $\tau_{ik}$  – тензор вязких напряжений;  $\alpha = 5/9$ ,  $\beta^* = 0,09$ ,  $\beta = 0,075$ ,  $\sigma_k = 0,5$ ,  $\sigma_\omega = 0,5$ .

Численные расчеты проводились в пакете ANSYS Fluent 2021 R2 (ansys.com/academic). Значения плотности  $\rho$  и вязкости  $\mu$  воздуха (air) выбраны из базы данных Fluent database. Расчеты значений  $k$ ,  $\omega$ , и  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$  проводились по численным схемам 2-го порядка точности, а значений давления – 1-го порядка. Градиенты функций рассчитывались по схеме least-square method. Итерации производились до достижения точности  $10^{-4}$ . Качество сетки контролировалось с помощью опции  $Y^+$  пакета Fluent. Сетка измельчалась до достижения соответ-

ствия последовательных вычислений с точностью  $\varepsilon' = 10^{-2}$ . Количество конечных элементов финальной сетки составляло  $\sim 2 \cdot 10^6$ . На входе (inlet) задавалась постоянная скорость ветра  $v_x = 5\text{--}30$  м/с, что соответствует ветру от слабого до штормового, а на выходе (outlet) – давление  $p = 0$ .

Результаты расчетов гидродинамического давления в потоке воздуха, действующего на стены домов, приведены на рисунке 4. Если стены всех домов ориентированы нормально к направлению воздуха, на передние стены первого ряда действует максимальная сила. Значительно меньшие силы приложены к стенам второго и последующих рядов (рисунок 4, *а*). При ромбоэдрическом порядке расположения зданий (рисунок 4, *б*) стены всех конструкций испытывают значительно меньшее силовое воздействие. Поскольку на местности всегда имеются несколько главных направлений ветра (рисунок 3, *б*), то расположения зданий на рисунке 4, *а*, *б* могут соответствовать ромбоэдрическому и нормальному расположению зданий при диагональном направлении ветра.

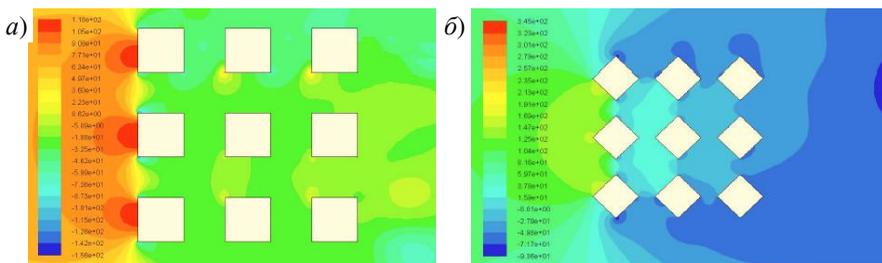


Рисунок 4 – Контурные графики распределения давления в потоке воздуха при нормальном (*а*) и угловом (*б*) по направлению к ветру расположениях зданий

Дизайн застроек в новых микрорайонах должен проводиться как на основе учета различной вероятности ветров разных направлений (рисунок 3, *б*), так и с учетом будущих изменений климата и вызванных ими усилением скорости ветра до штормовых в некоторых направлениях, в том числе необычных, статистически неожиданных, а также случайными высокоамплитудными осцилляциями  $\vec{F}(t, \vec{r})$ . Предварительные расчеты на 3D-моделях новых микрорайонов позволяют минимизировать риски повреждения конструкций, деревьев и вреда здоровью и жизни жителей.

На рисунке 5 приведены векторные графики скорости ветра, обтекающего дома, и пространство между ними. Высокий дом, который находится в первых рядах по отношению к направлению ветра, принимает на себя главное силовое воздействие, которое для сильного шквального ветра может оказаться разрушительным для крыши, а также окон и балконов верхних этажей (рисунок 5, *а*). Расположение в первых рядах нескольких зданий средней этажности приводит к более равномерному распределению силы ветра на них, а также меньшему силовому воздействию на наиболее высокие

дома (рисунок 5, б). В пространстве перед высоким домом образуются мощные циркуляции ветра (вторичные течения воздуха между домами) (рисунок 5, а, б), которые тоже могут оказать негативное силовое воздействие на конструкции, растения и людей.

