

Численное моделирование динамического отклика башни «Эволюция» при ветровом воздействии с учетом застройки и разрешением турбулентности

Сергей Гургенович Саиян¹, Артемий Викторович Васильев²

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Российский государственный университет нефти и газа (Национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина (РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Существующие нормативные методики не всегда адекватно описывают динамический отклик высотных зданий при ветровых воздействиях, особенно с учетом сложной геометрии и взаимодействия с окружающей застройкой. В данном исследовании разработана методика численного моделирования динамического отклика высотных зданий при ветровых воздействиях, учитывающая аэродинамическую интерференцию и разрешающая спектр турбулентных пульсаций на основе нестационарного CFD-моделирования и прямого динамического конечно-элементного анализа. Показан пример использования данной методики и численные результаты моделирования динамического отклика при разных углах атаки ветра башни «Эволюция», входящей в состав ММДЦ «Москва-Сити».

Материалы и методы. Методика разделяет задачу на два этапа: нестационарное аэродинамическое моделирование и расчет динамической реакции конструкции. Для этого разработаны аэродинамические модели комплекса зданий ММДЦ «Москва-Сити» и конечно-элементная модель башни «Эволюция». Для аэродинамического моделирования применена гибридная модель турбулентности SBES, позволяющая разрешать спектр турбулентных пульсаций. Динамический отклик здания вычисляется с использованием прямого динамического конечно-элементного анализа на основе неявного метода Ньюмарка.

Результаты. Результаты аэродинамического моделирования представлены в виде поэтажных распределений аэродинамических сил и моментов для разных направлений ветра. Вычисленный на их основе динамический отклик показал существенное влияние аэродинамической интерференции на поведение здания. Сравнение с расчетами по нормативной методике СП 20.13330.2016 продемонстрировало консервативность последних и необходимость более точных методов расчета.

Выводы. Предложенная методика позволяет более точно прогнозировать динамический отклик высотных зданий при ветровых воздействиях, что имеет важное значение для обеспечения механической безопасности и динамической комфортности. Рекомендуется внедрение данной методики в практику расчетных обоснований высотных зданий, что даст возможность оптимизировать конструктивные решения, повысить механическую безопасность и увеличить экономическую эффективность высотного строительства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: высотные здания, ветровые воздействия, аэродинамика зданий и сооружений, CFD-моделирование, динамический отклик, турбулентные пульсации, башня «Эволюция», ММДЦ «Москва-Сити», численное моделирование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Саиян С.Г., Васильев А.В. Численное моделирование динамического отклика башни «Эволюция» при ветровом воздействии с учетом застройки и разрешением турбулентности // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 2. С. 246–279. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.246-279

Автор, ответственный за переписку: Сергей Гургенович Саиян, berformert@gmail.com.

Numerical Simulation of the Dynamic Response of the “Evolution” Tower under Wind Action Considering Surrounding Buildings and Turbulence Resolution

Sergey G. Saiyan¹, Artemiy V. Vasiliev²

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation;

² National University of Oil and Gas “Gubkin University”; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Existing normative methodologies do not always adequately describe the dynamic response of high-rise buildings under wind action, especially when considering complex geometry and interaction with surrounding developments.

In this study, a numerical simulation methodology for the dynamic response of high-rise buildings under wind action is developed, accounting for aerodynamic interference and resolving the spectrum of turbulent fluctuations based on unsteady CFD-modelling and direct dynamic finite element analysis. An example of using this methodology is shown, along with numerical results of modelling the dynamic response at different wind attack angles of the “Evolution” Tower, which is part of the Moscow International Business Centre “Moscow-City”.

Materials and methods. The methodology divides the problem into two stages: unsteady aerodynamic modelling and calculation of the dynamic response of the structure. Aerodynamic models of the building complex of the Moscow International Business Centre “Moscow-City” and a finite element model of the “Evolution” Tower were developed for this purpose. A hybrid turbulence model SBES was applied for aerodynamic simulation, allowing the resolving of the spectrum of turbulent fluctuations. The dynamic response of the building is calculated using direct dynamic finite element analysis based on the implicit Newmark method.

Results. The results of aerodynamic simulation are presented as floor-by-floor distributions of aerodynamic forces and moments for different wind directions. The calculated dynamic response based on these results showed a significant influence of aerodynamic interference on the building’s behaviour. Comparison with calculations using the normative methodology CP 20.13330.2016 demonstrated the conservatism of the latter and the need for more accurate calculation methods.

Conclusions. The proposed methodology allows for a more accurate prediction of the dynamic response of high-rise buildings under wind action, which is crucial for ensuring mechanical safety and dynamic comfort. It is recommended to implement this methodology in the practice of design justification for high-rise buildings, which will optimize structural solutions, enhance mechanical safety, and increase the economic efficiency of high-rise construction.

KEYWORDS: high-rise buildings, wind action, building aerodynamics, CFD-modelling, dynamic response, turbulent fluctuations, “Evolution” Tower, Moscow International Business Centre “Moscow-City”, numerical simulation

FOR CITATION: Saiyan S.G., Vasiliev A.V. Numerical Simulation of the Dynamic Response of the “Evolution” Tower under Wind Action Considering Surrounding Buildings and Turbulence Resolution. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(2):246-279. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.246-279 (rus.).

Corresponding author: Sergey G. Saiyan, berformert@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия количество высотных зданий в мире значительно увеличилось. Причины этого заключаются как в демографическом росте в крупных городах, так и стремлении к экономии пространства за счет вертикальной застройки. Эти строения, формирующие городской ландшафт, предъявляют новые требования к расчетам для обеспечения механической безопасности. В соответствии с данными Council of Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH)¹, количество высотных зданий неуклонно растет.

Ветровые воздействия служат одними из ключевых факторов, влияющих на проектирование и эксплуатацию высотных зданий [1–3]. С увеличением высоты здания возрастает ветровая нагрузка, что связано с особенностями распределения скоростей воздушных потоков на различных уровнях над землей. Ветер представляет собой сложный природный феномен, включающий в себя как средние, так и пульсационные компоненты, оказывающие динамическое воздействие на конструкции. Ветровые потоки вблизи поверхности земли обычно испытывают трение и препятствия, вызываемые различными объектами городской застройки, деревьями и рельефом. По мере того как воздушные потоки поднимаются выше, сопротивление этих объектов уменьшается, и скорость ветра возрастает. Это явление известно как профиль скорости ветра, при котором ветер становится сильнее на больших высотах. Для малоэтажных зданий влияние ветра обычно не критично, так как ветровые силы, действующие на них, относительно малы.

¹ CTBUH Year in Review: Tall Trends of 2019. The Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH). 2020.

Однако с ростом высоты здания ветровая нагрузка возрастает нелинейно. Ветер может вызывать существенные колебания и горизонтальные усилия на высотные здания, что создает необходимость учета этого фактора в проектировании [4–8].

Одной из ключевых особенностей ветрового воздействия на высотные здания является его динамическая природа. В отличие от статической нагрузки, такой как собственный вес конструкции или полезная нагрузка, ветер оказывает переменное давление на здание, что может вызывать динамическую реакцию. Для высотных зданий особенно опасны пульсационные компоненты ветрового воздействия, которые могут совпадать с собственными частотами здания и вызывать резонансные явления. При резонансе колебания конструкции усиливаются и могут достигать значительных величин, что потенциально может привести к повреждениям конструктивных элементов или вызвать дискомфорт для людей, находящихся внутри здания. Это особенно актуально для гибких конструкций высотных зданий, у которых собственные частоты колебаний могут совпадать с колебаниями воздушных потоков (частотой срыва вихрей).

Кроме того, геометрия здания и его архитектурные элементы также играют важную роль в его устойчивости к ветровым нагрузкам. Высотные здания с прямыми вертикальными стенами (прямоугольного сечения) по-разному взаимодействуют с воздушными потоками по сравнению со зданиями, имеющими сложную архитектурную форму. В случае таких высотных зданий, как башня «Эволюция», с ее характерной скручивающейся формой, ветер может создавать турбулентные завихрения и неравномерное распределение давления по поверхности здания.

Это усложняет расчет ветровых нагрузок и требует использования продвинутых методов численного моделирования или экспериментальных (натурных) исследований для точного предсказания динамического отклика.

Для высотных зданий также важно учитывать эффекты аэродинамической интерференции. В условиях плотной городской застройки здания влияют на воздушные потоки друг друга. Здания могут экранировать одно другое от ветра или, наоборот, усиливать ветровые нагрузки за счет концентрации воздушных потоков между сооружениями. Этот эффект, называемый аэродинамической интерференцией, может привести к усилению ветровых нагрузок на отдельные здания или их части, что делает проектирование в городской среде еще более сложной задачей. Так, в работе [9] исследована аэродинамическая интерференция комплекса Московского международного делового центра (ММДЦ) «Москва-Сити» при последовательном возведении зданий. На основе 256 расчетных случаев были определены средние и пульсационные суммарные аэродинамические силы и моменты в зависимости от хронологии возведения строений для каждого из зданий комплекса.

Все эти факторы ветрового воздействия вносят значительный вклад в напряженно-деформированное состояние (НДС) несущих и фасадных конструкций зданий и сооружений, что требует детального расчетного анализа и учета в процессе проектирования. Динамический вклад в НДС с увеличением высотности зданий и сооружений становится настолько существенным, что по своей интенсивности может превосходить даже сейсмические воздействия. На рис. 1

показаны соотношения относительной спектральной плотности мощности и частот (периодов) колебаний к приближенным интервалам частот собственных колебаний некоторых видов строительных конструкций. Из рис. 1 видно, что хоть сейсмическое воздействие более «мощное», чем ветровое, однако реализуется на более высоких частотах колебаний, что покрывает интервал наиболее энергоемкого спектра при частотах, близких к собственным частотам колебаний для нормальных по высоте зданий.

На рис. 1 ординаты представлены в безразмерной форме; спектр ветра вычислен для $\mu_{v10} = 20$ м/с и $S_{v10}^2 = 2400$ м²/с²; G — коэффициент, учитывающий шероховатость поверхности грунта и принимаемый обычно в пределах от 0,005 до 0,015; спектр землетрясения соответствует значениям $\mu_a = 0$ и $S_{v10}^2 = 0,38$ м²/с⁴.

Проблема исследования ветровой нагрузки и расчета сооружений на ветровые воздействия распадается на три крупные подзадачи⁴:

- изучение ветрового режима местности, основанное на использовании результатов метеорологических и климатологических исследований;
- оценка сил, вызываемых воздействием ветра на сооружение, которые изучаются на основе решений задач теоретической аэродинамики и данных экспериментальных исследований;
- определение реакции сооружения на ветровую нагрузку, основанное, как правило, на решении задач статики и динамики сооружений.

В рамках настоящего исследования будут рассмотрены вопросы, касающиеся второй и третьей подзадачи.

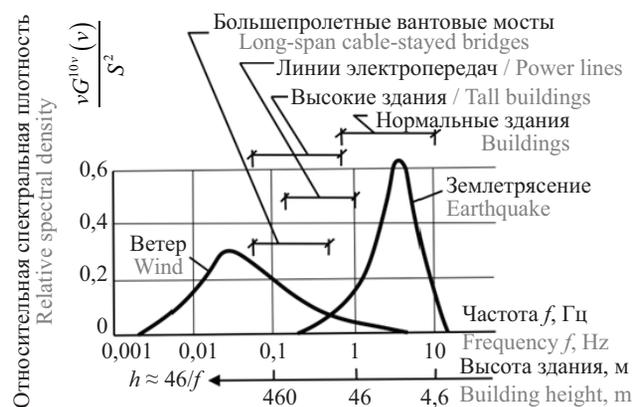


Рис. 1. Сопоставление спектральных плотностей мощности скорости ветра и ускорения грунта с частотами собственных колебаний основных типов сооружений^{2,3}

Fig. 1. Comparison of power spectral densities of wind speed and ground acceleration with natural vibration frequencies of main types of structures^{2,3}

² Ferry-Borges J., Castanheta M. Structural Safety. Lisbon : LNEC, 1971.

³ Аугусти Г., Баратта А., Кашиати Ф. Вероятностные методы в строительном проектировании / пер. с англ. Ю.Д. Сухова. М. : Стройиздат, 1988. 584 с.

⁴ Гордеев В.Н., Лантух-Лященко А.И., Пашинский В.А., Перельмутер А.В., Пичугин С.Ф. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / под общ. ред. А.В. Перельмутера. 3-е изд., перераб. М. : Изд-во АСВ, 2009. 528 с.

Реакция зданий и сооружений на ветровое воздействие состоит из средней (или осредненной за некоторый временной промежуток) и пульсационной составляющей, которая и представляет динамическое нагружение [10–13]. Пульсационная составляющая вызывается турбулентными вихрями и порывами разного размера и характера, носящими случайный характер. Турбулентные пульсации можно рассматривать как совокупность колебаний ветра на разных частотах. Спектр турбулентных пульсаций описывает распределение энергии этих пульсаций в зависимости от частоты. В турбулентных потоках на низких частотах содержится большая часть энергии ветровых пульсаций, однако и высокочастотные компоненты могут вносить значительный вклад, особенно в случае взаимодействия с резонансными частотами конструкции. Собственная частота колебаний большинства высотных зданий и сооружений больше, чем период срыва вихрей крупных размеров, из-за которых отсутствует динамический отклик (реакция как у жесткого тела). Следовательно, нагрузки, вызываемые «фоновой» турбулентностью или более крупными вихрями, можно рассматривать так же, как и среднюю составляющую ветрового воздействия. Тем не менее более вероятно появление более мелких порывов и вихрей, что дает больше возможностей вызвать динамическую реакцию конструкций вблизи их первых форм собственных частот колебаний⁵. Динамический отклик при этом может действительно приводить к существенным колебаниям. Подход, основанный на факторах порыва ветра, использует это разделение на среднюю и пульсационную составляющую, как это предусмотрено во многих нормативных документах различных стран. Как утверждал А. Г. Давенпорт⁶, такой подход, используемый для установления пульсационной ветровой нагрузки, позволяет выявлять турбулентность в определенном месте, обеспечивает динамический отклик, но также учитывает эффекты уменьшения размерного масштаба турбулентности. Имеется относительно хорошая точность в динамическом отклике вдоль ветрового потока при расчете зданий и сооружений с применением подхода фактора порыва ветра в тех случаях, когда оправдана незначительность влияния окружающей застройки.

С другой стороны, также необходимо учитывать и динамический отклик в направлении, перпендикулярном ветровому потоку, который, как будет показано далее в статье, вносит вклад неменьший по сравнению с колебаниями вдоль потока. Этот эффект тем выше, чем ниже демпфирование системы. Есть

⁵ Ji Young Kim et al. Calibration of analytical models to assess wind-induced acceleration responses of tall buildings in serviceability level // *Engineering Structures*. 2009. No. 31 (9). Pp. 2086–2096.

⁶ Davenport A.G. Gust loading factors // *Journal of the Structural Division*. 1967. Vol. 93. No. 3. Pp. 11–34.

несколько различных явлений, вызывающих динамический отклик конструкций на ветровое воздействие. К ним относятся бафтинг, вихреобразование, галомирование и флаттер⁷ [13]. Тонкие конструкции, вероятно, будут чувствительны к динамическому отклику в направлении потока как следствие турбулентного бафтинга.

Динамический отклик в направлении, перпендикулярном ветровому потоку, будет возникать из-за вихреобразования или галомирования, но также может быть результатом возбуждения турбулентным бафтингом. Флаттер — это связанное движение конструкции, часто представляющее собой комбинацию изгибных и крутильных автоколебаний, которые могут привести к аэродинамической неустойчивости. Для строительных конструкций эффекты флаттера и галомирования недопустимы.

Важная проблема, связанная с динамическим откликом высотных зданий при ветровом воздействии, связана с комфортностью верхних этажей^{8,9} [14–18], т.е. реакцией человека на вибрационное воздействие и восприятие колебаний. Здесь достаточно отметить, что самочувствие людей крайне чувствительно к вибрации до такой степени, что колебание верхних этажей высотного здания может вызывать дискомфорт, даже если оно соответствует относительно низкому уровню НДС, далекому от предельного состояния первой группы. Следовательно, для большинства высотных зданий соображения эксплуатационной пригодности в большей степени определяют конструкцию, а не вопросы прочности.

При определении динамических реакций на порывы ветра обычно используются следующие предпосылки, введенные Аланом Давенпортом⁶:

- конструкция — упругая;
- справедлива гипотеза о том, что аэродинамические силы в пульсирующем потоке в среднем являются такими же, как и в стационарном потоке (квазистационарная модель обтекания);
- пульсация аэродинамических сил линейно зависит от пульсаций скорости потока.

Ветровые потоки, имея крайне высокую степень стохастичности по времени и пространству, приближенно описываются некоторыми математическими функциями. Например, колебания ветра можно рассматривать как результат суммирования синусоидально изменяющихся ветров, наложенных друг

⁷ СТО НИУ МГСУ и НИЦ СтаДиО 02066523-089-1–2024. Численное моделирование ветровых и снеговых воздействий : введ. 04.22.2024. М., 2024. 65 с.

⁸ Kwok K., Burton M., Abdelrazaq A. Wind-induced motion of tall buildings: designing for habitability. Reston : American Society of Civil Engineers, 2015. 77 p.

⁹ Howarth H. Human exposure to wind-induced motion in tall buildings: and assessment of guidance in ISO 6897 and ISO 10137 // Conference: 50th United Kingdom Conference on Human Responses to Vibration. 2015.

на друга к средней составляющей скорости ветра¹⁰. Эти синусоидальные вариации будут иметь различные частоты, амплитуды и фазы. Функция спектральной плотности мощности (энергетический спектр турбулентности) описывает соотношение между частотой и амплитудой синусоидально изменяющихся волн, составляя колебания скорости ветра, т.е. показывает доли мощности ветрового потока на бесконечно малый диапазон частот.

Описание случайной скорости с применением спектральной функции характеризует изменение скорости ветра во времени, однако ветровой поток меняется и по пространству. Простейшим является предположение о том, что пространственное распределение стабильно и пульсации скорости ветра происходят абсолютно синхронно во всех точках сооружения. Подобное приводит к тому, что пульсационная нагрузка будет завышена, что, безусловно, ведет к дополнительному запасу прочности, но в то же время для более точного описания воздействия на здания и сооружения необходимо учитывать корреляцию энергетического спектра по пространству. Более реалистичный подход использует понятие о корреляционной зависимости между пульсацией скорости в разных точках. Естественно, что в очень близко расположенных точках скорости различаются незначительно, но чем дальше точки расположены друг от друга, тем менее зависимы пульсационные компоненты скорости. Подобная корреляционная зависимость между пульсацией скоростей в разных точках $r_1 = (x_1, x_2, x_3)$ и $r_2 = (x_2, y_2, z_2)$ описывается приведенным соотношением (к масштабу турбулентности), называемым коэффициентом пространственной корреляции $R_V(f, r_1, r_2)$ ¹¹.

¹⁰ Manwell J.F. Wind energy explained: Theory, design and application. New York : Wyle, 2009. DOI: 10.1002/9781119994367

¹¹ Попов Н.А. Рекомендации по уточненному динамическому расчету зданий и сооружений на действие пульсационной составляющей ветровой нагрузки. М. : ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2000.

На рис. 2 показана последовательность определения динамической реакции системы на действие порывов ветра. Рассмотрим схему поэтапно:

- на входе системы представлена характеристика ветрового потока в виде функции скорости $V(t)$, которая имеет случайный характер. Порывы ветра порождают спектр пульсаций $S_V(\omega)$, отображающий распределение энергии по частотам;
- скорость ветра через аэродинамическую функцию передачи χ_s преобразуется в спектр аэродинамических сил $S_F(\omega)$. Это учитывает влияние конструктивных характеристик объекта на взаимодействие с воздушным потоком;
- аэродинамические силы вызывают ответную динамическую реакцию системы. При помощи передаточной функции χ_m рассчитывается спектр реакции $S_y(\omega)$, который характеризует распределение амплитуд колебаний системы в зависимости от частоты.

Спектр реакций зданий и сооружений разделяют на квазистатическую и динамическую составляющие [19, 20]. Квазистатическая часть соответствует безынерционной реакции системы, динамическая составляющая приводит к колебательному характеру движения конструкций зданий и сооружений.

В нормах различных стран используются разные подходы к определению пульсационной составляющей ветровой нагрузки. Так, например, в работах¹² [21–24] представлены сравнительные исследования различных зарубежных нормативных документов, регламентирующих ветровые нагрузки и воздействия.

Рекомендация нормативного документа СП 20.133-30.2016, допускающая ограничение частот и форм колебаний по трем нижшим собственным частотам и формам колебаний (двум изгибным и одной крутильной или смешанным крутильно-изгибным), связана со спектром ветрового воздействия, при кото-

¹² Kwon D.K., Kareem A. Comparative study of major international wind codes and standards for wind effects on tall buildings // Engineering Structures. 2013. No. 51. Pp. 23–35. DOI: 10.1016/j.engstruct.2013.01.008

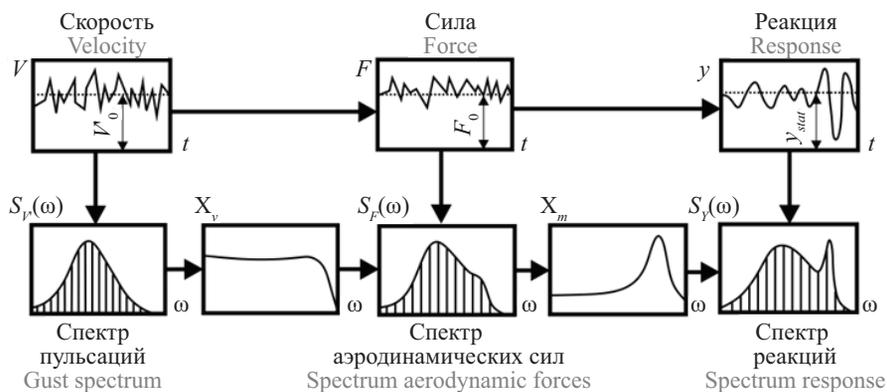


Рис. 2. Схема определения динамических реакций системы на действие пульсации ветра⁴

Fig. 2. Scheme for determining dynamic reactions of the system to the action of wind gusts⁴

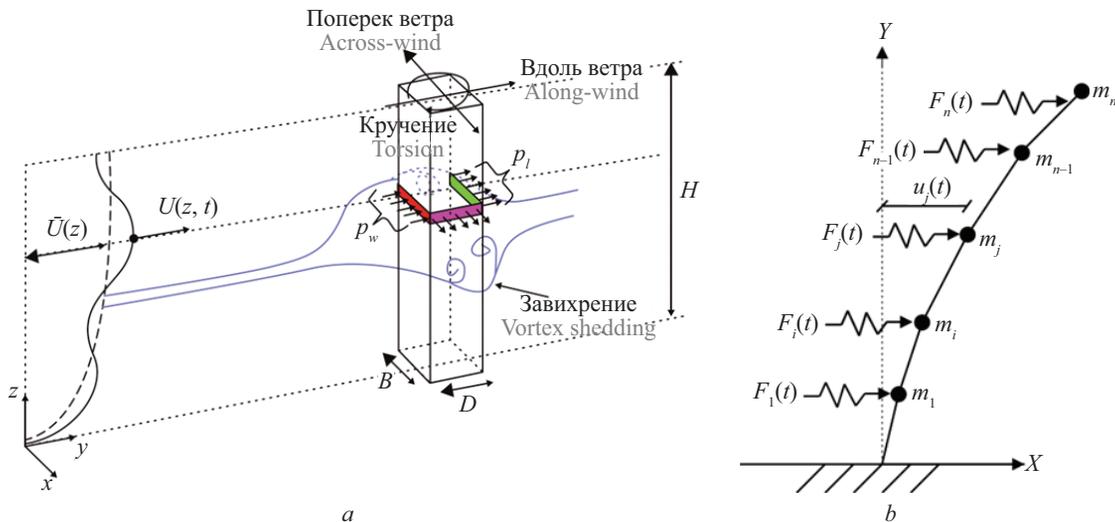


Рис. 3. Схема ветрового воздействия на высотное здание (а) и модель многомассовой консольной системы с распределенными по высоте аэродинамическими силами (б)

Fig. 3. Schematic of wind action on a high-rise building (a) and a model of a multi-mass cantilever system with height-distributed aerodynamic forces (b)

ром наиболее энергоемкий спектр ветрового воздействия реализуется на более низких частотах.

Для системы с одной степенью свободы решение задачи динамического расчета по схеме, указанной на рис. 2, дает возможность свести динамическую задачу к квазистатической. Для многомассовых систем (рис. 3, б) подход к определению динамического отклика зданий и сооружений при ветровом воздействии (рис. 3, а) сводится к задаче на основе разложения по собственным частотам и формам колебаний.

Существующие нормативные подходы пригодны для зданий и сооружений малой и средней высоты и при разреженной застройке. Для вопросов ветрового воздействия они не содержат рекомендаций по назначению аэродинамических коэффициентов для сложных по форме высотных зданий и сооружений, не учитывают влияние аэродинамической интерференции, рельефа, изменения спектра набегающего потока в условиях плотной и изменяющейся застройки, а также не способны учитывать поперечные, действующие перпендикулярно ветровому потоку, а также крутильные колебания (по причине базирования на спектре А. Давенпорта, описывающего энергетическое распределение турбулентных пульсаций скорости ветра вдоль направления основного ветрового потока), в отличие от предлагаемой в настоящей работе методики численного моделирования, которая охватывает и учитывает данные проблемы и недостатки имеющихся нормативных методик.

Таким образом, научная новизна данного исследования заключается в разработке методики численного моделирования динамического отклика высотных зданий и сооружений при ветровых воздействиях с разрешением спектра турбулентных пульсаций (вихре-разрешающая постановка) и учетом аэродинамической интерференции с окружающей застройкой на основе

нестационарного CFD-моделирования и прямого динамического конечно-элементного анализа. На апробационном примере башни «Эволюция», как здания, входящего в состав самого высотного комплекса зданий в России (ММДЦ «Москва-Сити»), показан пример использования данной методики и численные результаты моделирования динамического отклика при различных углах атаки ветра.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках предложенной методики определение динамического отклика высотных зданий и сооружений разделяется на два этапа: аэродинамический и механический (механика конструкций). По этой причине будем рассматривать последовательную методику решения двух задач на примере башни «Эволюция».

Разработанная методика апробирована с использованием программных комплексов (ПК) семейства ANSYS. В частности, для решения задачи вычислительной гидрогазодинамики (CFD) применен ПК ANSYS Fluent. Для решения задачи механики конструкций — ПК ANSYS Mechanical APDL. С целью дополнительного сопоставления предлагаемой методики с результатами нормативного подхода СП 20.13330.2016 динамического отклика башни «Эволюция» в ПК Лира-САПР и SCAD была сконвертирована расчетная модель ANSYS, верифицированная по собственным частотам и формам колебаний конструкций.

Башня «Эволюция» имеет сложную архитектурную форму. Начиная со 2-го этажа, каждый этаж повернут на 3° относительно предыдущего, что в общей сложности составляет 135° . Благодаря этому башня выглядит как закручивающийся параллелепипед. Башня заканчивается короной, которая пред-

ставляет собой сочетание нескольких сложных рам и вертолетной площадки. Пятно застройки в уровне первого этажа представляет собой квадратную форму с максимальными размерами $36,0 \times 36,0$ м. Высота здания от уровня пола нулевого этажа составляет 245,95 м. Ядро жесткости — это блок монолитных железобетонных стен, лифтовых и лестничных узлов. Располагается в центре здания и является основным жестким элементом. Стены толщиной от 600 до 800 мм — по 51-й этаж включительно; 400 мм — на 52-м, 53-м и 54-м этажах. Свесы плит перекрытий за пределами кольца-октагона из восьми балок достигаются за счет продления этих балок консолями, разгружающими моменты в пятнадцатиметровых пролетах. Колонны в здании выполнены из монолитного железобетона. Поперечное сечение колонн круглое, прямоугольное и квадратное. Восемь внутренних колонн имеют круглое поперечное сечение (диаметр изменяется по высоте от 2100 до 1200 мм). По углам здания расположены четыре колонны с прямоугольным сечением (размер изменяется по высоте от 1500×1500 мм до 1000×1500 мм).

На рис. 4 представлены конечно-элементные модели (КЭМ) башни «Эволюция», выполненные в разных ПК (ANSYS Mechanical APDL, Лира-САПР и SCAD). Для создания модели в ANSYS Mechanical APDL использовались конечные элементы (КЭ)

Beam188 двухузловой для стержней и КЭ Shell181 трех- и четырехузловой для оболочек (пластин). Для создания модели в Лира-САПР применялись КЭ 42 универсальный трехузловой для оболочек (пластин), КЭ 44 универсальный четырехузловой для оболочек (пластин) и КЭ 10 универсальный двухузловой для стержней. Для создания модели в SCAD использовались КЭ 42 универсальный трехузловой для оболочек (пластин), КЭ 44 универсальный четырехузловой для оболочек (пластин) и КЭ 5 универсальный двухузловой для стержней. Размерность КЭМ составляет 205 265 элементов и 159 926 узлов. На КЭМ принимались расчетные нагрузки: собственный вес здания, полезная и ветровая нагрузки. Свойства материала приняты для бетона класса В80. Модель материала — линейно-упругая.

Модель башни, выполненная в ANSYS Mechanical APDL, использовалась для прямого динамического анализа отклика здания на ветровые воздействия. Расчетные модели Лира-САПР и SCAD применялись для определения динамического отклика согласно отечественным нормативным документам СП20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». Точки мониторинга (для построения графиков искомых переменных во времени) представляют собой четыре точки на уровне краев выступающей части плиты перекрытия,

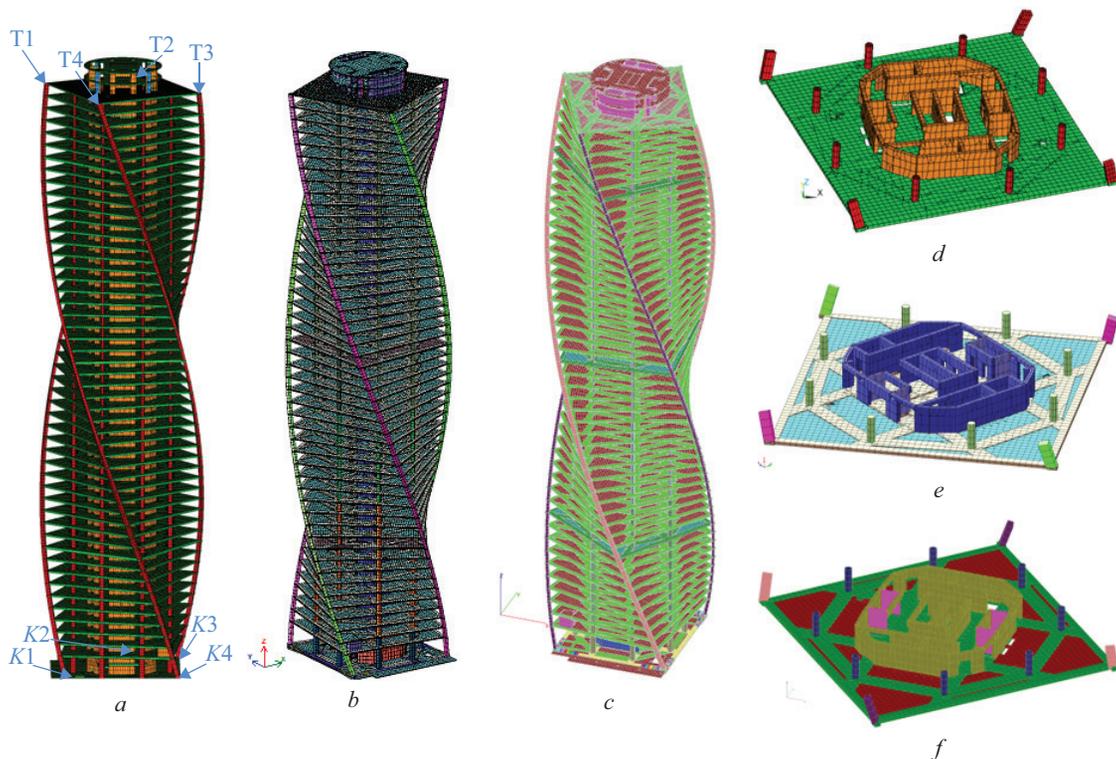


Рис. 4. Конечно-элементная модель башни «Эволюция» в программных комплексах ANSYS Mechanical APDL (a); Лира-САПР (b) и SCAD (c); фрагмент конечно-элементной модели этажа в ANSYS Mechanical APDL (d); Лира-САПР (e) и SCAD (f)

Fig. 4. Finite element model of the “Evolution” tower in ANSYS Mechanical APDL (a); Lira-SAD (b) and SCAD (c); fragment of finite element model of the floor in ANSYS Mechanical APDL (d); Lira-SAD (e) and SCAD (f)

а для колонн — четыре по контуру первого этажа (рис. 4).

Определение собственных частот и форм колебаний механических систем — едва ли не самые информативные верификационные задачи, интегрирующие многие факторы и параметры расчетной модели и в то же время позволяющие выявить их различие. В табл. 1 представлены числовые значения собственных частот колебаний башни «Эволюция», вычисленные в разных ПК (Δ_{12} означает разницу между ANSYS MAPDL и Лира-САПР, Δ_{13} — разница между ANSYS MAPDL и SCAD, Δ_{23} — разница между Лира-САПР и SCAD). На рис. 5 показаны первые 6 собственных частот и форм колебаний, вычисленные в ПК ANSYS Mechanical APDL.

При сравнении результатов расчета собственных частот и форм колебаний башни «Эволюция» в ПК Лира-САПР и SCAD была отмечена довольно хорошая сходимость. Небольшие различия в результатах, полученных с помощью ANSYS Mechanical APDL, связаны с использованием различных теоретических моделей для оболочек и пластин: применяются балочные модели Тимошенко и пластины по теории

Мидлина – Рейснера, которые учитывают влияние поперечного сдвига. Несмотря на это, полученные результаты также близки.

В линейных системах динамики конструкций внутренняя нагрузка линейно пропорциональна узловым перемещениям, а матрица жесткости системы остается неизменной. Уравнение движения в матричной форме метода конечных элементов можно записать в следующем виде¹³:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F^a\}, \quad (1)$$

где $[M]$ — глобальная матрица масс; $\{\ddot{u}\}$ — вектор, характеризующий узловые ускорения; $[C]$ — глобальная матрица демпфирования; $\{\dot{u}\}$ — вектор, характеризующий узловые скорости; $[K]$ — глобальная матрица жесткости системы; $\{u\}$ — вектор, характеризующий узловые перемещения; $\{F^a\}$ — функция, характеризующая нагрузки как функцию от времени.

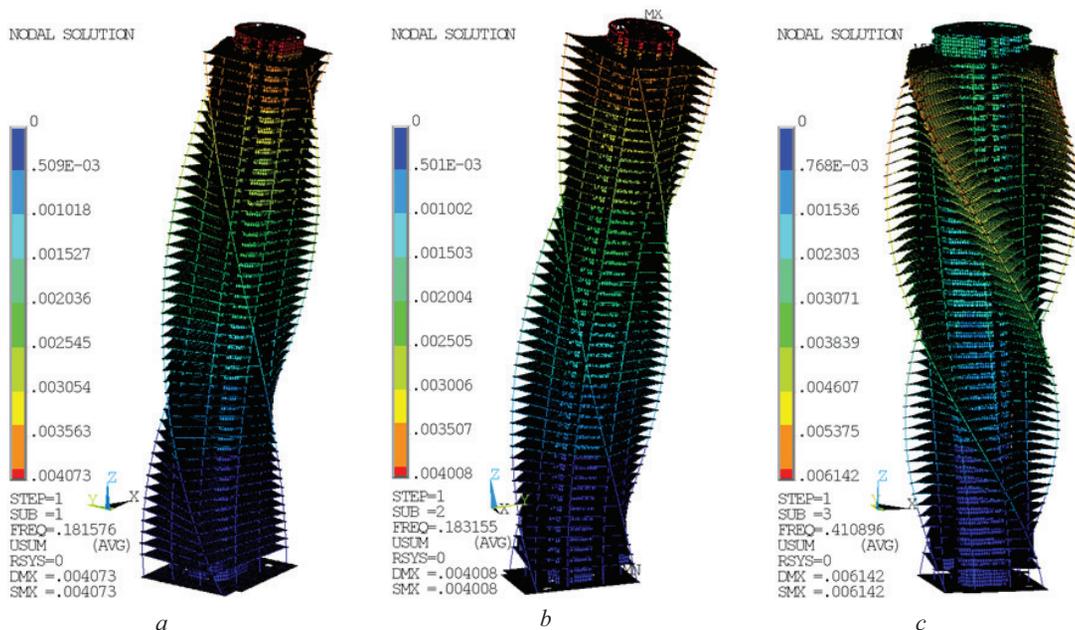
Система уравнений (1) разрешается методом Ньюмарка. Семейство алгоритмов интегрирования Ньюмарка

¹³ Theory Reference (2024) Release 2024R1. ANSYS Inc., Canonsburg.

Табл. 1. Собственные частоты колебаний башни «Эволюция» в разных программных комплексах

Table 1. Natural frequencies of vibrations of the “Evolution” tower in different programme complexes

Программный комплекс/собственные частоты Software package/natural frequencies	ANSYS MAPDL	Лира-САПР Lira-SAPR	SCAD	Δ_{12} , %	Δ_{13} , %	Δ_{23} , %
f_{12} , Гц / Hz	0,1816	0,1747	0,1746	3,80	3,86	0,06
f_{22} , Гц / Hz	0,1832	0,1836	0,1831	0,22	0,06	0,27
f_{32} , Гц / Hz	0,4109	0,4354	0,4320	5,96	5,14	0,78
f_{42} , Гц / Hz	0,6811	0,7125	0,7092	4,61	4,13	0,46
f_{52} , Гц / Hz	0,8138	0,7940	0,7930	2,43	2,56	0,13
f_{62} , Гц / Hz	1,0913	1,1866	1,1850	8,73	8,30	0,86



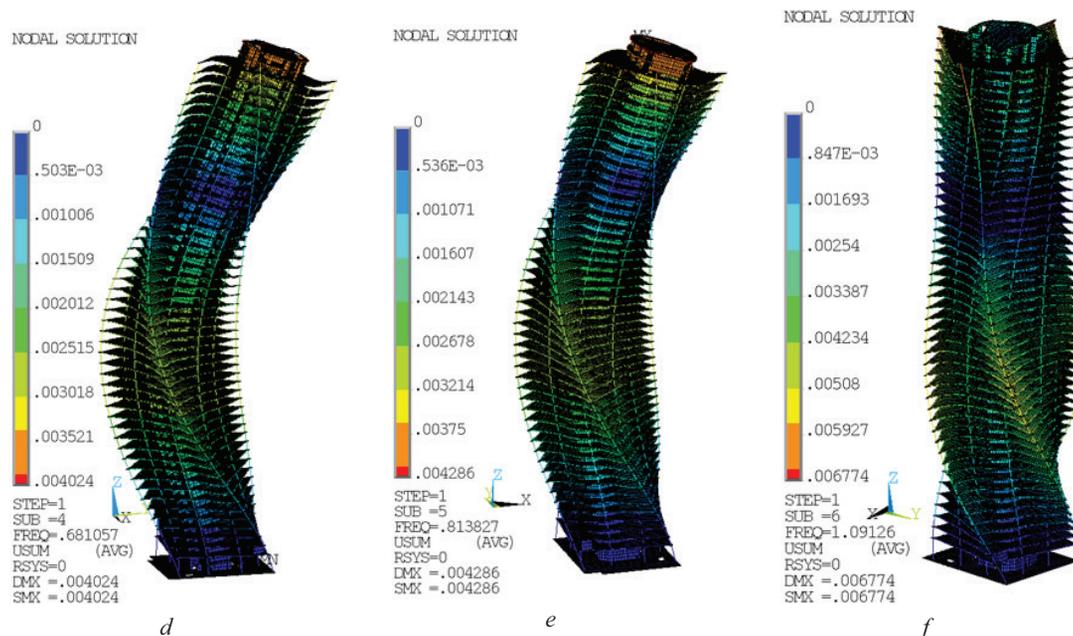


Рис. 5. Собственные частоты и формы колебаний башни «Эволюция», вычисленные в программном комплексе ANSYS Mechanical APDL

Fig. 5. Natural frequencies and mode shapes of the “Evolution” tower calculated in the ANSYS Mechanical APDL programme complex

ка является одним из самых популярных методов интегрирования во времени как одношаговый алгоритм, который зарекомендовал себя в практике для задач нелинейной динамики в механике деформируемых твердых тел. Полудискретное уравнение движения, приведенное в уравнении (1), можно переписать как:

$$[M]\{\ddot{u}_{n+1}\} + [C]\{\dot{u}_{n+1}\} + [K]\{u_{n+1}\} = \{F_{n+1}^a\}, \quad (2)$$

где $\{\ddot{u}_{n+1}\}$ — вектор узловых ускорений $\{\ddot{u}(t_{n+1})\}$ в момент времени (t_{n+1}) ; $\{\dot{u}_{n+1}\}$ — вектор узловых скоростей $\{\dot{u}(t_{n+1})\}$ в момент времени (t_{n+1}) ; $\{u_{n+1}\}$ — вектор узловых перемещений $\{u(t_{n+1})\}$ в момент времени (t_{n+1}) ; $\{F_{n+1}^a\}$ — вектор приложенных узловых нагрузок $\{F_{n+1}^a(t_{n+1})\}$ в момент времени (t_{n+1}) .