Более детально линии тока и вихревые зоны между домами приведены на рисунке 6. Для случая расположения (рисунок 5, а) перед самым высоким домом находится большая зона относительно слабой циркуляции (рисунок 6, а), в то время как для расположения перед вторым домом слева (см. рисунок 5, б, в) образуется небольшая зона более мощной циркуляции (рисунок 6, б, в). В первом случае эта зона распространяется на большое расстояние и выполняет функции усиления вентиляции, особенно в жаркую погоду, а во втором случае локальная зона циркуляции при слабом ветре способствует локальному накоплению загрязнений в воздухе и почве, а при сильном может стать опасной.

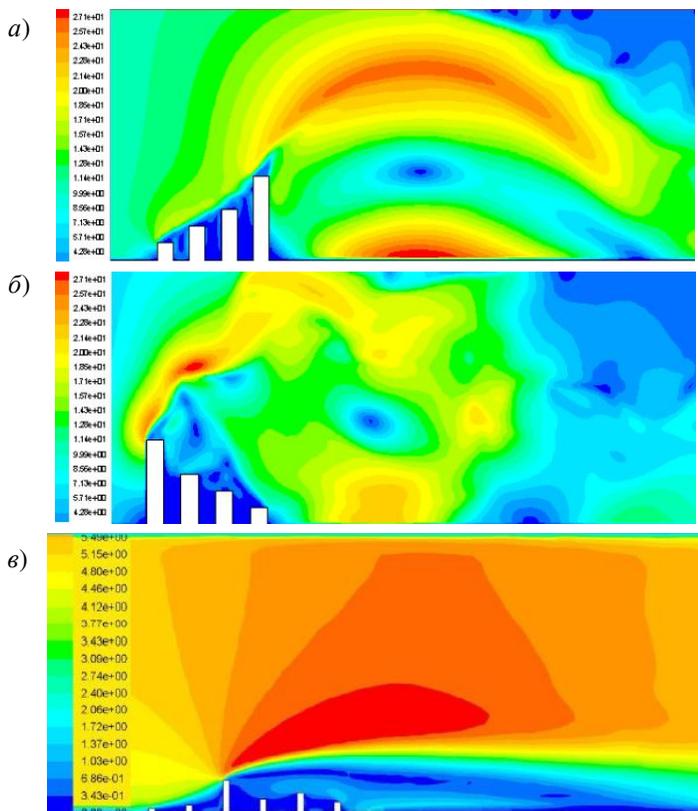


Рисунок 5 – Векторные графики скорости потоков воздуха при различных видах расположения наиболее высоких зданий на территории района