В дополнение к уравнению (2) семейство алгоритмов интегрирования во времени Ньюмарка требует обновления перемещений и скорости следующим образом:

$$\{\dot{u}_{n+1}\} = \{\dot{u}_n\} + [(1-\delta)\{\ddot{u}_n\} + \delta\{\ddot{u}_{n+1}\}]\Delta t; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \{u_{n+1}\} &= \{u_n\} + \{\dot{u}_n\}\Delta t + \\ &+ \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha \right) \{\ddot{u}_n\} + \alpha \{\ddot{u}_{n+1}\} \right] \Delta t^2, \end{aligned} \quad (4)$$

где α и δ — параметры интегрирования Ньюмарка $\left(\delta \geq \frac{1}{2}, \alpha \geq \frac{1}{4} \left(\frac{1}{2} + \delta \right)^2 \right)$.

В конечном итоге схема интегрирования Ньюмарка состоит из трех уравнений конечных разностей, представленных в уравнении (2) через уравне-

ние (3) и (4), а также трех неизвестных $\{\ddot{u}_{n+1}\}$, $\{\dot{u}_{n+1}\}$ и $\{u_{n+1}\}$, которые могут быть численно вычислены с помощью трех алгебраических уравнений вместе с тремя известными величинами $\{\ddot{u}_n\}$, $\{\dot{u}_n\}$ и $\{u_n\}$.

Используя три уравнения (2)–(4), одношаговый алгоритм в терминах неизвестной $\{u_{n+1}\}$ и трех известных величин можно записать как:

$$\begin{aligned} (\alpha_0[M] + \alpha_1[C] + [K])\{u_{n+1}\} &= \\ = \{F_{n+1}^a\} + [M](\alpha_0\{u_n\} + \alpha_2\{\dot{u}_n\} + \alpha_3\{\ddot{u}_n\}) &+ \\ + [C](\alpha_1\{u_n\} + \alpha_4\{\dot{u}_n\} + \alpha_5\{\ddot{u}_n\}), \end{aligned} \quad (5)$$

где $\alpha_0 = \frac{1}{\alpha\Delta t^2}$, $\alpha_1 = \frac{\delta}{\alpha\Delta t}$, $\alpha_2 = \frac{1}{\alpha\Delta t}$, $\alpha_3 = \frac{1}{2\alpha} - 1$, $\alpha_4 = \frac{\delta}{\alpha} - 1$, $\alpha_5 = \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\delta}{\alpha} - 2 \right)$ — параметры интегрирования.

В литературе, посвященной динамическим расчетам, различные авторы используют разные модели демпфирования, это отличие нашло применение и в нормативных документах, где применяются формы представления внутренних потерь. Одна из наиболее популярных моделей демпфирования — модель Рэлея (также известная как пропорциональное демпфирование) основана на предположении, что демпфирование линейно зависит от комбинации жесткости и массы конструкции. Демпфирование в этой модели описывается матрицей демпфирования $[C] = \alpha[M] + \beta[K]$. Учет демпфирующих свойств на основе рэлеевского демпфирования [25–27] выполняется через коэффициенты α (пропорциональности масс) и β (пропорциональности жесткости), посчитанные на основе круговых частот колебаний конструкции ω_i и ω_j . Вычисление

коэффициентов (при допущении, что коэффициенты демпфирования ξ равны по различным частотам) происходит по следующим формулам:

$$\zeta_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2}; \quad \alpha = \frac{2\xi\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j};$$

$$\beta = \frac{2\xi}{\omega_i + \omega_j}.$$

(6)

Декремент колебаний от принятого ξ (параметр затухания в долях от критического) для железобетонных сооружений: $\delta = 2\pi\xi = 0,05 \cdot (2 \cdot 3,142) = 0,3142$.

При использовании модели демпфирования Рэлея для динамического анализа высотных зданий при ветровых воздействиях важно правильно выбрать частоты, на основе которых будут рассчитываться коэффициенты демпфирования α и β , так как ветровые нагрузки — это переменные во времени и могут приводить к резонансным явлениям. Для высотных зданий, которые подвержены ветровым воздействиям, необходимо учитывать два основных диапазона частот:

1. Низкочастотный диапазон, связанный с общесистемными колебаниями конструкции (обычно это низшие собственные частоты здания).

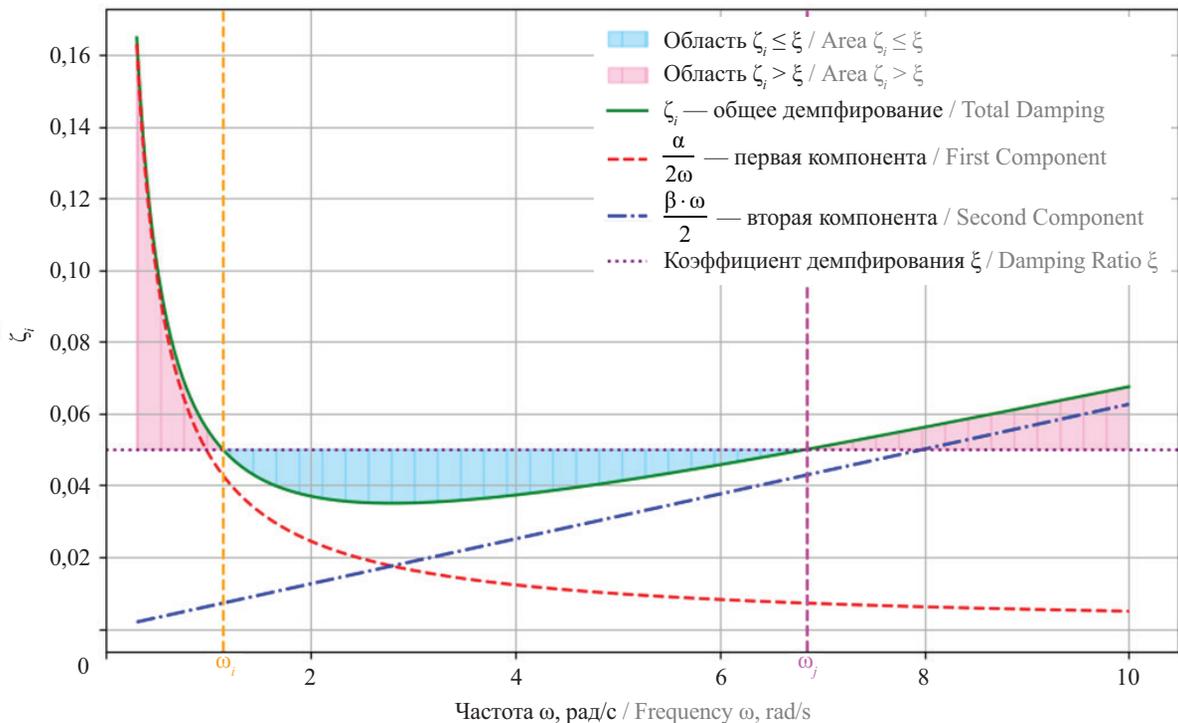
2. Высокочастотный диапазон, возникающий в результате локальных колебаний и пульсаций ветра, которые также могут влиять на элементы конструкции. В основном они важны для фасадных и кровельных конструкций, имеющих собственные частоты колебаний, превышающие общесистемные (всей конструкции).

При неправильном подборе данных частот возможны как эффекты чрезмерного демпфирования

высокочастотного диапазона (в случае выбора двух близких частот, например первой и второй), пример которого показан на рис. 6, *b* — оранжевый график, так и случай «провала демпфирования», когда частоты на значительном интервале (между первой и *n*-й) слишком отдалены друг от друга (рис. 6, *b* — синий график).

Для высотных зданий первые несколько собственных частот, соответствующих основным формам колебаний, являются наиболее важными для оценки динамического отклика. Как правило, это частоты, связанные с колебаниями в горизонтальной плоскости (изгибные формы), а также крутильные колебания. В качестве первой частоты, используемой для вычисления, обычно используют самую низшую частоту колебаний системы. В качестве второй частоты — низшую из трех собственных частот колебаний (при обязательном наличии двух изгибных и одной крутильной или смешанных крутильно-изгибных форм колебаний), либо частоту из диапазона высокочастотных колебаний, которые представляют собой либо пульсации ветра, либо локальные колебания конструкций (например, вторичные формы или высокочастотные отклики фасадных элементов), которые можно брать исходя из предельного значения собственной частоты f_{lim} (табл. 11.5 СП 20.13330.2016).

В связи с данной неопределенностью можно сформулировать общие рекомендации к выбору частот для вычисления коэффициентов рэлеевского демпфирования. При этом следует учитывать, что спектр аэродинамической силы ветра охватывает только наиболее энергоемкую часть частотного спектра высотного здания. Это означает, что при анализе динамического



а

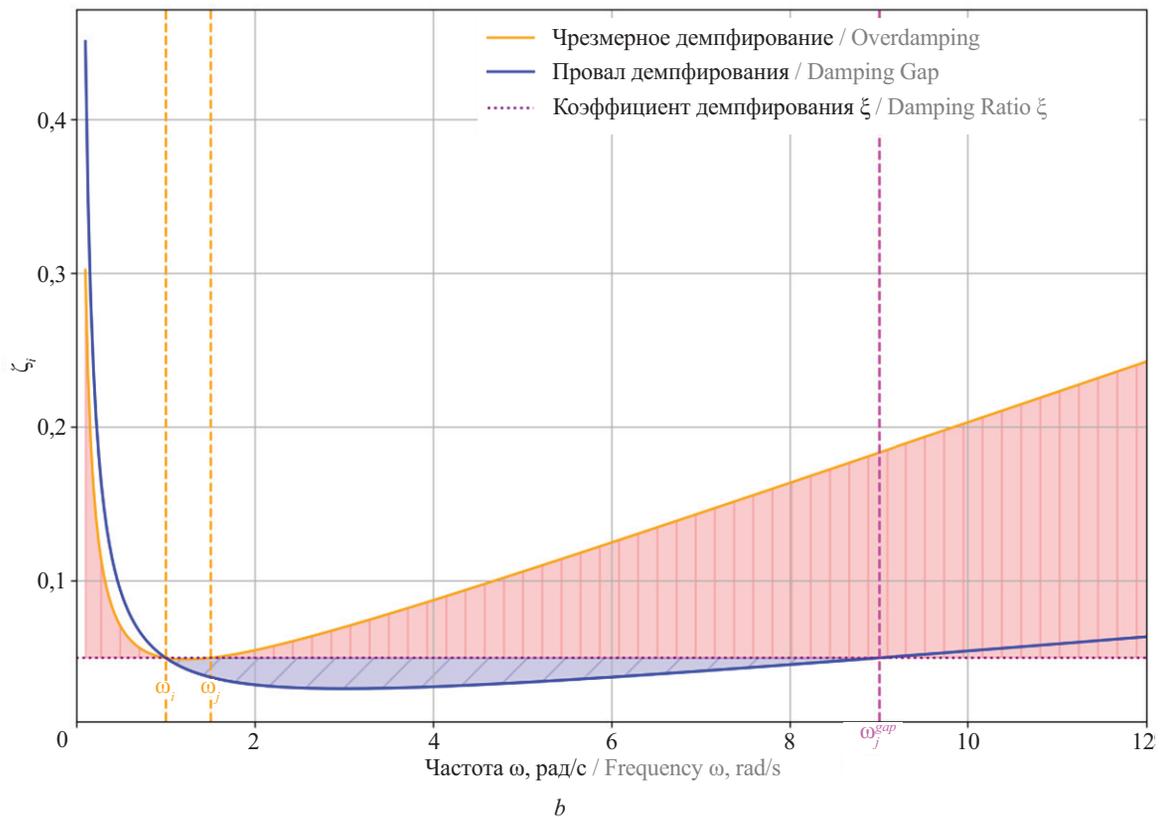


Рис. 6. Графики рэлеевского демпфирования: *a* — выбранные параметры демпфирования для рассматриваемой задачи; *b* — эффекты чрезмерного демпфирования и «провала демпфирования» при неправильном подходе к подбору частот ω_i и ω_j

Fig. 6. Rayleigh damping plots: *a* — the selected damping parameters for the considered problem; *b* — the effects of excessive damping and “damping failure” in case of wrong approach to frequency selection ω_i and ω_j

отклика здания на ветровые воздействия имеет смысл сосредоточиться на собственных частотах, лежащих в этой энергоемкой области (см. раздел Результаты исследования). Учитывая это, нет необходимости выбирать в качестве второй частоты для расчетов значения, превышающие эту область, поскольку они не внесут существенного вклада в динамический отклик конструкции под действием ветра, но приведут к «провалу демпфирования» и к недоучету диссипативных свойств системы. Согласно описанному выше подходу, в настоящей статье в качестве первой частоты взята первая собственная частота колебаний башни «Эволюция», в качестве второй частоты — ближайшая собственная частота колебаний, соответствующая концу наиболее энергоемкого интервала спектра аэродинамической силы (см. раздел Результаты исследования), соответствующая 6-й собственной частоте колебаний.

В односвязанной (или жесткой) постановке, когда ветровые потоки влияют на здание, но колебание здания не влияет на ветровой поток, вследствие применения гипотезы о малости отклонений высотного здания по сравнению с его высотой, вычисленные из результатов CFD-моделирования аэродинамические силы используются в качестве вектора зависимых от времени t и высоты z величин $F_i(z, t)$ в уравнениях (1), (2) и (5), представляющие собой поэтажные

силы F_x , F_y и крутящий момент M_z . Данные силы и моменты необходимы для механического конечно-элементного анализа НДС. Функции вычисления интегральных сил и моментов присутствуют во всех промышленных ПК CFD. Эти функции учитывают вклад статического давления, направленного по нормали к поверхностям, и напряжения сдвига, направленного по касательной к поверхностям. Для большинства зданий и сооружений вклад напряжений сдвига незначителен и может быть проигнорирован⁷.

По своей сути ветровое давление есть функция от пространственных координат и времени: $p(x, y, z, t)$. Однако в таком виде прикладывать ветровые давления в практических задачах оказывается неудобным. Для решения проблемы в контексте применения к высотным зданиям предлагается приводить поэтажные погонные ветровые нагрузки для каждой зоны сбора аэродинамических нагрузок. Основная концепция заключается в представлении неравномерно распределенной ветровой нагрузки по периметру этажа как комбинации трех равномерно распределенных составляющих: вдоль глобальных осей f_x, f_y и касательной нагрузки f_τ (рис. 7). Эта декомпозиция позволяет заменить совокупность локальных ветровых воздействий на одну результирующую силу и момент в соответствии с положениями теоремы теоретической механики о равнодействующей

силе и моменте для абсолютно жесткого тела, что близко к действительности для перекрытия, нагруженного в своей плоскости.

Разложение на равномерно распределенные составляющие производится следующим образом:

$$F_x = \oint_l f_x dl = f_x \oint_l dl = f_x L, \quad (7)$$

где $f_x = F_x/L$. Аналогично $f_y = F_y/L$.

Для крутящего момента M_z вклад будет давать только равномерно распределенная система сил \vec{f}_τ , в то время как вклад в момент для сил f_x, f_y будет равен нулю, если начало координат находится в центре масс периметра рассматриваемого сечения. Вывод для равномерно распределенной системы сил \vec{f}_τ представляется так:

$$\begin{aligned} M_z &= \oint_l [\vec{r}, \vec{f}_\tau]_z dl = \oint_l \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x & y & 0 \\ f_{\tau,x} & f_{\tau,y} & 0 \end{vmatrix} dl = \\ &= \bar{k} \oint_l \begin{vmatrix} x & y \\ f_{\tau,x} & f_{\tau,y} \end{vmatrix} dl = \bar{k} \oint_l (xf_{\tau,y} - yf_{\tau,x}) dl = \\ &= \bar{k} f_\tau \oint_l (x \cos(\beta) - y \cos(\alpha)) dl = \\ &= \bar{k} f_\tau \left(\oint_l x \cos(\beta) dl - \oint_l y \cos(\alpha) dl \right) = \\ &= \bar{k} f_\tau \left(\oint_l x dy - \oint_l y dx \right), \end{aligned} \quad (8)$$

где $f_\tau = M_z / \left(\oint_l x dy - y dx \right)$. Криволинейный интеграл второго рода $\oint_l (x dy - y dx)$ зависит от направления обхода контура при интегрировании. Для согласования с направлением f_τ необходимо при взятии данного интеграла совершать обход против часовой стрелки. Численная реализация данного интеграла представляется в следующем виде:

$$L \approx \sum_{i=1}^N \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2};$$

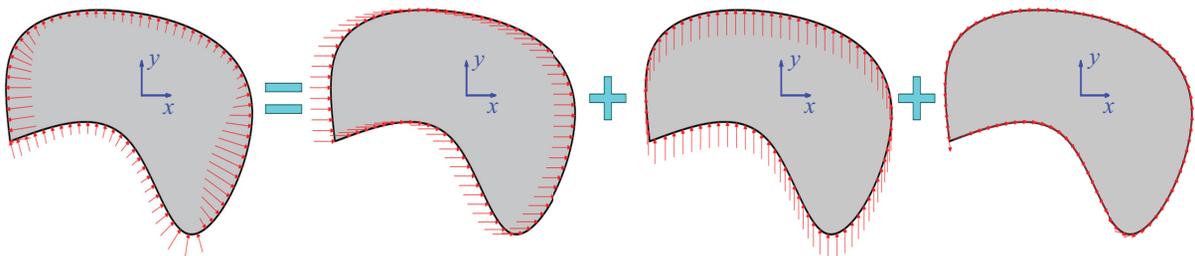


Рис. 7. Схема разложения ветровой нагрузки на три равномерно распределенные составляющие для перекрытия произвольной формы

Fig. 7. Scheme of wind load decomposition into three uniformly distributed components for a slab of arbitrary shape

$$\begin{aligned} \oint_l x dy - y dx &\approx \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (x_{i+1} + x_i)(y_{i+1} - y_i) - \\ &- (y_{i+1} + y_i)(x_{i+1} - x_i) = \sum_{i=1}^N x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i. \end{aligned} \quad (9)$$

Определение аэродинамических сил ветра на здания и сооружения основано на методах вычислительной гидрогазодинамики, представляющих собой мощный инструмент численного анализа, используемый для моделирования течений жидкостей и газов в различных инженерных и научных приложениях. В частности, для моделирования ветровых потоков и их взаимодействия с высотными зданиями и сооружениями задача сводится к численному решению системы трехмерных, нестационарных и нелинейных уравнений Навье – Стокса. При решении практических задач по определению ветровых нагрузок на здания и сооружения используются различные упрощения и гипотезы, оправданные спецификой физического процесса и требуемой точности вычислений. В частности, ветровые потоки могут рассматриваться как несжимаемые и изотермические, что означает пренебрежение изменениями плотности и температуры воздуха. Также в большинстве случаев исключается влияние внешних массовых сил, что упрощает задачу до учета исключительно аэродинамических сил и взаимодействий. Тогда итоговые уравнения гидрогазодинамики примут вид:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} + \nu \Delta \vec{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p, \quad (10)$$

где \vec{u} — вектор скорости потока, м/с; t — время, с; ν — коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с; $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ — дифференциальный оператор Лапласа; ρ — плотность воздуха, кг/м³; p — давление, Па.

Также необходимо выполнение уравнений неразрывности и состояния:

$$\text{div}(\vec{u}) = 0; \quad (11)$$

$$\rho = \text{const}. \quad (12)$$

Численное решение систем уравнений (10)–(12) с учетом начальных и граничных условий реализуется за счет моделирования турбулентности, для которого выделяют 4 основных подхода:

1. DNS (Direct Numerical Simulation) — прямое численное моделирование. В этом подходе система уравнений гидрогазодинамики (10)–(12) разрешается напрямую для всех пространственно-временных масштабов турбулентности. Требования к вычислительным ресурсам чрезвычайно высоки, поскольку для корректного моделирования необходимо разрешать течение до колмогоровских масштабов турбулентности, что включает учет самых малых вихрей и их динамики. Ввиду ограничений современных вычислительных мощностей данный подход применим исключительно для задач при низких числах Рейнольдса и в основном используется в фундаментальных исследованиях с помощью суперкомпьютеров.

2. LES (Large Eddy Simulation) — моделирование крупных вихрей. Этот метод предполагает пространственное осреднение уравнений Навье – Стокса. Для этого применяется неявный фильтр, позволяющий отделить крупномасштабные вихри, которые разрешаются непосредственно, от маломасштабных вихрей, моделируемых на основе подсеточной модели турбулентности. Разрешение происходит на уровне размеров ячеек расчетной сетки, которая представляет собой совокупность конечных объемов. LES эффективно применяется для моделирования крупных вихрей в зонах отрыва.

3. URANS/RANS (Unsteady Reynolds Averaged Navier – Stokes) — осредненные по Рейнольдсу (осредненные по времени) уравнения Навье – Стокса. В данном подходе скорость потока представляется как сумма осредненной и пульсационной составляющих. В результате возникают дополнительные напряжения Рейнольдса (турбулентные напряжения ($\tau_{ij}^T = \rho \overline{u_i' u_j'}$)), которые вводят шесть новых неизвестных в уравнения. Для их определения используются полуэмпирические модели турбулентности. В рамках RANS-подхода все турбулентные вихри моделируются без явного разрешения, как это происходит в DNS и LES.

4. Совокупность методов LES и RANS породила класс *гибридных моделей турбулентности*, которые сочетают преимущества обоих подходов. LES обеспечивает высокую точность при моделировании отрывных течений, тогда как RANS более эффективно моделирует пристенные течения при меньших вычислительных затратах.

В настоящей работе используется гибридная модель SBES¹⁴ (Stress-Blended Eddy Simulation). Модель объединяет точность осредненных характеристик и пульсаций в отрывных и пристенных областях потока при высоких числах Рейнольдса, используя доступ-

ные на текущий момент вычислительные ресурсы. Переход между RANS и LES моделями осуществляется посредством функции переключателя (моделирование вихрей со смешанным напряжением) f_s :

$$\begin{aligned}\tau_{ij}^{SBES} &= f_s \cdot \tau_{ij}^{RANS} + (1 - f_s) \cdot \tau_{ij}^{LES}, \\ \mu_t^{SBES} &= f_s \cdot \mu_t^{RANS} + (1 - f_s) \cdot \mu_t^{LES},\end{aligned}\quad (13)$$

где τ_{ij}^{RANS} , τ_{ij}^{LES} — тензор напряжений (RANS/LES), Па; μ_t^{RANS} , μ_t^{LES} — турбулентная вязкость (RANS/LES), Па·с.

Для исследования явления аэродинамической интерференции, вызванного влиянием соседних высотных зданий комплекса ММДЦ «Москва-Сити», следует корректно рассчитать ветровую нагрузку на сооружения, а также учесть перераспределение ветрового потока после его взаимодействия со зданиями. Использование модели турбулентности SBES предоставляет возможность детально описать динамику крупных, энергоемких турбулентных структур в свободном потоке, разрешаемых посредством подсеточной модели LES-WALE, одновременно эффективно моделируя пристенные течения с помощью подхода RANS. Это позволяет достичь высокой точности как в отрывных областях потока, так и в пристенных зонах, что критически важно для моделирования взаимодействий потоков в сложной городской среде.

В ПК ANSYS Fluent для численного решения используется метод конечных (контрольных) объемов (МКО). Этот подход преобразует скалярное уравнение переноса (14) в алгебраическую форму (15), которая может быть эффективно решена численными методами. Такой подход дает возможность детально моделировать перенос массы, импульса и энергии в сложных геометриях, что особенно важно при анализе аэродинамических явлений в условиях интерференции и турбулентности:

$$\begin{aligned}\underbrace{\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV}_{\text{нестационарность}} + \underbrace{\oint_A \rho \phi \vec{u} \cdot d\vec{A}}_{\text{конвекция}} &= \\ = \underbrace{\oint_A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\vec{A}}_{\text{диффузия}} + \underbrace{\int_V S_\phi dV}_{\text{генерация}},\end{aligned}\quad (14)$$

где ϕ — искомая скалярная величина; V — объем ячейки, м³; \vec{u} — вектор скорости ($= u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$), м/с; \vec{A} — вектор площади поверхности ячейки, м²; Γ_ϕ — коэффициент диффузии для ϕ ; $\nabla \phi$ — градиент искомой величины ϕ ($= \frac{\partial \phi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \vec{k}$); S_ϕ — массовые силы или источник.

Метод конечных объемов базируется на интегральном представлении фундаментальных законов сохранения — массы, импульса и энергии. Для его реализации расчетная область разбивается на совокупность конечных (контрольных) объемов с помощью сеточной структуры. Внутри каждого конечного объема располагаются узлы, в которых производится

¹⁴ ANSYS Fluent Theory Guide. Canonsburg : ANSYS Inc., 2020.

вычисление искомых параметров. Путем интегрирования уравнения переноса (14) по каждому конечно-объемному элементу удается преобразовать дифференциальное уравнение в дискретную форму, что приводит к получению системы алгебраических уравнений (15), выражающих локальные законы сохранения. Эти дискретные уравнения характеризуют поведение физических величин в пределах каждого конечного объема и учитывают вклад соседних конечных объемов, что обеспечивает точное описание сложных процессов переноса в вычислительной области:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} V + \sum_f^{N_{\text{faces}}} \rho_f \vec{u}_f \cdot \vec{A}_f \phi_f &= \\ &= \sum_f^{N_{\text{faces}}} \Gamma_f \nabla \phi_f \cdot \vec{A}_f + S_\phi V, \end{aligned} \quad (15)$$

где N_{faces} — количество граней, образующих конечный объем; ϕ_f — величина ϕ конвектирующая через поверхность; $\rho_f \vec{u}_f \cdot \vec{A}_f$ — массовый поток через поверхность; \vec{A}_f — вектор площади поверхности f , $|\vec{A}_f| = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}$; $\nabla \phi_f$ — градиент ϕ на поверхности f .

Геометрическая модель создавалась в ПК ANSYS SpaceClaim и представлена на рис. 8. Разработка конечно-объемной сетки высотного комплекса осуществлялась в ANSYS Meshing и ANSYS Fluent. Размерность конечно-объемных моделей составляет 6 916 910 вычислительных ячеек на основе метода генерации

с полигексаэдрической сеткой. Конечно-объемные сетки показаны на рис. 9–11. Параметры конечно-объемной сетки выбраны на основе рекомендаций стандарта организации СТО¹⁵, выпущенного НИУ МГСУ (НОЦ КМ им. А.Б. Золотова) и Научно-исследовательским центром СтаДиО. Размер поверхностной сетки на «Эволюции» — 1 м, на прочих зданиях — 2 м, размер сетки в объеме по мере удаления от объекта — 4, 8 и 32 м. Аэродинамическая модель башни «Эволюция» разделена на 54 этажа, используемые для сбора ветровой нагрузки на здание. Численное моделирование осуществлялось с восемью углами атаки ветра. Направления рассматриваемых углов атаки ветра представлены на рис. 12.

В расчетной аэродинамической модели учтены следующие здания: «Башня на Набережной: С», «Башня на Набережной: В», «Федерация: Запад», «Город Столиц: Москва», «Город Столиц: Санкт-Петербург», «Империя», «Меркурий», «ОКО: Северная башня», «Эволюция», «Евразия», «ОКО: Южная башня», «IQ-квартал: Башня 3», «IQ-квартал: Башня 2», «Федерация: Восток», «Neva Towers: Башня 1», «Neva Towers: Башня 2», «Moscow Towers: Башня 1», «Moscow Towers: Башня 2», мост «Багратион», «Афи-

¹⁵ СТО НИУ МГСУ и НИЦ СтаДиО 02066523-089-1-2024. Численное моделирование ветровых и снеговых воздействий : введ. 22.04.2024. М., 2024. 65 с.

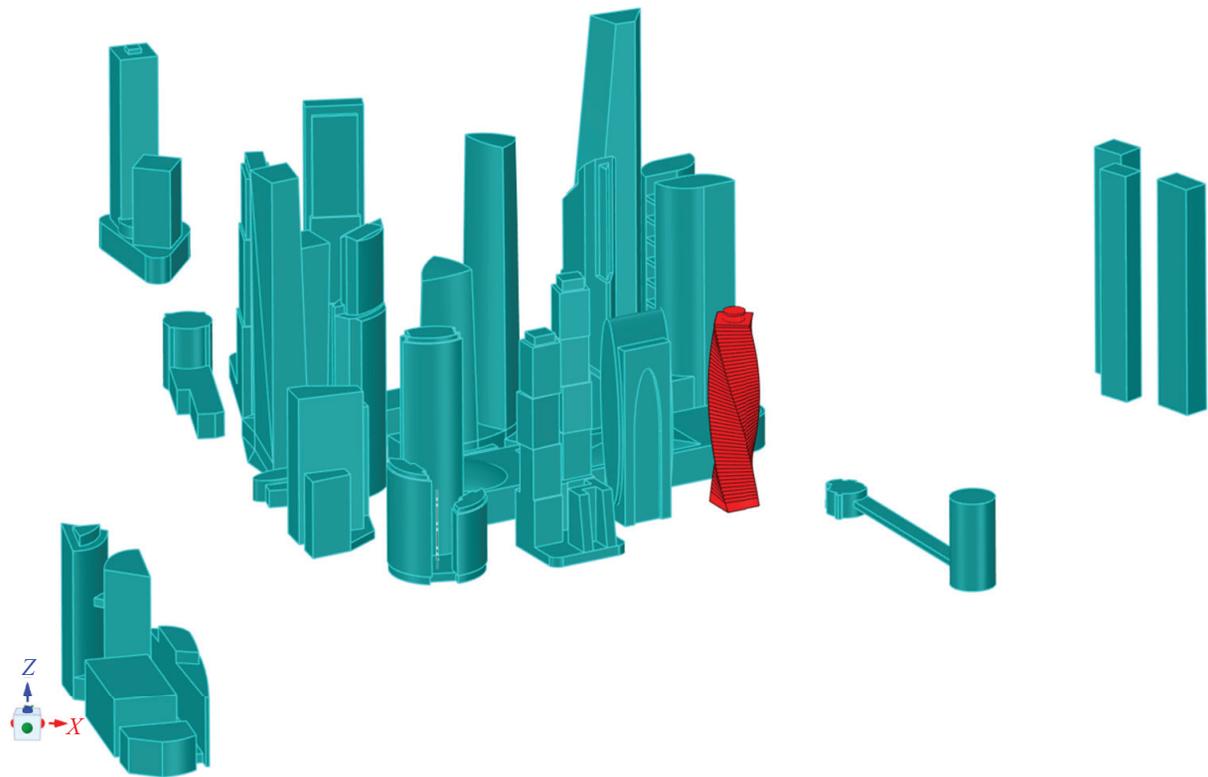


Рис. 8. Геометрическая модель ММДЦ «Москва-Сити» и окружающих высотных зданий в ANSYS SpaceClaim. Красным цветом отмечена башня «Эволюция» с поэтажной разрезкой (для сбора аэродинамических нагрузок)

Fig. 8. Geometric model of MIBC “Moscow-City” and surrounding high-rise buildings in ANSYS SpaceClaim. The red color indicates the “Evolution” tower with floor-by-floor section (to gather aerodynamic loads)

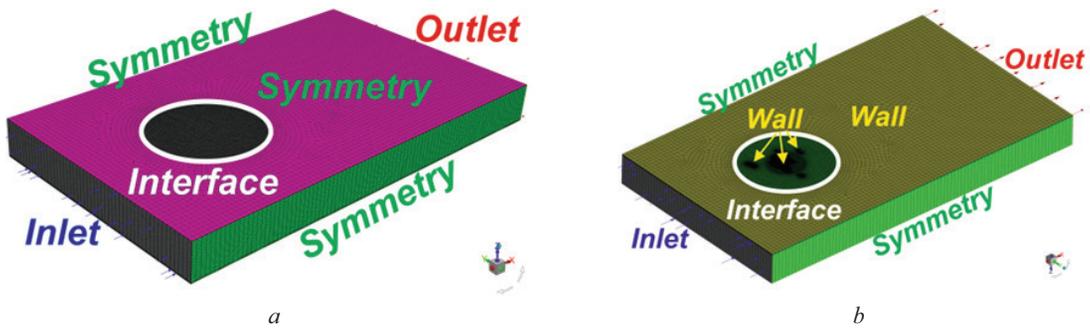


Рис. 9. Конечно-объемная сетка с указанием граничных условий для CFD-моделирования: вид сверху (a) и вид снизу (b)
 Fig. 9. Finite-volume mesh showing boundary conditions for CFD modelling: top view (a) and bottom view (b)

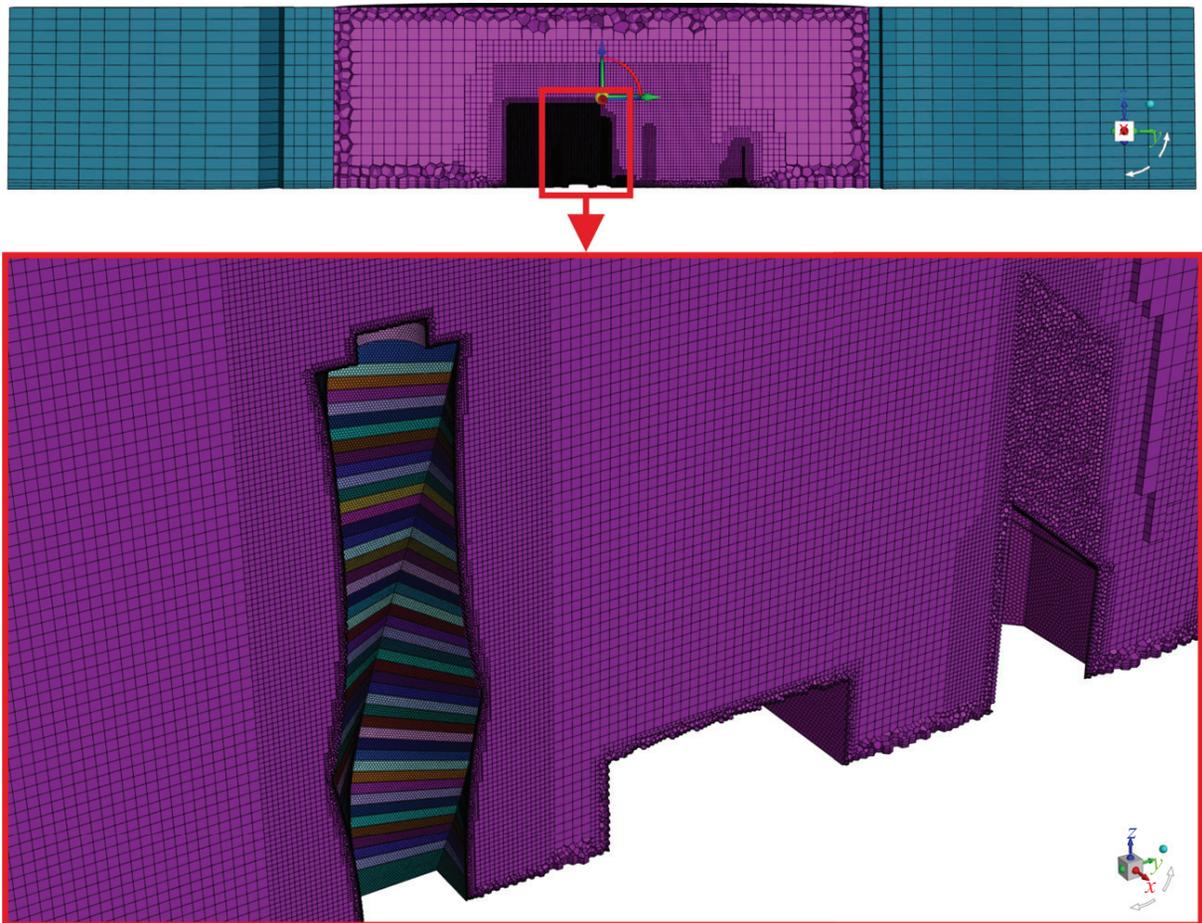


Рис. 10. Разрез конечно-объемной сетки вблизи башни «Эволюция»
 Fig. 10. Finite-volume grid section in the vicinity of the “Evolution” tower

молл Сити», «Capital Towers», «Сбербанк-Сити», «One Tower» (перспективное здание в застройке комплекса).

В процессе выполнения нестационарных аэродинамических расчетов одним из наиболее критичных параметров является величина временного шага и размеров конечно-объемной сетки. Правильный выбор шага по времени и размеров конечно-объемной сетки оказывает значительное влияние на точность и эффективность моделирования сложных физических процессов, таких как вихреобразование

и турбулентность. В частности, данные параметры будут влиять на степень разрешения спектра турбулентных пульсаций. В LES-моделировании размер элемента служит неявным фильтром, отделяющим крупномасштабные вихри, которые разрешаются непосредственно от маломасштабных вихрей, моделируемых на основе подсеточной модели турбулентности. Нестационарная вихререзающая постановка позволяет напрямую определить статистические характеристики искомых величин при условии разрешения около 80 % спектра кинетической энергии

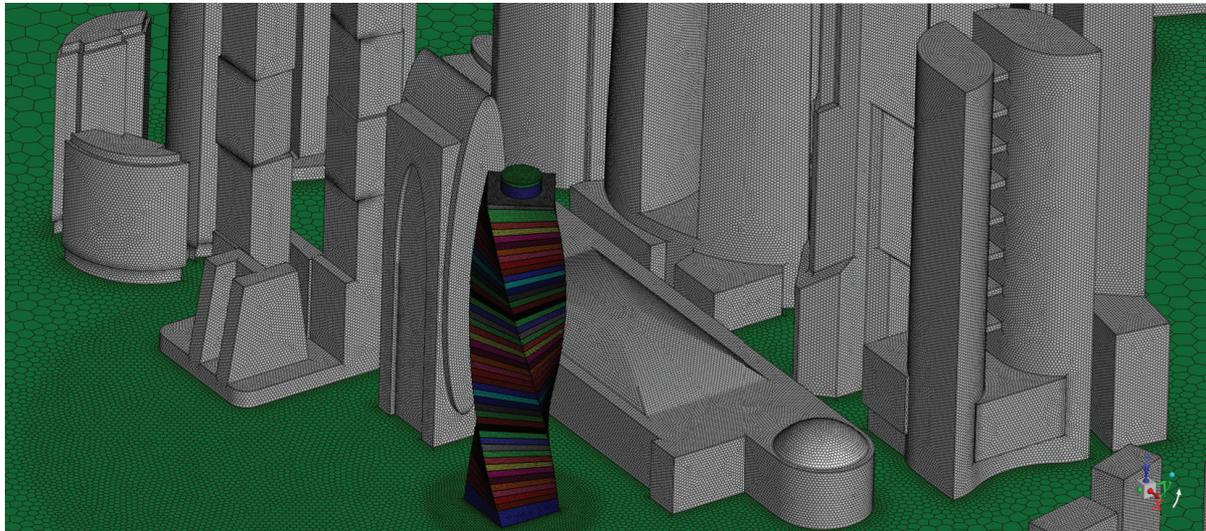


Рис. 11. Поверхностная конечно-объемная сетка на зданиях комплекса ММДЦ «Москва-Сити»

Fig. 11. Surface finite-volume mesh on the buildings of the MIBC “Moscow-City”

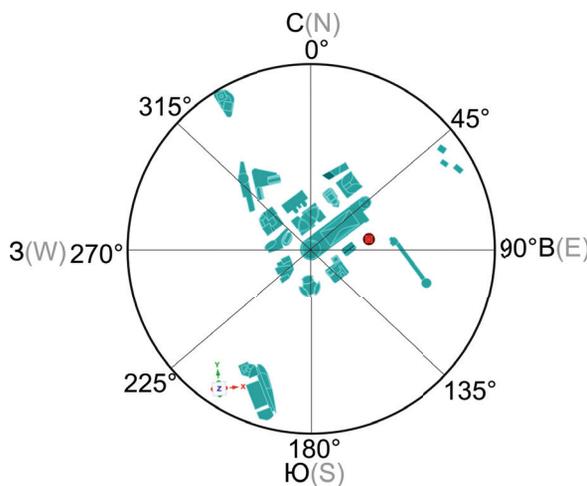


Рис. 12. Направления углов атаки ветра, для которых проводилось CFD-моделирование и моделирование динамического отклика башни «Эволюция» (здание отмечено красным цветом)

Fig. 12. The directions of wind attack angles for which CFD modelling and dynamic response simulations of the “Evolution” tower were performed (the building is marked in red)

турбулентности вне пристеночных областей. Данный параметр будет особенно сильно влиять на степень разрешения спектров аэродинамических сил, поскольку колебательный характер ветрового воздействия будет напрямую зависеть от степени разрешения кинетической энергии турбулентности. Определение величины разрешения спектра турбулентных пульсаций возможно следующим способом:

$$E(k) \% = \frac{\overline{k_{\text{разп}}}}{\overline{k_{\text{общ}}}} \cdot 100 \% = \frac{\overline{k_{\text{разп}}}}{\overline{k_{\text{разп}} + k_{\text{SGS}}}} \cdot 100 \%, \quad (16)$$

где $\overline{k_{\text{разп}}}$ — разрешенная кинетическая энергия турбулентности, осредненная за характерный промежу-

ток времени, определяемый как $\overline{k_{\text{разп}}} = \frac{1}{2} \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u'_i(t) \times u'_i(t) dt = \frac{1}{2} (u_{i, \text{RMSE}}^2)$, $u'_i(t)$ — пульсационная i -я компонента скорости; k_{SGS} — подсеточная турбулентная кинетическая энергия, k_{SGS} будет определяться как $k_{\text{SGS}} = \left(\frac{v_{\text{SGS}}}{C_k \Delta} \right)^2$; v_{SGS} — вихревая вязкость, определяемая по подсеточно-масштабной модели WALE; C_k — константа модели; Δ — размер конечного объема ячейки.

Разрешение спектра турбулентных пульсаций является изменяемым во времени параметром, поэтому для его оценки необходимо осреднение за характерный промежуток времени. В данном случае в качестве характерного промежутка времени принят $T = 5/f$ характерного периода колебательного процесса, связанный с частотой срыва вихрей f для башни «Эволюция», взятого со спектров аэродинамических сил.