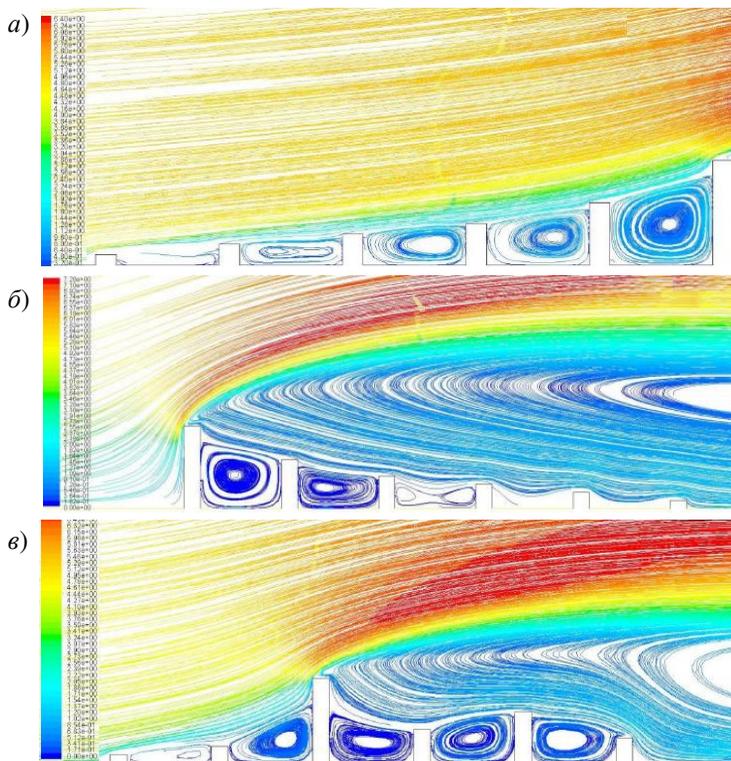


Рисунок 6 – Графики линий тока воздуха для разных типов расположения зданий

Второй цикл расчетов производился на тех же геометриях для предельных условий  $v_x = 20 \dots 30$  м/с, что соответствует штормовым ветрам. Оценки показали, что ответное силовое влияние при этом возрастает в 5,7–9,8 раз. При наличии в центре микрорайона торнадо с диаметрами (на уровне поверхности земли)  $d = 2 \dots 6$  м силовое воздействие возрастает еще на один порядок за счет сдвиговых напряжений и турбулентных колебаний динамического давления. Для обнаружения возможного разрушительного действия такого ветра на сооружения и растения требуются данные о механических свойствах соответствующих технических и природных материалов.

**Выводы.** Результаты расчетов показывают, что для любых способов расположения зданий микрорайона существует сложная картина взаимодействия потоков, отражающихся от стен высочайших домов, с отрывными течениями между домами и над крышами менее высоких зданий. Компьютерное моделирование показало, что наиболее опасно расположение, при котором высокие дома размещены по нормали к направлению доминантных ветров, а расстояния между домами малы для обеспечения достаточной циркуляции воздуха.

Нежелательным следует считать композиции 8–10-этажных домов с высокой аркой между ними, поскольку ветер даже средней силы (6–9 м/с) вызывает значительные потоки, которые мешают движению людей и генерируют подъемные силы, вызывающие дополнительные динамические нагрузки на сооружения. Подобные композиции должны иметь дополнительные арки, как это принято для более высоких построек (15 этажей и выше) [4, 5]. Поскольку постепенное потепление климата ведет к усилению быстрых волн тепла, увеличению скорости сильных, порывистых и шквальных ветров, на основе численных расчетов должны разрабатываться соответствующие меры противодействия. Для новых микрорайонов и домов должны анализироваться высота и ориентация домов друг относительно друга и по отношению к направлению доминирующего и дополнительных ветров на данной местности. Для существующих микрорайонов соответствующие решения могут включать густые растительные насаждения, крыши специальной формы, щиты и другие варианты.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 How to incorporate climate change into modelling environmental water outcomes: a review / A. John [et al.] // *Journal of Water and Climate Change*. – 2020. – Vol. 11, is. 2. – P. 327–340.

2 **Davenport, A. G.** A Statistical approach to the treatment of wind loading on tall masts and suspension bridges : Doctoral Thesis / A. G. Davenport. – Bristol : University of Bristol, 1961. – 237 p.

3 **Ciampoli, M.** Performance-based wind engineering: Towards a general procedure / M. Ciampoli, F. Petrini, G. Augusti // *Structural Safety*. – 2011. – Vol. 33, is. 6. – P. 367–378.

4 Fragility assessment of light-frame wood construction subjected to wind and earthquake hazards / B. Ellingwood [et al.] // *Journal of Structural Engineering*. – 2004. – Vol. 130, is. 12. – P. 1921–1930.

5 **Smith, M. A.** A Monte Carlo based method for the dynamic “fragility analysis” of tall buildings under turbulent wind loading / M. A. Smith, L. Caracoglia // *Engineering Structures*. – 2011. – Vol. 33, is. 2. – P. 410–420.

6 Cyber-physical design and optimization of tall building dynamics using aeroelastic wind tunnel modeling / P. L. Fernandez-Caban [et al.] // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 2020. – Vol. 198. – 14 p.

7 **Spence, S. M. J.** Performance-based design and optimization of uncertain wind-excited dynamic building systems / S. M. J. Spence, A. Kareem // *Engineering Structures*. – 2014. – Vol. 78. – P. 133–144.