В анализе нестационарных сигналов один из важных параметров — распределение мощности сигнала по частотам. Она показывает, сколько мощности содержится в сигнальных компонентах на каждой частоте, позволяя понять, какие частоты доминируют в сигнале. В аэродинамических процессах это играет роль определения доминирующих частот, приводящих к резонансным эффектам. Вычисление спектральной плотности мощности (СПМ) аэродинамических сил и моментов или величин функций отклика системы (параметров НДС) производится следующим образом:

$$S(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left| \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} F(t) e^{-i2\pi ft} dt \right|^2, \quad (17)$$

где $S(f)$ (или S_j) — спектральная плотность мощности на частоте f ; T — общее время наблюдения (физическое время моделирования); $F(t)$ — временной сиг-

нал аэродинамической силы (или функций отклика системы, таких как перемещение, скорости, ускорения, внутренние усилия и т.д.).

Обычно аэродинамические спектры рисуют в безразмерном виде: $f \cdot S_f / \sigma_f^2$, где σ_f^2 — квадрат стандартного отклонения (дисперсия), которая нужна для обезразмеривания СПМ. Определять спектральную плотность мощности S_f следует с вычтенным средним значением (центрирование).

Определение оптимального временного шага обычно осуществляется на основе двух методологических подходов:

1. Первый подход основывается на необходимости захвата достаточного количества точек во временной дискретизации для высокочастотных колебаний. Например, для корректного моделирования откликов аэродинамических сил может потребоваться не менее 10–20 временных шагов на период максимальной частоты возбуждения. Часто в этих случаях также используют безразмерный параметр Струхала, который характеризует частоту образования и срыва вихрей и может служить для оценки резонансных эффектов. Данный подход можно применять для оценочных расчетов наиболее энергоемкой части спектра пульсаций, однако для более детального расчетного анализа и учета высокочастотной составляющей спектра этот принцип назначения шага по времени оказывается некорректным.

2. Второй подход основан на выполнении критерия устойчивости численного решения Куранта – Фридрихса – Леви (CFL). Для явных численных схем интегрирования этот критерий строго ограничивает выбор временного шага, в то время как для неявных схем могут допускаться более высокие значения числа CFL. Однако для разрешения спектра пульсаций будет недостаточно использования неявной схемы интегрирования с более высоким значением CFL. Для гибридного RANS-LES подхода следует обеспечить $CFL < 1$ в области LES-уравнений и $CFL < 5$ в области RANS-уравнений. В настоящей работе для назначения временного шага моделирования был использован именно данный подход, шаг по времени составляет 0,05 с.

Общее время моделирования определяется исходя из длительности распространения волнового фронта через всю расчетную область, а также дополнительного времени, необходимого для достижения устойчивого режима течения, и составило 200 с. На входе (Inlet): $\frac{dp}{dn} = 0$, $u_\tau = 0$, $u_n = U(z) = U_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha$, где $U_{10} = \sqrt{2\gamma_r k_{10} w_0 / \rho_{air}}$ — средняя скорость на высоте 10 м; k_{10} , α — коэффициенты типов местности (табл. 11.3 в СП 20). В данном расчете рассматривается первый ветровой район типа местности С, согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». Численная схема: связанный алгоритм (Coupled algorithm), решатель: Pressure-Based, временная аппроксимация: Bounded Second Order Implicit.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Далее представлены результаты CFD-моделирования для комплекса зданий ММДЦ «Москва-Сити».

На рис. 13 приведены результаты CFD-моделирования для угла атаки 225° , на которых показаны изоповерхности завихренности (трехмерные поверхности, на которых значение завихренности ($\vec{\omega} \equiv \text{rot}(\vec{u}) \equiv \vec{\nabla} \cdot \vec{u}$) остается постоянным) с отображением на них кинетической энергии турбулентности (обозначаемой как ТКЕ (Turbulence Kinetic Energy) или k) для физического времени моделирования $t = 50,1$ с, $\text{м}^2/\text{с}^2$. Данные результаты интересны с точки зрения выявления областей с высокой турбулентностью. Эти зоны могут указывать на места, где происходят интенсивные перемешивания или где конструкция подвергается повышенным динамическим (пульсационным) воздействиям, а также для понимания взаимодействия потока с объектами. В контексте высотных зданий это помогает оценить, как ветровые потоки обтекают сооружение и где возникают значимые турбулентные эффекты.

На рис. 14 показаны линии тока для угла атаки 225° при физическом времени моделирования $t = 200$ с. Данные линии являются семейством кривых, касательные векторы которых составляют векторное поле скорости потока. Они показывают направление, в котором будет перемещаться безмассовый элемент жидкости или газа в любой момент времени, и определяются как:

$$\frac{dx}{u_x} = \frac{dy}{u_y} = \frac{dz}{u_z}.$$

На рис. 15 представлено сечение конечно-объемной сетки на высоте 120 м с изополями функции переключателя f_s (моделирование вихрей со смешанным напряжением) для физического времени моделирования $t = 200$ с при угле атаки ветра 0° , где значения на изополях 0 — это области, в которых поток разрешается моделью турбулентности LES, а 1 — это области, в которых поток моделируется RANS-моделями турбулентности (см. уравнение (13)). Данный параметр показывает области, где будет непосредственно разрешен спектр турбулентных пульсаций.

На рис. 16 показаны изополя чисел Куранта для физического времени $t = 200$ с при угле атаки 0° . В вычислительной гидродинамике (CFD) при решении нестационарных (зависящих от времени) задач крайне важно анализировать распределение чисел Куранта по расчетной области. CFL — это безразмерный параметр, определяемый как $CFL = u\Delta t/\Delta x$, где u — локальная скорость потока в данной точке; Δt — шаг по времени; Δx — размер конечно-объемной сетки в пространстве.

На рис. 17 представлены изополя скорости и статического давления потока на высоте 120 м для физического времени моделирования $t = 200$ с при угле атаки ветра 0° .

На рис. 18 показаны изополя разрешенного спектра турбулентных пульсаций на высоте 120 м для угла

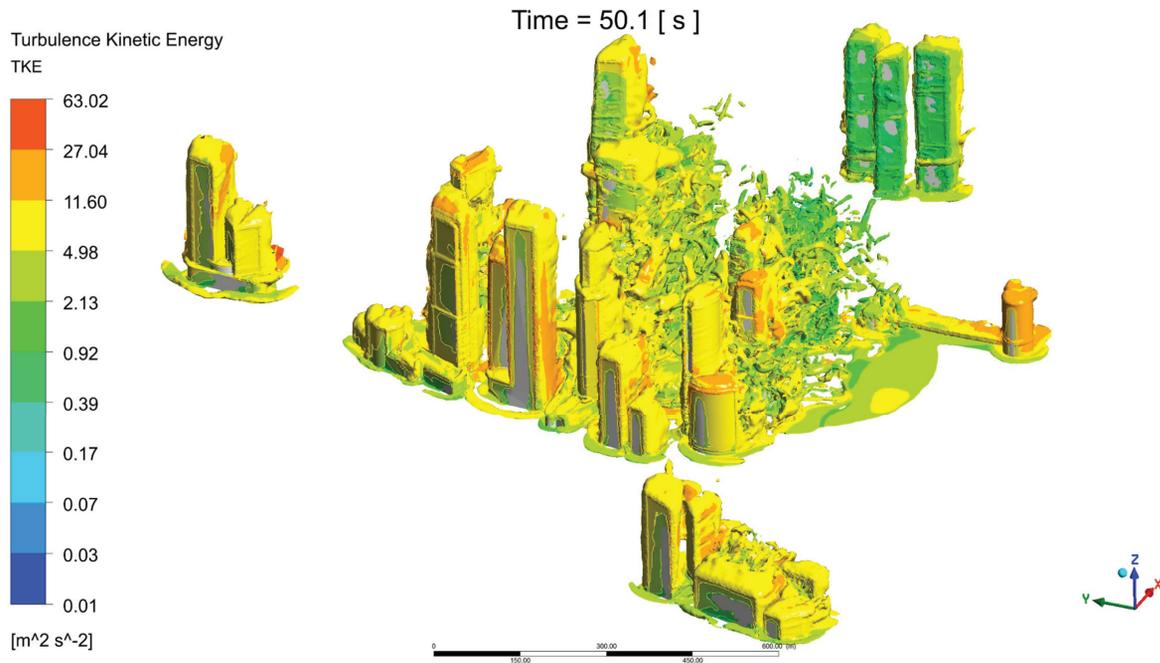


Рис. 13. Результаты CFD-моделирования (угол атаки 225°). Изоповерхности кинетической энергии турбулентности (ТКЕ) для физического времени моделирования $t = 50,1$ с, m^2/c^2

Fig. 13. CFD modelling results (angle of attack 225°). Turbulence kinetic energy (TKE) isosurfaces for physical simulation time $t = 50.1$ s, m^2/s^2

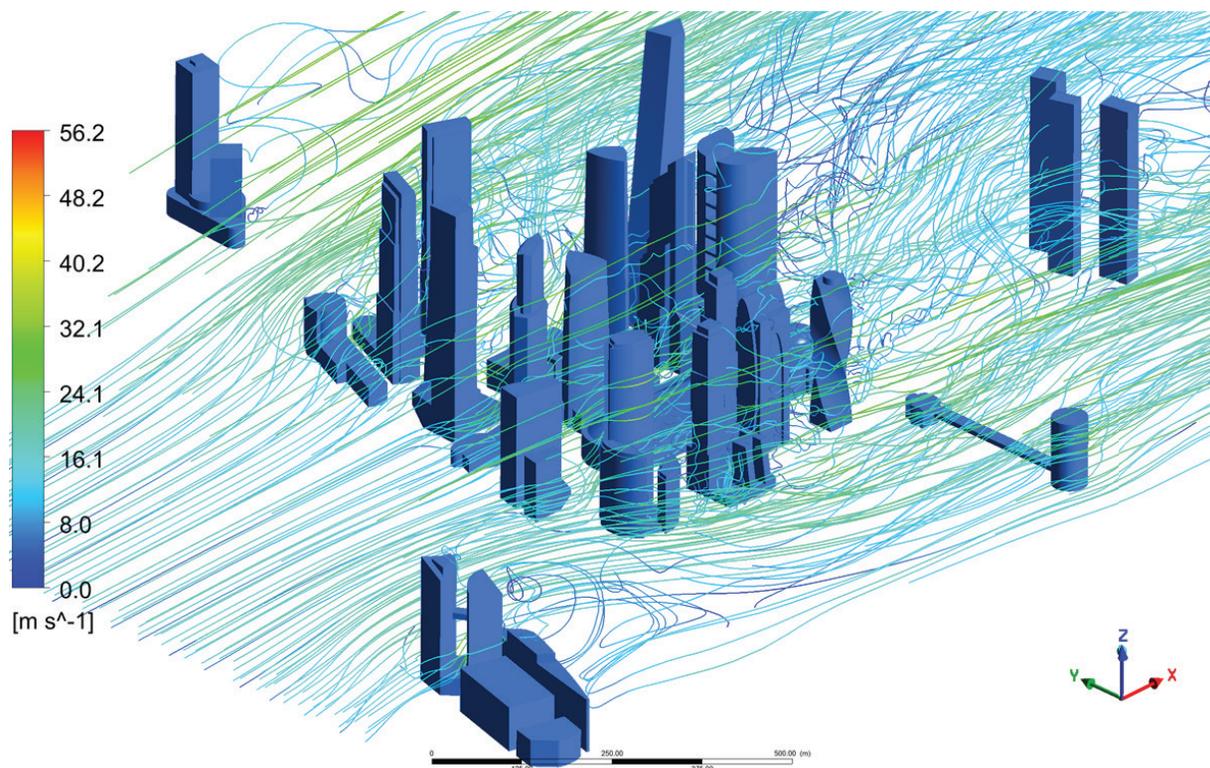


Рис. 14. Линии тока для угла атаки 225° при физическом времени моделирования $t = 200$ с комплекса ММДЦ «Москва-Сити», м/с

Fig. 14. Streamlines for the angle of attack 225° at physical modelling time $t = 200$ s of the MIBC “Moscow City”, m/s

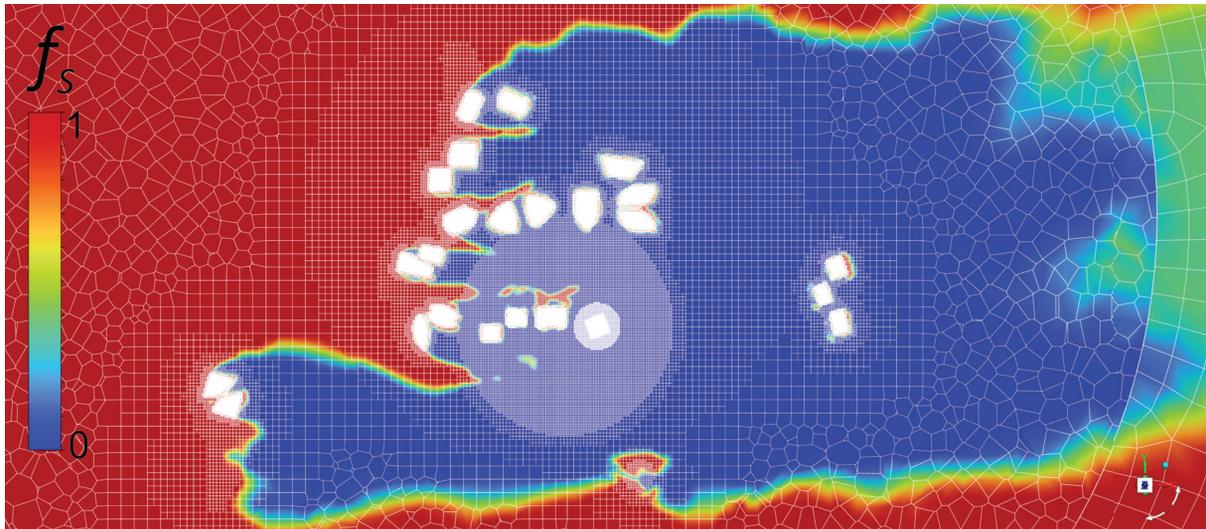


Рис. 15. Изополя функции переключателя f_s (моделирование вихрей со смешанным напряжением) на высоте 120 м для физического времени моделирования $t = 200$ с, где 0 — это области, в которых поток разрешается моделью турбулентности LES, а 1 — это области, в которых поток моделируется RANS-моделями турбулентности

Fig. 15. Isofield of the switch function f_s (mixed-stress eddy simulation) at 120 m altitude for physical simulation time $t = 200$ s, where 0 are regions where the flow is resolved by the LES turbulence model and 1 are regions where the flow is simulated by RANS turbulence models

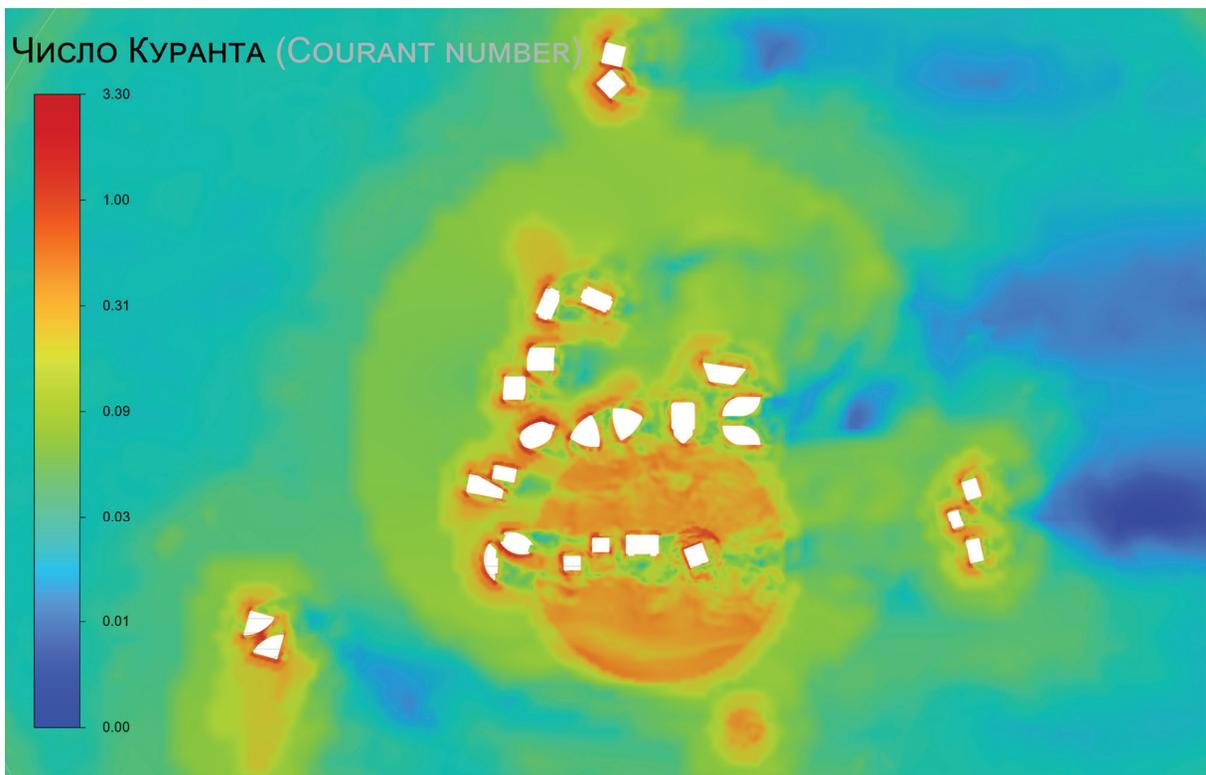


Рис. 16. Изополя чисел Куранта на высоте 120 м для физического времени моделирования $t = 200$ с

Fig. 16. Isofield of Courant numbers at a height of 120 m for physical simulation time $t = 200$ s

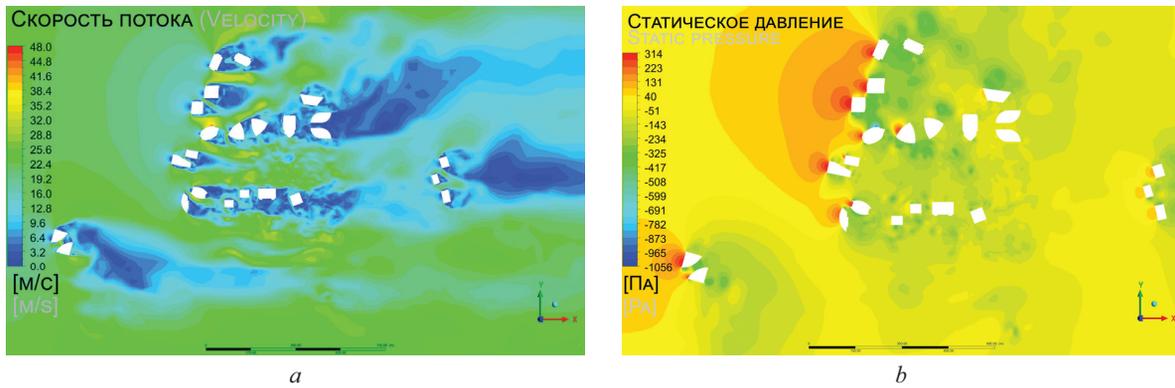


Рис. 17. Изополя скорости потока (а) и статического давления (b) на высоте 120 м, м/с

Fig. 17. Isofield of flow velocity (a) and static pressure (b) at 120 m height, m/s

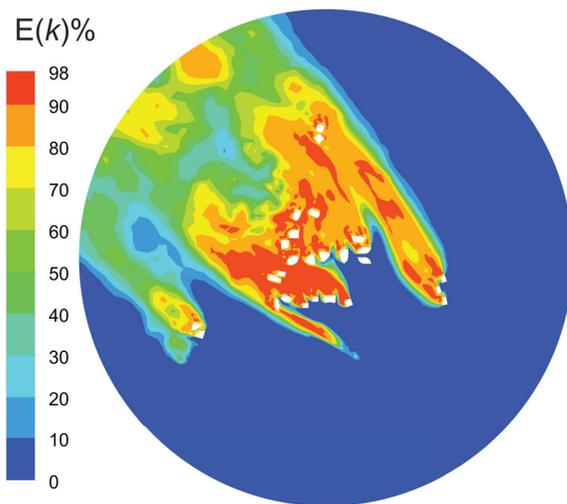


Рис. 18. Изополя разрешенного спектра турбулентных пульсаций на высоте 120 м, %

Fig. 18. Isofield of the resolved spectrum of turbulent pulsations at a height of 120 m, %

атаки ветра 0° . Этот параметр определяется согласно уравнению (16). В функционале ANSYS Fluent есть возможность проводить выборку данных для временной статистики. С помощью данного функционала вычисление разрешенного спектра турбулентных пульсаций выполнялось следующим образом:

$$E(k) \% = \frac{\frac{1}{2} \text{RMSE}(u_i)^2}{\text{mean}(TKE) + \frac{1}{2} \text{RMSE}(u_i)^2} \cdot 100 \%$$

В результате CFD-моделирования башни «Эволюция», являющейся частью ММДЦ «Москва-Сити», были рассчитаны суммарные поэтажные силы, которые в дальнейшем будут применены как вектор внешних нагрузок в механической модели в уравнениях (1), (2) и (5). Рассмотрено 8 углов атаки ветра (с шагом 45°), схема которых приведена на рис. 12. В статье далее приведены результаты для 3 характер-

ных углов атаки ветра: 0 , 45 и 225° . Физическое время моделирования составляло 200 с, однако для численного моделирования динамического отклика были взяты последние 150 с времени, так как первые 50 с отброшены из-за периода стабилизации потока при CFD-моделировании. Схема приложения нагрузок на конечно-элементную модель башни «Эволюция» представляла собой следующий порядок:

- для задачи прямой динамики на первых итерациях отключались силы инерции для приложения собственного веса и полезной нагрузки во избежание осцилляций, вызванных приложением нагрузки за малый промежуток времени;
- далее обнулялись первые числовые значения векторов внешних нагрузок F_x , F_y и M_z , чтобы избежать эффекта мгновенного приложения ветровой нагрузки, включались силы инерции и запускался прямой динамический расчет.

Представлены аэродинамические силы на башню «Эволюция», полученные с учетом аэродинамической интерференции с окружающей застройкой.

На графиках (рис. 19–22) видно, что аэродинамические силы сильно зависят от угла атаки ветра. Особенно заметно, что разные углы атаки приводят к значительным колебаниям значений, что указывает на изменчивость ветрового давления в зависимости от направления. Например, при углах 0 и 90° колебания силы имеют разную амплитуду, что говорит о сложном взаимодействии ветра с геометрией башни, а также окружающей застройкой. Значение крутящего момента также меняется в зависимости от угла атаки ветра. На графиках видна значительная разница в амплитуде моментов для разных углов атаки, что указывает на то, что башня испытывает значительные крутильные колебания при определенных углах ветра, вызванных особенностью ее формы, а также сложным распределением ветровых потоков, вызванных аэродинамической интерференцией с окружающими зданиями. Стоит обратить внимание на то, что величины аэродинамических сил, перпендикулярных к ветровому фронту, имеют тот же порядок величин, что и силы вдоль направления ветра, что свидетельствует о возникновении

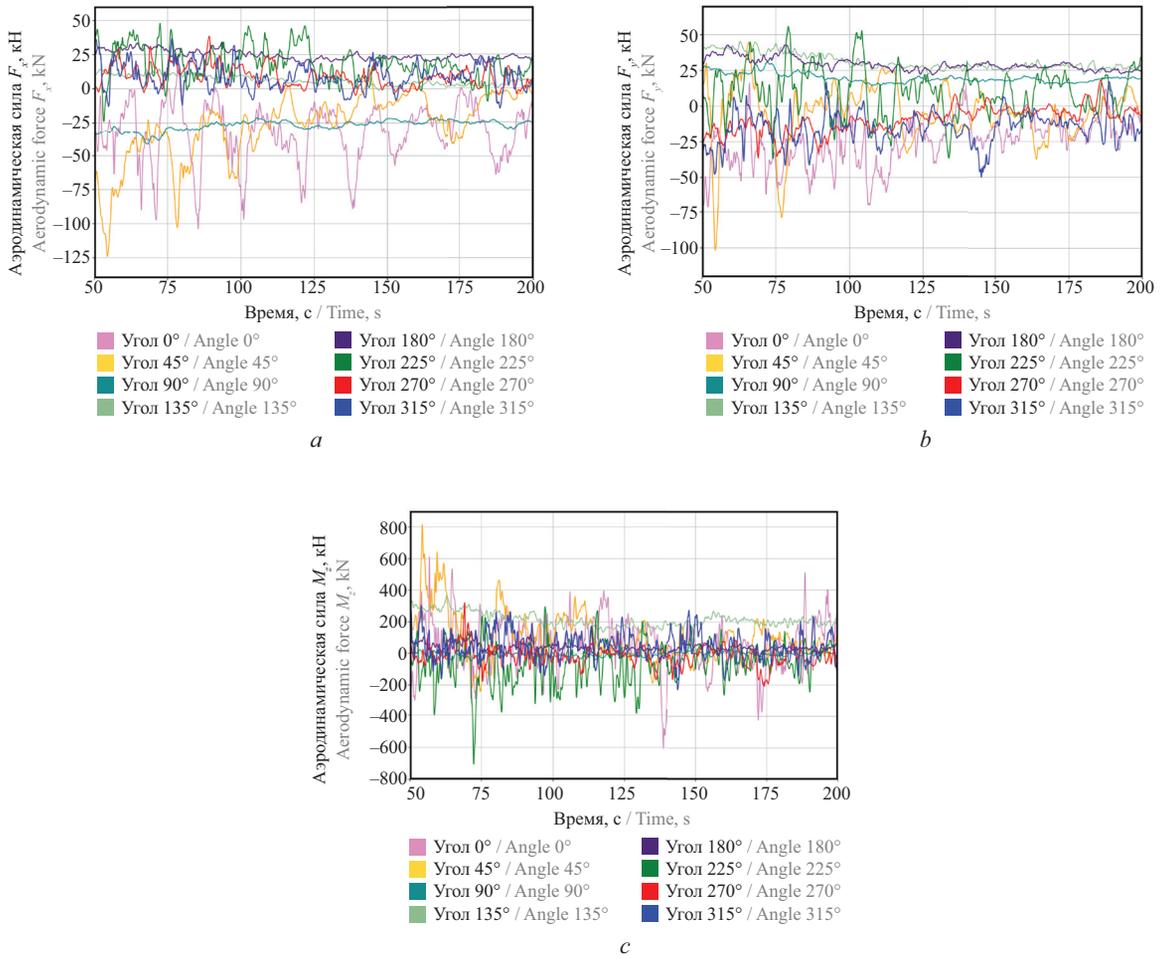
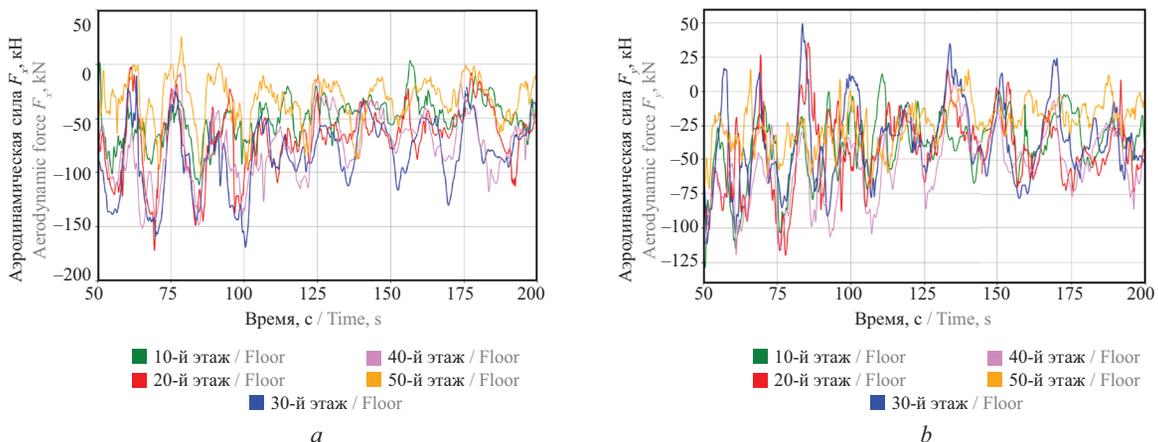


Рис. 19. Графики зависимости аэродинамических сил F_x (a); F_y (b) и моментов M_z (c) от времени для 50-го этажа башни «Эволюция» при разных углах атаки ветра

Fig. 19. Plots of aerodynamic forces F_x (a); F_y (b) and moments M_z (c) from time for the 50th floor of the “Evolution” tower at different wind attack angles

у высотных зданий колебаний в направлении, перпендикулярном направлению ветра. В отечественных нормативных документах аэродинамические силы поперек ветрового потока, а также аэродинамические крутящие моменты не учитываются.

Окружающая застройка создает сложное турбулентное течение с характерными турбулентными пульсациями, характеризующееся наличием разных пространственных масштабов. Важнейшей характеристикой турбулентности является распределение интенсивности энергии течения между составляю-



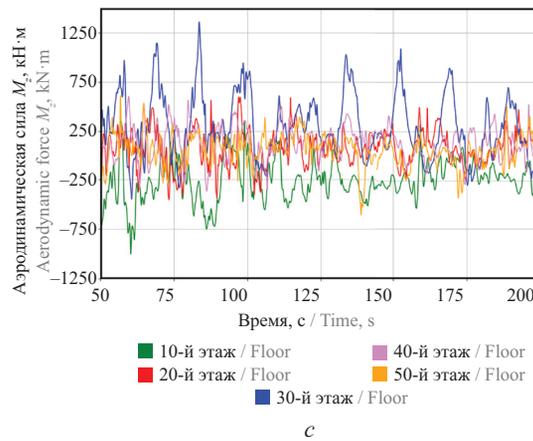


Рис. 20. Графики зависимости аэродинамических сил F_x (a); F_y (b) и моментов M_z (c) от времени для угла атаки 0° для разных этажей башни «Эволюция»

Fig. 20. Plots of aerodynamic forces F_x (a); F_y (b) and moments M_z (c) from time for angle of attack 0° for different floors of the “Evolution” tower

щими частотного диапазона. Для количественного анализа энергии турбулентных течений используется спектральное разложение процесса при помощи пре-

образований Фурье, определяющее спектральную плотность мощности изучаемого процесса. По полученным графикам зависимости аэродинамических сил

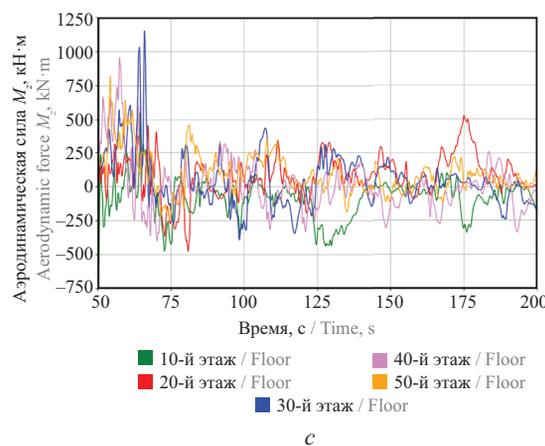
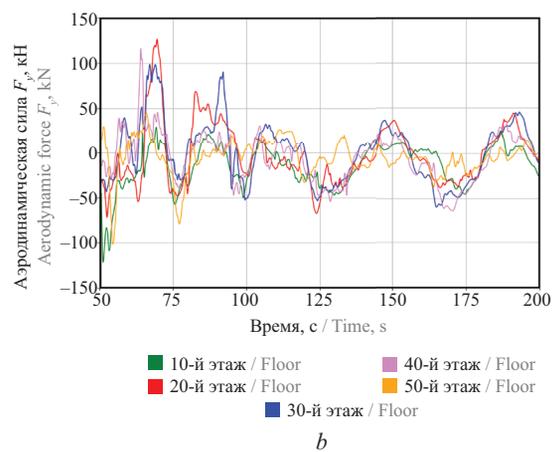
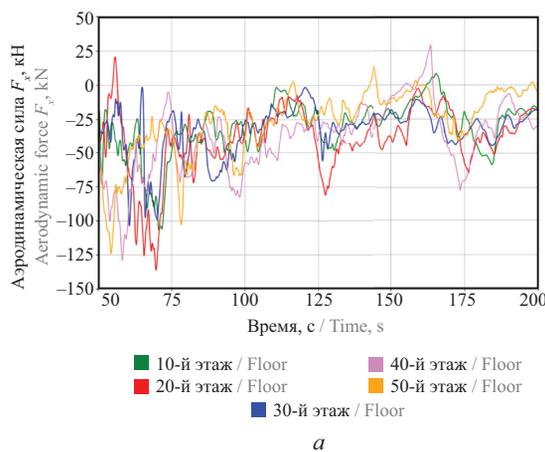


Рис. 21. Графики зависимости аэродинамических сил F_x (a); F_y (b) и моментов M_z (c) от времени для угла атаки 45° для разных этажей башни «Эволюция»

Fig. 21. Plots of aerodynamic forces F_x (a); F_y (b) and moments M_z (c) from time for angle of attack 45° for different floors of the “Evolution” tower

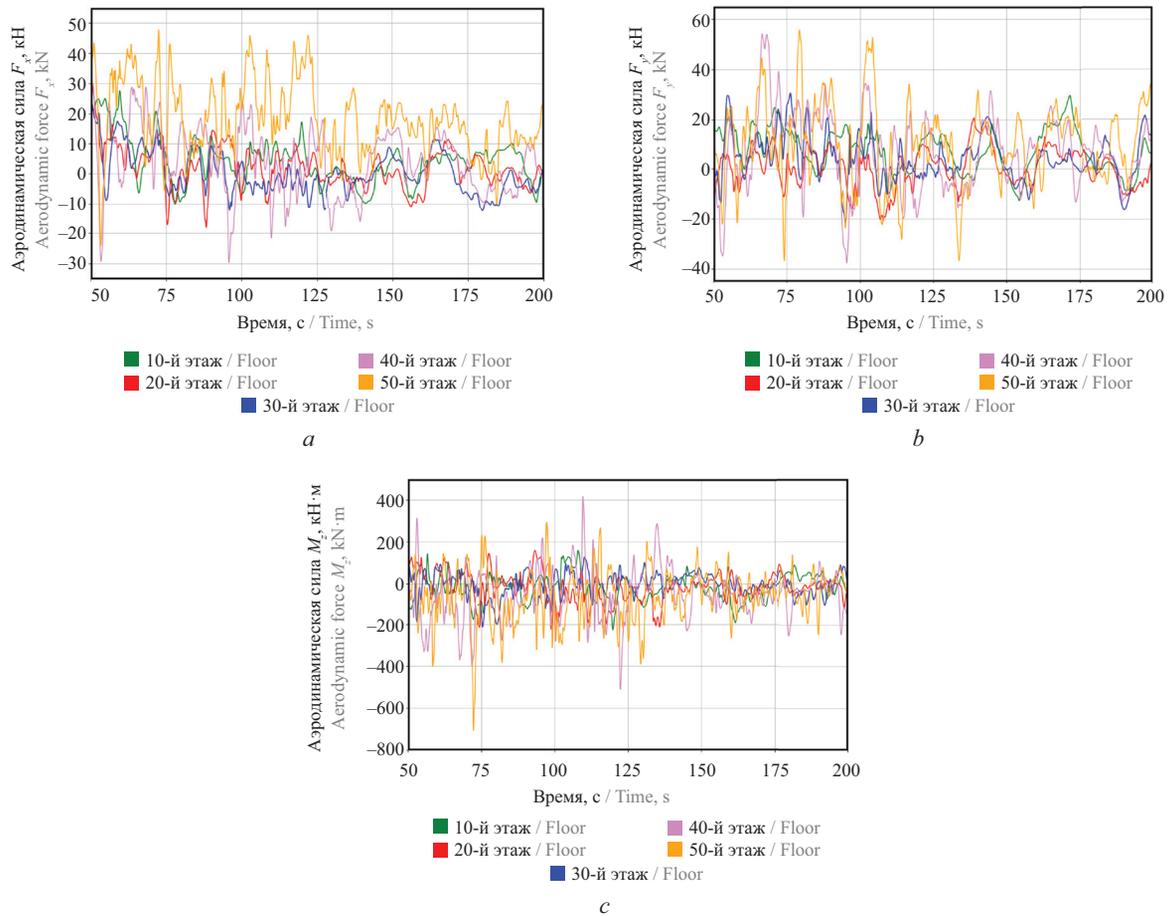
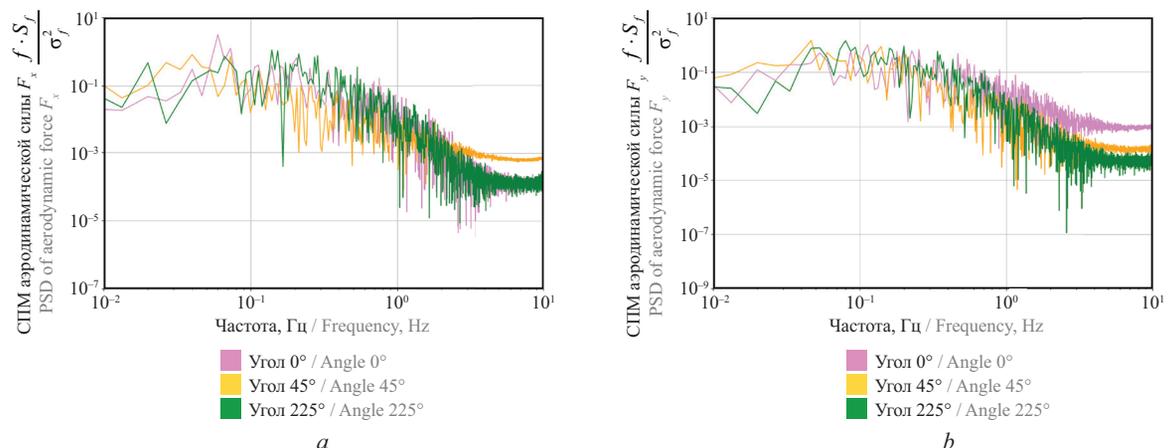


Рис. 22. Графики зависимости аэродинамических сил F_x (a); F_y (b) и моментов M_z (c) от времени для угла атаки 225° для разных этажей башни «Эволюция»

Fig. 22. Plots of aerodynamic forces F_x (a); F_y (b) and moments M_z (c) from time for angle of attack 225° for different floors of the “Evolution” tower

во времени были получены спектральные характеристики ветрового воздействия. Это важно для определения того, какие частоты вносят наибольший вклад в динамическое воздействие на здание. Знание спектра позволяет выявить частоты, на которых может возникнуть резонанс между ветровыми воздействиями и собственными частотами колебаний конструкций.

Анализ графиков спектральной плотности мощности аэродинамических сил для 50-го этажа башни «Эволюция» при разных углах атаки ветра (рис. 23) показывает, что основная часть энергии сосредоточена в низкочастотной области. Это указывает на то, что воздействие ветра имеет значительный вклад в низкочастотные колебания здания, являющиеся



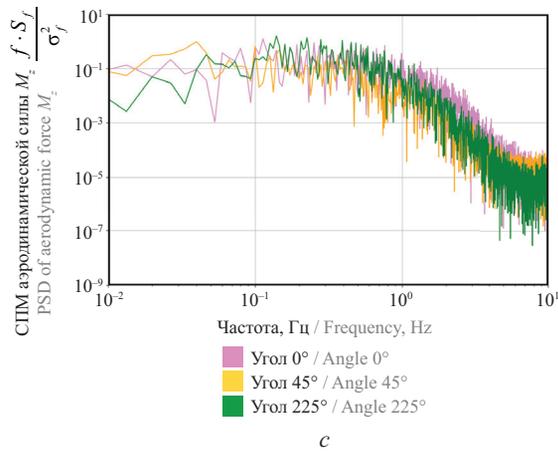


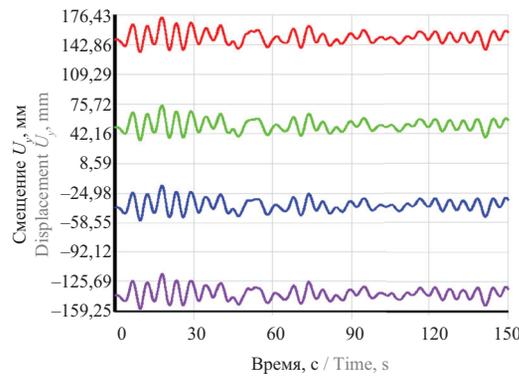
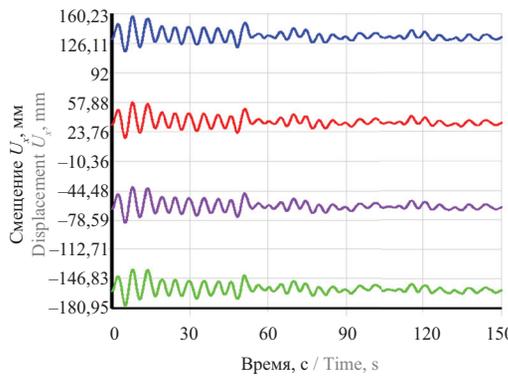
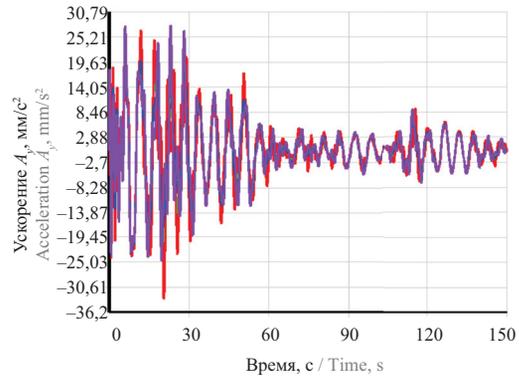
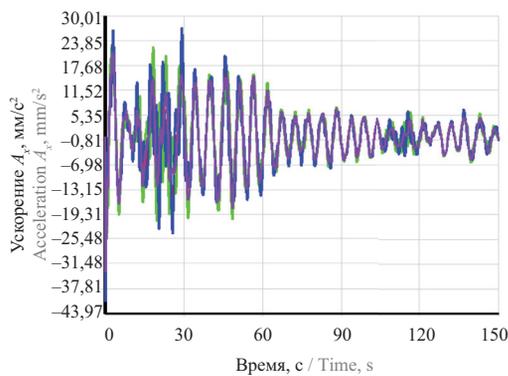
Рис. 23. Графики спектральной плотности мощности аэродинамических сил для 50-го этажа башни «Эволюция» при разных углах атаки ветра

Fig. 23. Aerodynamic forces power spectral density plots for the 50th floor of the “Evolution” tower at different wind angles of attack

общесистемными частотами и формами колебаний высотных зданий, что особенно важно для оценки динамических характеристик. При увеличении частоты происходит быстрое уменьшение мощности, что говорит о том, что высокочастотные компоненты практически незначительны для динамики ветрового воздействия на несущие конструкции. Это может означать, что здание меньше подвержено кратковре-

менным и резким воздействиям, однако низкочастотные колебания могут привести к длительным отклонениям конструкции (по низшим формам колебаний).