8 **Cui, W.** A fully-coupled generalized model for multi-directional wind loads on tall buildings: A development of the quasi-steady theory / W. Cui, L. Caracoglia // *Journal of Fluids and Structures*. – 2018. – Vol. 78. – P. 52–68.

9 **Chuang, W.** A performance-based design framework for the integrated collapse and non-collapse assessment of wind excited buildings / W. C. Chuang, S. M. J. Spence // *Engineering Structures*. – 2017. – Vol. 150. – P. 746–758.

10 **Kubilay, A.** Coupling of physical phenomena in urban microclimate: A model integrating air flow, wind-driven rain, radiation and transport in building materials / A. Kubilay, D. Derome, J. Carmeliet // *Urban Climate*. – 2017. – Vol. 24. – P. 398–418.

11 **Wang, H.** Numerical simulations of wind-driven rain on building facades under various oblique winds based on Eulerian multiphase model / H. Wang, X. Hou, Y. Deng // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2015. – Vol. 142. – P. 82–92.

12 **Yang, L.** Probabilistic modeling of wind pressure on low-rise buildings / L. Yang, K. R. Gurley, D. O. Prevatt // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2013. – Vol. 114. – P. 18–26.

13 **Hou, F.** Aeroelastic model tests to study tall building vibration in boundary-layer and tornado winds / F. Hou, P. P. Sarkar // Engineering Structures. – 2020. – Vol. 207. – Paper 110259. – 22 p.

14 Coherent structures and wind force generation of square-section building model / F. Wang [et al.] // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2019. – Vol. 188. – P. 175–193.

15 **Xing, F.** Study on localised wind pressure development in gable roof buildings having different roof pitches with experiments, RANS and LES simulation models / F. Xing, D. Mohotti, K. Chauhan // Building and Environment. – 2018. – Vol. 143. – P. 240–257.

16 **Le, T.-H.** Modeling vortex-shedding effects for the stochastic response of tall buildings in non-synoptic winds / T.-H. Le, L. Caracoglia // Journal of Fluids and Structures. – 2016. – Vol. 61. – P. 461–491.

17 Evaluation of CFD Simulation using various turbulence models for wind pressure on buildings based on wind tunnel experiments / B. Lia [et al.] // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 121. – P. 2209–2216.

18 **Liu, J.** CFD simulation of the wind environment around an isolated high-rise building / J. Liu, J. Niu // Building and Environment. – 2016. – Vol. 96. – P. 91–106.

19 **Mohotti, D.** Comparison of Reynolds Averaging Navier-Stokes (RANS) turbulent models in predicting wind pressure on tall buildings / D. Mohotti, K. Wijesooriya, D. Dias-da-Costa // Journal of Building Engineering. – 2019. – Vol. 21. – P. 1–17.

20 **Zhang, Y.** An experimental study on wind loads acting on a high-rise building model induced by microburst-like winds / Y. Zhang, P. Sarkar, H. Hu // Journal of Fluids and Structures. – 2014. – Vol. 50. – P. 547–564.

*N. L. RYCHAK, N. N. KIZILOVA*

*V. N. Karazin Kharkov National University, Kharkov, Ukraine*

## **MECHANICAL LOAD AND DAMAGE OF URBAN INFRASTRUCTURE ELEMENTS AT A STORM WIND**

Global climate changes have led to an increase in the average annual air temperature and associated changes in the temperature and velocities of global ocean flows, the generation of fast "heat waves", a decrease in the average precipitation level accompanied by an increase in the intensity of local rainfalls and snowfalls, the appearance of sudden storm winds and tornadoes. All these factors increase the requirements for the mechanical strength and storm resistance of urban buildings and infrastructure, which is associated not only with new materials and technologies, but also with the aeromechanical design of urban areas. The paper provides a brief overview of the proposed approaches and some examples of solving the corresponding mechanical problems using the finite element method implemented in the ANSYS Fluent 2021R2 software. Possibilities of reducing the mechanical stress on urban buildings by means of the building geometry modifications are discussed.

**Keywords:** wind load, mathematical modeling, stress-strain state, structural failure.

Получено 28.11.2021