Ниже приведены результаты конечно-элементного моделирования динамического отклика башни «Эволюция» при разных углах атаки ветра (рис. 24–26). Для углов атаки 0, 45 и 225° представлены более расширенные результаты.



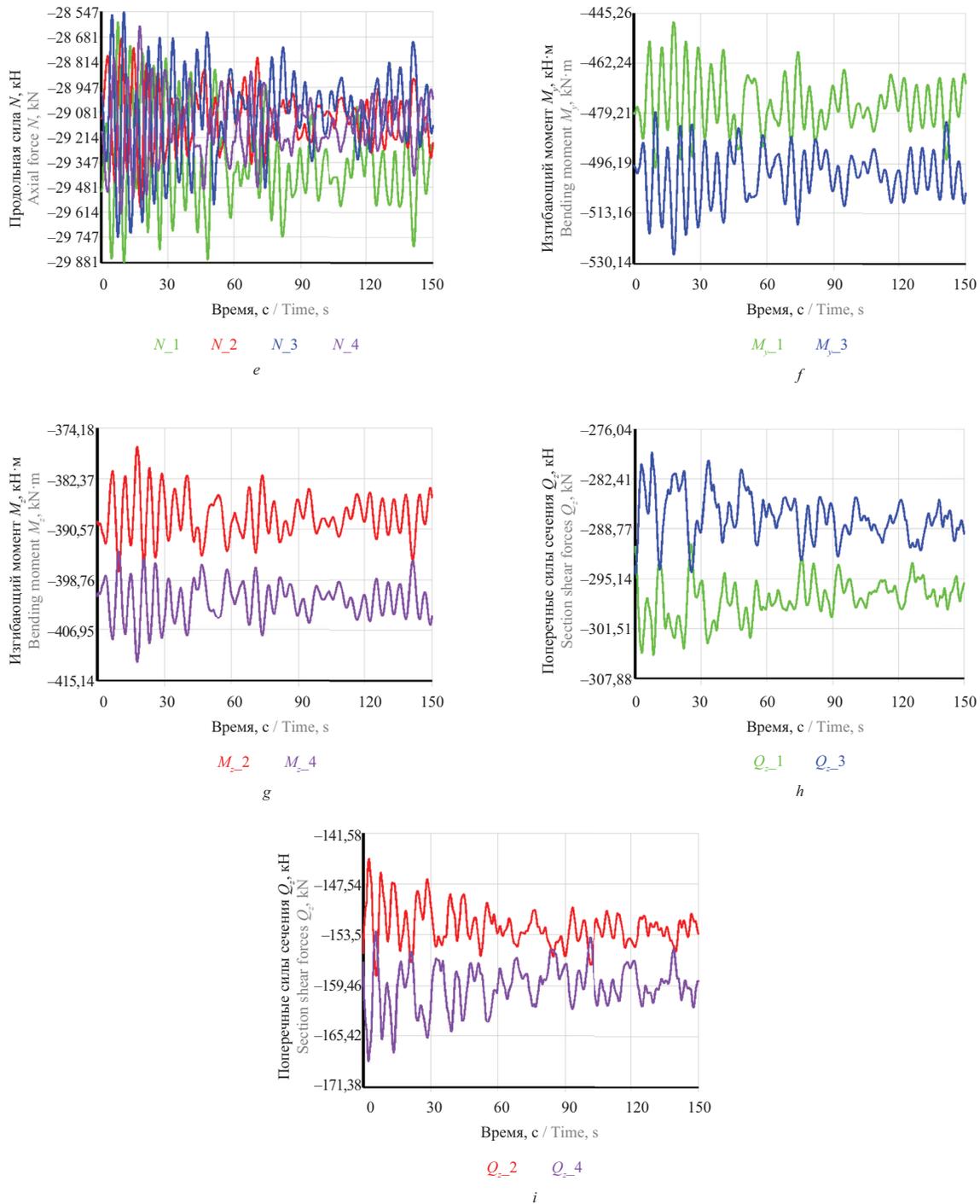


Рис. 24. Результаты прямого динамического анализа башни «Эволюция» на нестационарные ветровые воздействия для угла атаки ветра 45°

Fig. 24. Results of direct dynamic analysis of the “Evolution” tower for transient wind effects for a wind attack angle of 45°

Для большей информативности результаты приведены в виде круговых (лепестковых) диаграмм (рис. 27). На основе круговой диаграммы можно отметить, что аэродинамическая интерференция значительно влияет на динамический отклик, причем анализ показывает, что не всегда эффекты экранирования потока приводят к защите зданий от ветровых воздействий. Для скоростей и ускорений средние ве-

личины равны 0 и не приведены на круговых (лепестковых) диаграммах.

Далее приведен спектр реакции башни «Эволюция» на ветровые воздействия, который представляет собой СПМ для ускорений (рис. 28, a, b) и перемещений (рис. 28, c, d) (по осям X и Y) при различных характерных углах атаки ветра (0, 45 и 225°), а также продольного усилия колонны № 1 (рис. 28, e). Влияние

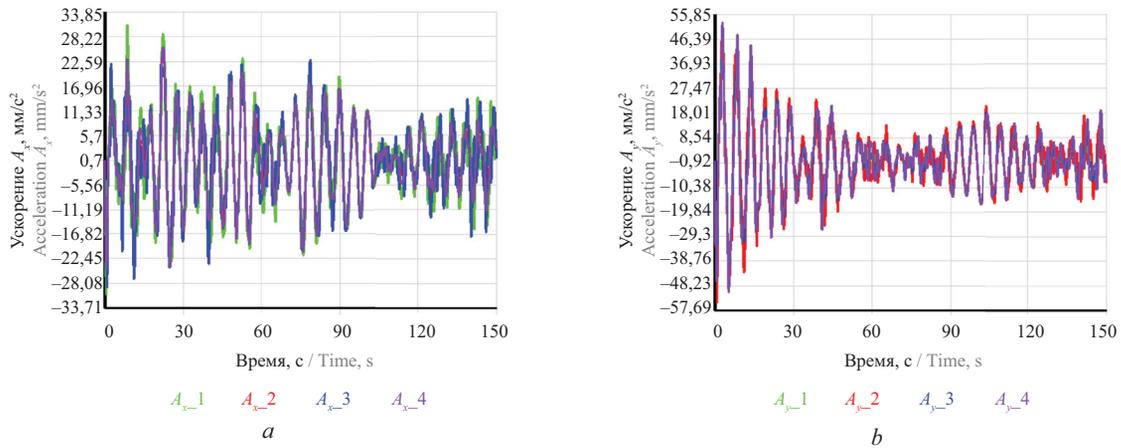


Рис. 25. Ускорение верхнего этажа башни «Эволюция» при ветровых воздействиях при угле атаки ветра 0°

Fig. 25. Acceleration of the top floor of the “Evolution” tower under wind effects at a wind attack angle of 0°

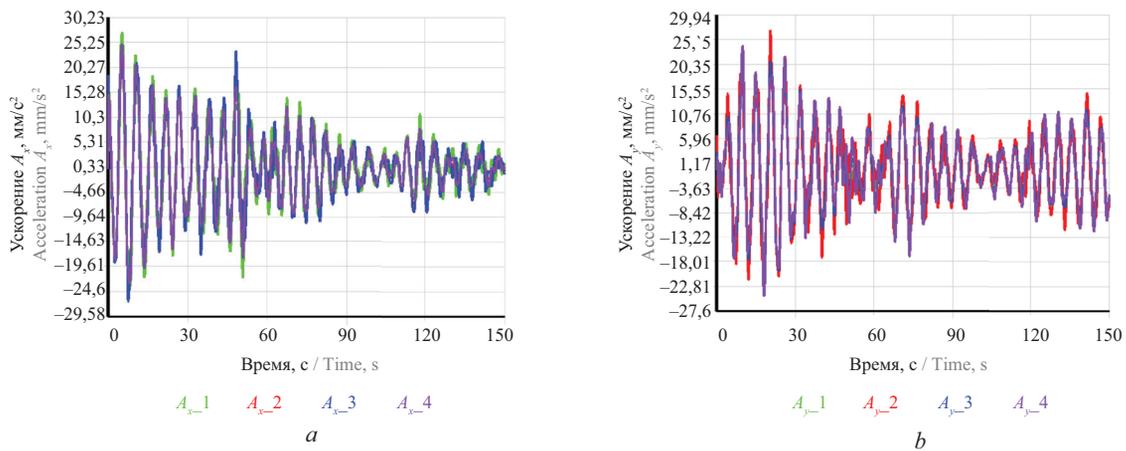
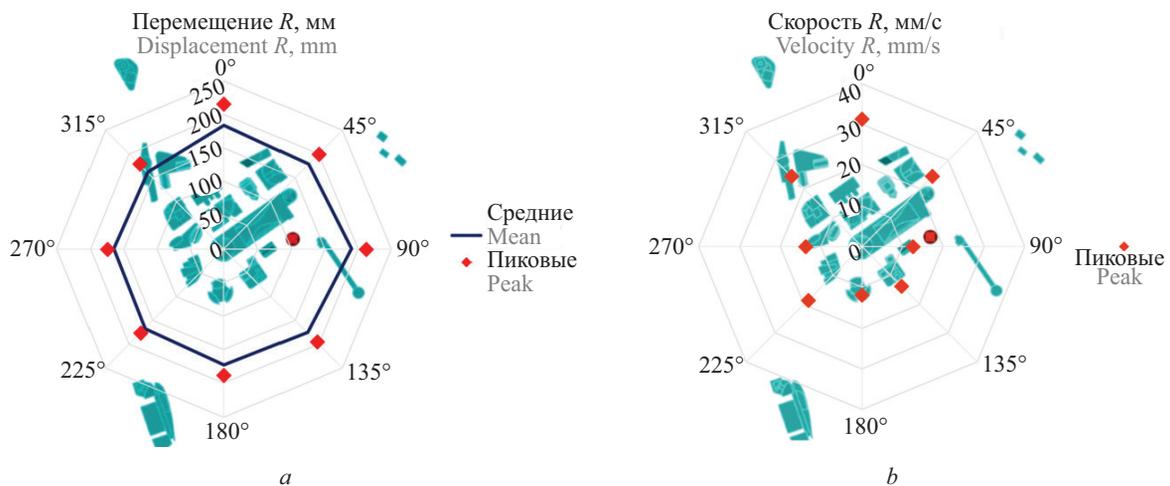


Рис. 26. Ускорение верхнего этажа башни «Эволюция» при ветровых воздействиях при угле атаки ветра 225°

Fig. 26. Acceleration of the top floor of the “Evolution” tower under wind effects at a wind attack angle of 225°

угла атаки ветра на спектр реакции башни «Эволюция» заметно на всех графиках. При разных углах наблюдаются различные пики в спектральных плотностях, что свидетельствует о зависимости динамической ре-

акции башни от направления ветрового воздействия. Например, на угле 45° пик в ускорениях и перемещениях отмечается в диапазоне низких частот. На всех графиках можно выделить диапазон частот от 0,1 до 1 Гц,



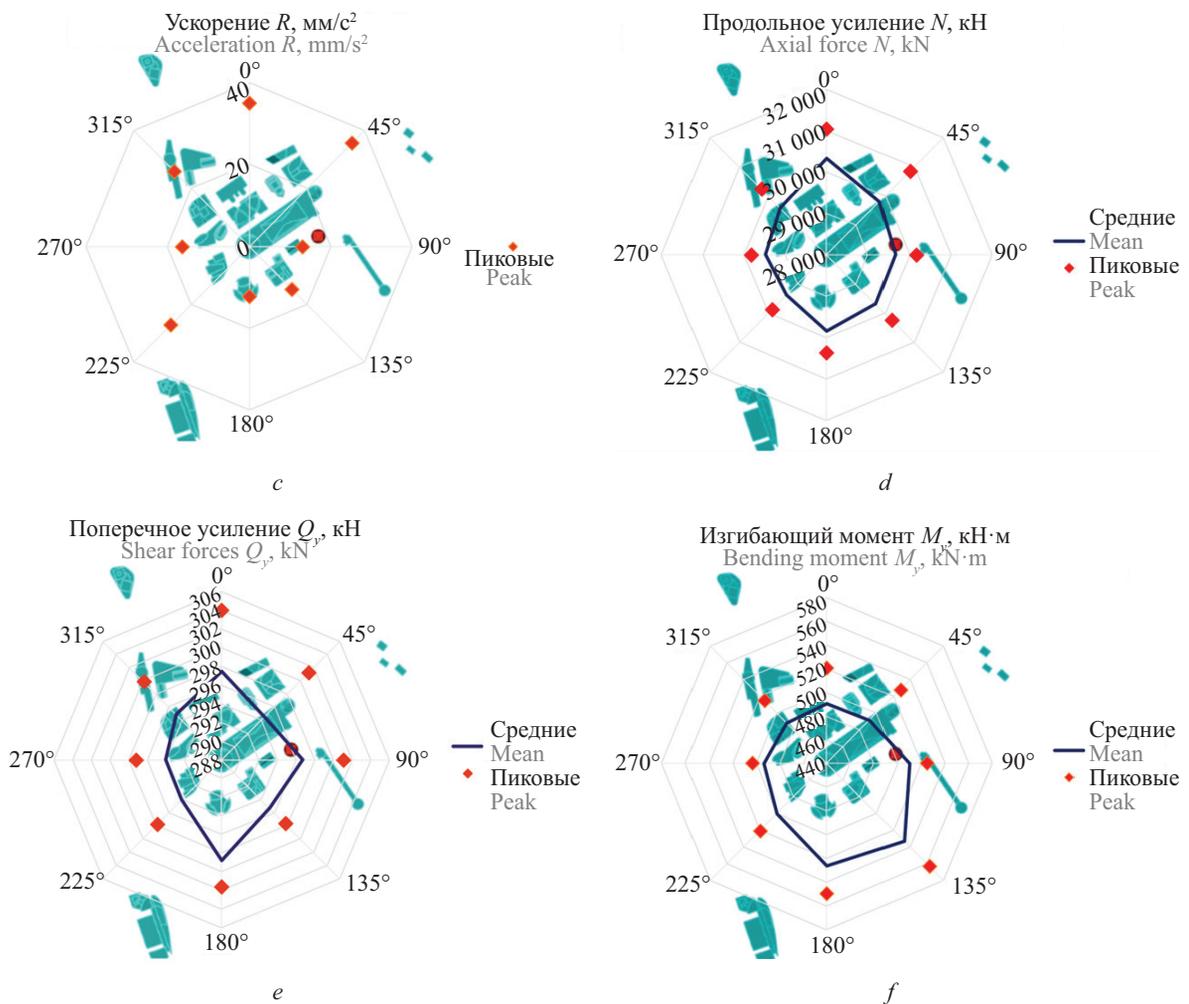
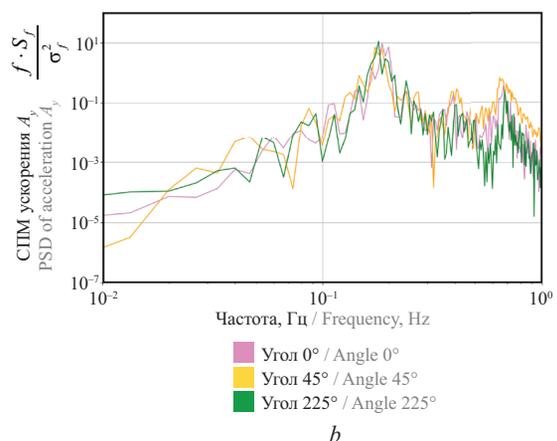
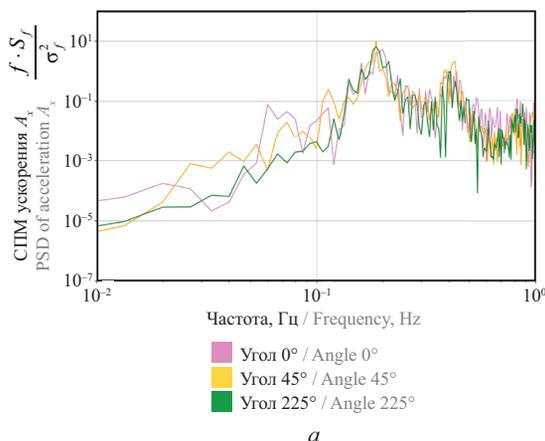


Рис. 27. Круговые (лепестковые) диаграммы динамической реакции башни «Эволюция» для разных углов атаки ветра
Fig. 27. Circle (petal) diagrams of the dynamic response of the “Evolution” tower for different wind attack angles

в котором сосредоточены основные пики (наиболее энергоемкий спектр реакций). В этом же диапазоне включены основные собственные частоты колебаний башни, которые усиливаются под воздействием ветра. Особенно заметны пики вблизи первой собственной частоты колебаний, указывающие на возможные резонансные эффекты. Начиная с определенных частот,

СПМ постепенно уменьшается, что характерно для затухающих колебаний в аэродинамической среде, где высокочастотные компоненты энергии ветра передаются менее эффективно.

Приведение отгибающих (со всех углов атаки ветра) величин (табл. 2) позволяет выявить максимальные значения реакций конструкции (перемеще-



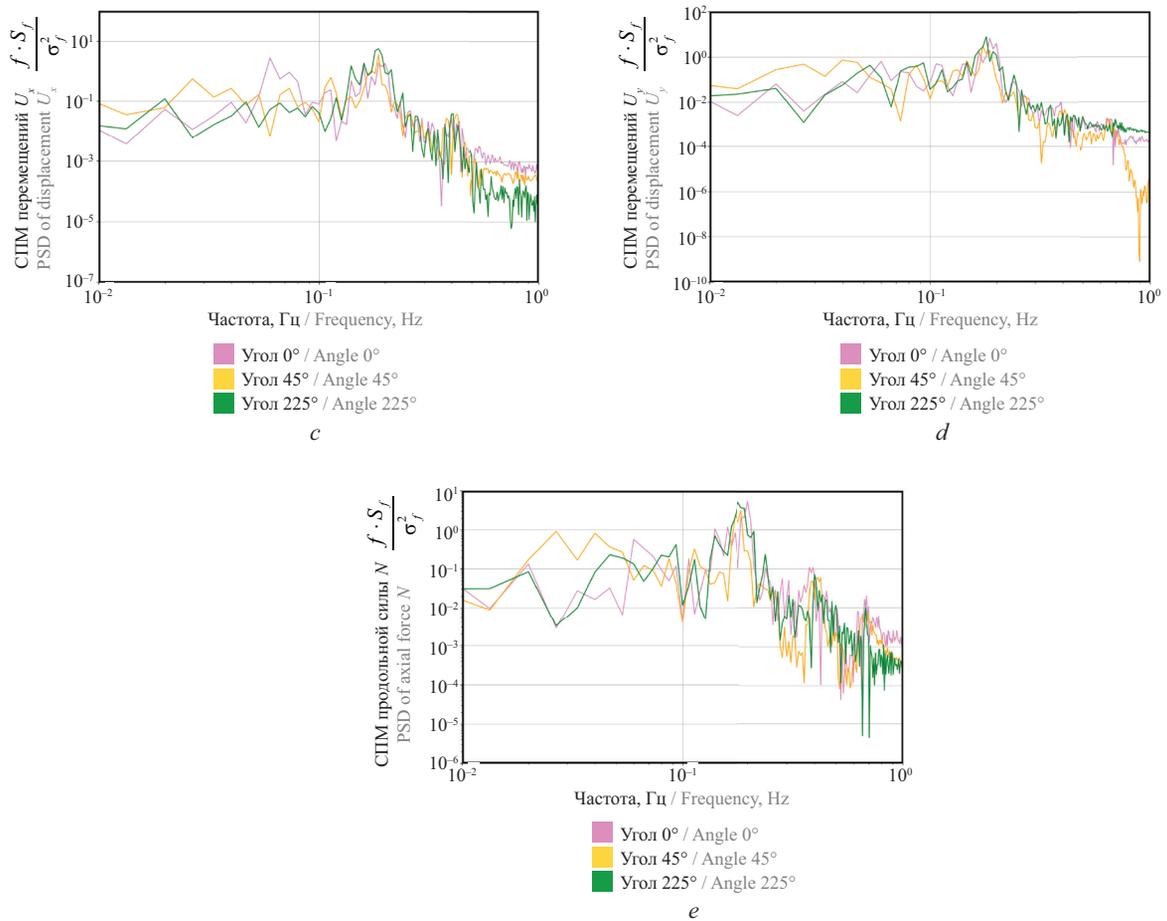


Рис. 28. Спектральная плотность мощности динамической реакции башни «Эволюция» на ветровые воздействия
 Fig. 28. Power spectral density of the dynamic response of the “Evolution” tower to wind loads

Табл. 2. Табличные результаты огибающей (со всех углов атаки ветра) динамической реакции башни «Эволюция» на ветровые воздействия

Table 2. Tabular results of the envelope (from all angles of wind attack) dynamic response of the “Evolution” tower to wind loads

Результат / Result		Точка/колонна 1 Point/column 1	Точка/колонна 2 Point/column 2	Точка/колонна 3 Point/column 3	Точка/колонна 4 Point/column 4
Перемещение R , мм Displacement R , mm	Среднее Mean	183,7	175,8	144,2	176,0
	Пик Peak	215,2	195,1	162,7	194,4
Скорость R , мм/с Velocity R , mm/s	Пик Peak	31,4	30,2	29,0	29,8
Ускорение R , мм/с ² Acceleration R , mm/s ²	Пик Peak	34,9	35,7	34,3	33,6
Продольное усилие N , кН Axial force N , kN	Среднее Mean	30 313,0	29 664,7	29 840,1	29 428,8
	Пик Peak	31 043,3	30 162,9	30 375,4	29 879,6
Поперечное усилие Q_2 , кН Shear force Q_2 , kN	Среднее Mean	56,8	170,2	55,7	166,6
	Пик Peak	62,5	174,7	60,8	173,4

Результат / Result		Точка/колонна 1 Point/column 1	Точка/колонна 2 Point/column 2	Точка/колонна 3 Point/column 3	Точка/колонна 4 Point/column 4
Поперечное усилие Q_y , кН Shear force Q_y , kN	Среднее Mean	297,4	162,1	298,8	159,4
	Пик Peak	304,1	166,6	301,6	165,7
Момент M_y , кН·м Bending moment M_y , kN·m	Среднее Mean	484,8	164,0	533,0	166,6
	Пик Peak	516,5	169,6	562,9	173,4
Момент M_z , кН·м Bending moment M_z , kN·m	Среднее Mean	662,1	393,5	640,3	409,2
	Пик Peak	677,5	403,3	645,1	416,7

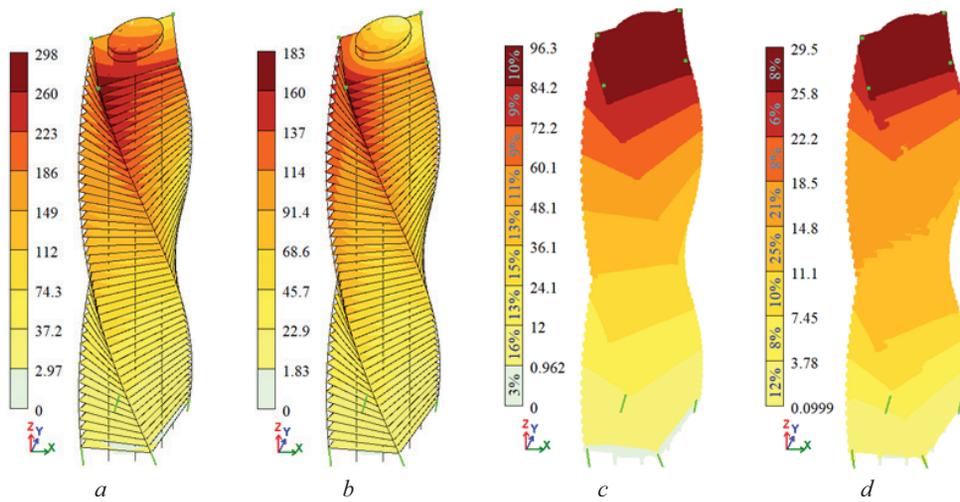


Рис. 29. Результаты динамического отклика башни «Эволюция»: *a, c* — перемещение и ускорение на среднюю и пульсационную составляющую ветра по СП 20.13330.2016; *b, d* — перемещение и ускорение на численно моделируемую среднюю и расчет пульсационной составляющей реакции согласно СП 20.13330.2016

Fig. 29. Results of the dynamic response of the “Evolution” tower: *a, c* — displacement and acceleration for the mean and gust component of wind according to CP 20.13330.2016; *b, d* — displacement and acceleration for numerically modeled mean and calculated gust component of response according to CP 20.13330.2016

Табл. 3. Табличные результаты для угла атаки ветра 225° динамической реакции башни «Эволюция» на ветровые воздействия

Table 3. Tabulated results for the wind angle of attack 225° of the dynamic response of the “Evolution” tower to wind load

Точка 3/колонна 3 Point 3/column 3 Результат Result		Предложенная методика Proposed methodology	Ли́ра-САПР (расчет по СП) Lira-SAPR (CP calculation)	Ли́ра-САПР (средняя составляющая из CFD и пульсация по СП) Lira-SAPR (average component from CFD and gust factor by CP)	Δ_{1-2} , %	Δ_{1-3} , %
Перемещение R , мм Displacement R , mm	Среднее Mean	144,15	225,59	165,21	36,10	12,75
	Пик Peak	162,65	297,34	182,81	45,30	11,03
Ускорение R , мм/с ² Acceleration R , mm/s ²	Пик Peak	34,26	90,82	27,02	62,28	21,11

Окончание табл. 3 / End of the Table 3

Точка 3/колонна 3 Point 3/column 3 Результат Result		Предложенная методика Proposed methodology	Ли́ра-СА́ПР (расчет по СП) Lira-SAPR (CP calculation)	Ли́ра-СА́ПР (средняя составляющая из CFD и пульсация по СП) Lira- SAPR (average component from CFD and gust factor by CP)	Δ_{1-2} , %	Δ_{1-3} , %
Продольное усилие N , кН Axial force N , kN	Среднее Mean	29 072,91	31 982,30	33 489,20	9,10	13,19
	Пик Peak	29 573,70	30 494,00	33 143,70	3,02	10,77
Момент M_y , кН·м Bending moment M_y , kN·m	Среднее Mean	499,52	606,27	621,51	18,26	19,63
	Пик Peak	520,52	611,11	627,23	14,14	17,01

ния, ускорения, усилия и т.д.) при воздействии ветра из любых направлений.

В табл. 3 приведены результаты (в референсной точке № 3 и колонне № 3 (см. рис. 4)) сопоставления трех вариантов определения динамической реакции башни «Эволюция» на ветровые воздействия:

- расчет согласно предложенной методике определения динамического отклика посредством прямого динамического анализа с учетом нестационарных ветровых воздействий и разрешением спектра турбулентных пульсаций (столбец 2);
- расчет средней и пульсационной составляющей реакции здания на ветровое воздействие согласно нормативному документу СП 20.13330.2016, реализованный в ПК Ли́ра-СА́ПР (столбец 3);
- расчет средней составляющей на численно моделируемые ветровые воздействия (в качестве осредненных ветровых нагрузок использованы результаты численного моделирования в ANSYS Fluent), расчет пульсационной составляющей реакции здания на ветровое воздействие согласно нормативному документу СП 20.13330.2016 (столбец 4).

Результаты динамического отклика представлены на рис. 29. Вычисленный динамический отклик в ПК SCAD дает аналогичные результатам Ли́ра-СА́ПР значения и не представлен в таблице.

Предложенная методика демонстрирует более низкие значения динамического отклика по сравнению с расчетами по СП 20.13330.2016. Использование CFD-моделирования для определения средней составляющей ветрового воздействия (с пульсационной составляющей по СП 20.13330.2016) по динамической реакции (перемещение и ускорение) показывает в целом результаты, которые находятся между предложенной методикой и расчетами по СП. Значительные различия в пиковых значениях перемещений и ускорений указывают на излишнюю консервативность расчетов по СП, в то время как численное моделирование позволяет получать более оптимальные решения, основываясь на физике процессов и учете факторов, влияющих на динамический отклик, таких

как аэродинамическая интерференция, влияние формы здания и изменения спектра набегающего потока и прочее.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработана методика численного моделирования динамического отклика высотных зданий при ветровых воздействиях с учетом аэродинамической интерференции с окружающей застройкой и разрешением спектра турбулентных пульсаций. Методика основана на сочетании нестационарного аэродинамического CFD-моделирования и прямого динамического конечно-элементного анализа. Апробация методики проведена на примере башни «Эволюция», входящей в состав Московского международного делового центра «Москва-Сити». На основе проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы.

Результаты исследования показали, что влияние окружающей застройки существенно сказывается на динамическом отклике высотных зданий при ветровых воздействиях. Эффекты аэродинамической интерференции могут приводить как к снижению ветровых нагрузок за счет экранирования, так и к их увеличению из-за усиления ветрового потока между зданиями и возникновения дополнительных турбулентных структур, вызванных срывами вихрей с близстоящих зданий. Выявлено, что при определенных направлениях ветра башня «Эволюция» испытывает более интенсивные ветровые нагрузки, что сказывается на НДС и особенно критично при учете резонансных явлений.

Анализ спектральных характеристик аэродинамических сил и моментов показал, что основная часть энергии ветрового воздействия сосредоточена в низкочастотной области, совпадающей с собственными частотами колебаний высотных зданий. Это подчеркивает необходимость точного учета низко-

частотных пульсаций ветра при проектировании высотных сооружений, так как они оказывают значительное влияние на динамический отклик и могут приводить к резонансным колебаниям. Также было отмечено, что аэродинамическая интерференция (при моделировании с разных углов атаки) может влиять на спектральный состав аэродинамических сил и моментов, что вызывает смещение энергетических пиков в частотной области при разных углах атаки ветра.

Разработаны рекомендации по выбору параметров и моделей, используемых при численном моделировании динамического отклика высотных зданий при ветровых воздействиях. Особое внимание следует уделять разрешению спектра турбулентных пульсаций и их влиянию на спектр аэродинамических сил и моментов. Применение гибридных моделей турбулентности, таких как SBES, оптимальных параметров сетки и шага по времени позволило достичь высокой степени разрешения турбулентности при моделировании турбулентных структур в условиях плотной городской застройки. Также важно использовать надежные методы прямого интегрирования уравнений движения и обоснованный подход к выбору параметров демпфирования системы для определения динамической реакции здания.

В ходе исследования построены спектры аэродинамических сил и моментов, а также спектры динамического отклика башни «Эволюция». Анализ показал, что взаимосвязь между этими спектрами сложнее, чем в подходах, реализованных в нормативных документах. Это свидетельствует о том, что существующие подходы не могут адекватно описать динамическое поведение высотных зданий под воздействием ветра.

Сравнение полученных результатов с расчетами по СП 20.13330.2016 показало, что нормативные методики являются консервативными и не учитывают сложную аэродинамику ветрового потока вокруг зданий сложной формы и влияние соседних сооружений (аэродинамическую интерференцию), а также не позволяют моделировать спектр турбулентных пульсаций ветра с достаточной точностью. Кроме того, одной из проблем нормативных подходов к определению динамического отклика зданий и сооружений является невозможность учитывать поперечные, действующие перпендикулярно ветровому потоку, а также крутильные колебания, по причине их базирования на спектре Давенпорта, описывающего энергетическое распределение турбулентных пульсаций скорости ветра вдоль направления основного ветрового потока. Предлагаемая в настоящей работе методика численного моделирования охватывает и учитывает эти проблемы и недостатки существующих нормативных методик.

Предложенная методика позволяет более точно прогнозировать динамический отклик высотных зданий на ветровые воздействия по сравнению с нормативными подходами, что имеет важное значение для обеспечения их механической безопасности и динамической комфортности. Особенно это актуально для высотных зданий со сложной геометрией и плотной застройкой, где динамические эффекты ветра могут приводить к значительным колебаниям. Рекомендуется внедрение данной методики в практику расчетных обоснований для проектирования высотных зданий, что позволит оптимизировать конструктивные решения, повысить механическую безопасность и увеличить экономическую эффективность высотного строительства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Соловьев А., Никонова Е., Герасимов А. Проектирование зданий и сооружений. М., 2022. 76 с.
2. Рыбакова Л.Ю., Балашова Е.Я. Высотные здания: проектирование, анализ и безопасность // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии : сб. статей 80-й Юбилейной Всеросс. науч.-техн. конф. 2023. С. 55–61. EDN FUXTVT.
3. Yadav H., Roy A.K. Wind-induced aerodynamic responses of triangular high-rise buildings with varying cross-section areas // Buildings. 2024. Vol. 14. Issue 9. P. 2722. DOI: 10.3390/buildings14092722
4. Shan W., Yang Q., Guo K., Chen C., Zhen W., Kim Y.C. Across-wind response characteristics of tall-square towers in urban flow: An experimental study focused on the aeroelastic effects // Physics of Fluids. 2024. Vol. 36. Issue 3. DOI: 10.1063/5.0194289
5. Abdelwahab M., Ghazal T., Nadeem K., Aboshsha H., Elshaer A. Performance-based wind design for tall buildings : review and comparative study // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 68. P. 106103. DOI: 10.1016/j.jobee.2023.106103
6. Xu Z., Yin J. The Influence of Aeroelastic Effects on Wind Load and Wind-Induced Response of a Super-Tall Building: An Experimental Study // Buildings. 2023. Vol. 13. Issue 7. P. 1871. DOI: 10.3390/buildings13071871
7. Wijesooriya K., Mohotti D., Mendis P. A technical review of computational fluid dynamics (CFD) applications on wind design of tall buildings and structures: Past, present and future // Journal of Building Engineer-

ing. 2023. Vol. 74. P. 106828. DOI: 10.1016/j.job.2023.106828

8. *Hareendran S.P., Alipour A., Shafei B., Sarkar P.* Characterizing wind-structure interaction for performance-based wind design of tall buildings // *Engineering Structures*. 2023. Vol. 289. P. 115812. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.115812

9. *Саиян С.Г., Ефимова А.М.* Расчетные аэродинамические исследования комплекса Московского международного делового центра «Москва-Сити» при последовательном возведении зданий // *Вестник МГСУ*. 2024. Т. 19. № 6. С. 906–941. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.906-941

10. *Mengistu M.T., Repetto M.P.* Analytical downburst wind load calculation methods: Review and full-scale validation // *Engineering Structures*. 2024. Vol. 321. P. 118970. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118970

11. *Zhao S., Zhang C., Dai X., Yan Z.* Review of wind-induced effects estimation through nonlinear analysis of tall buildings, high-rise structures, flexible bridges and transmission lines // *Buildings*. 2023. Vol. 13. Issue 8. P. 2033. DOI: 10.3390/buildings13082033

12. *Варибрус Д.С., Грибанов Д.С.* Методика расчета реакции сооружения на пульсации ветра // *Инновационная наука*. 2021. № 5. С. 35–37. EDN FCIXXI.

13. *Негрозова И.Ю., Афанасьева И.Ю.* Обзор аналитических и полуэмпирических подходов для анализа аэродинамической неустойчивости типа флаттер // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2023. № 1 (54). С. 119–140. DOI: 10.24866/2227-6858/2023-1/119-140. EDN MCXFEQ.

14. *Kwon D.K., Kareem A.* Hybrid simulation of a tall building with a double-decker tuned sloshing damper system under wind loads // *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2020. Vol. 29. Issue 15. DOI: 10.1002/tal.1790

15. *Илюхина Е.А., Лахман С.И., Миллер А.Б., Трапуш В.И.* Конструктивные решения высотного здания «Лахта центр» в Санкт-Петербурге // *Academia. Архитектура и строительство*. 2019. № 3. С. 110–121. DOI: 10.22337/2077-9038-2019-3-110-121. EDN MLORRC.

16. *Ding F., Kareem A.* Tall buildings with dynamic facade under winds // *Engineering*. 2020. Vol. 6. Issue 12. Pp. 1443–1453. DOI: 10.1016/j.eng.2020.07.020

17. *Саиян С.Г.* Моделирование ускорений верхних этажей высотного здания при ветровом воздействии // *Дни студенческой науки : сб. докл. науч.-техн. конф. по итогам науч.-исслед. работ студентов Института фундаментального образования НИУ МГСУ за 2019–2020 учебный год*. 2020. С. 295–298. EDN JHLVLJ.

18. *Saiyan S., Andreev V., Paushkin A.* Numerical Simulation of Accelerations of the Upper Floors of a High-Rise Building Under Wind Influence // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022. Pp. 269–279. DOI: 10.1007/978-3-031-10853-2_25

19. *Sun W., Wang X., Dong D., Zhang M., Li Q.* A comprehensive review on estimation of equivalent static wind loads on long-span roofs // *Advances in Structural Engineering*. 2023. Vol. 26. Issue 14. Pp. 2572–2599. DOI: 10.1177/13694332231190706

20. *Zhang S., Guo K., Yang Q., Xu X.* Review of wind field characteristics of downbursts and wind effects on structures under their action // *Buildings*. 2024. Vol. 14. Issue 9. P. 2653. DOI: 10.3390/buildings14092653

21. *Bruno L., Coste N., Mannini C., Mariotti A., Patrino L., Schito P. et al.* Codes and standards on computational wind engineering for structural design: State of art and recent trends // *Wind and Structures*. 2023. Vol. 37. Pp. 133–151. DOI: 10.12989/was.2023.37.2.133

22. *Мишичев Д.К.* Сравнительный анализ отечественных и зарубежных норм в части определения ветровой нагрузки на здания // *Потенциал интеллектуально одаренной молодежи — развитию науки и образования : мат. XII Междунар. науч. форума молодых ученых, инноваторов, студентов и школьников*. 2023. С. 482–485. EDN FAFZOA.

23. *Tiwari L., Asher A., Deshpande A., Murudi M.* Analysis of 150 m long wind mast using Indian code, U.S. Code & Eurocode // *AIP Conference Proceedings*. 2024. Vol. 3013. P. 030003. DOI: 10.1063/5.0204653

24. *Babalëku M., Verzivolli A., Luka R., Zgjanolli R.* Fundamental basic wind speed in Albania: An adoption in accordance with Eurocodes // *Journal of Transactions in Systems Engineering*. 2023. Vol. 1. Issue 2. Pp. 56–72. DOI: 10.1515/JTSE.2023.1.2.56-72

25. *Llanes-Tizoc M.D., Valenzuela-Beltrán F., Bojórquez E., Bojórquez J., Gaxiola-Camacho J.R., Leal-Graciano J.M. et al.* Rayleigh damping vs. modal damping matrix superposition for steel frames and evaluation of higher-mode contribution // *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 2024. DOI: 10.1007/s40996-024-01615-2

26. *Miyamoto K., She J., Sato D., Chen Y., Soriano R.D.A., Nakano S.* Wind-load estimation for seismically isolated building by equivalent-input-disturbance approach with robust-control strategy // *Control Engineering Practice*. 2024. Vol. 145. P. 105853. DOI: 10.1016/j.conengprac.2024.105853

27. *Сидоров В.Н., Бадьина Е.С., Климушкин Д.О.* Модификация функции диссипации Рэлея для численного моделирования внутреннего демпфирования в стержневых конструкциях // *Вестник МГСУ*. 2024. Т. 19. № 6. С. 960–970. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.960-970. EDN MYGSCN.

Поступила в редакцию 15 ноября 2024 г.

Принята в доработанном виде 29 ноября 2024 г.

Одобрена для публикации 29 ноября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Сергей Гургенович Саиян** — научный сотрудник Научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов им. А.Б. Золотова (НОЦ КМ им. А.Б. Золотова); **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 987238, Scopus: 57195230884, ORCID: 0000-0003-0694-4865, ResearcherID: AAT-1424-2021; Berformert@gmail.com;

Артемий Викторович Васильев — студент; **Российский государственный университет нефти и газа (Национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина (РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина)**; 119991, г. Москва, Ленинский пр-т; vasilev.artemiy@yandex.ru.

Вклад авторов:

Саиян С.Г. — научное руководство, концепция исследования, методология исследования, методика численного моделирования, разработка расчетных моделей, анализ и обработка результатов исследования, написание текста статьи, научное редактирование текста, итоговые выводы.

Васильев А.В. — сбор и анализ материалов по ММДЦ «Москва-Сити», проведение расчетных исследований, создание иллюстраций, обработка и анализ результатов исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

- Soloviev A., Nikonova E., Gerasimov A. *Design of Buildings and Structures*. Moscow, 2022; 76. (rus.).
- Rybakova L.Y., Balashova E.Y. High-rise buildings: design, analysis and safety. Traditions and innovations in construction and architecture. *Construction and construction technologies : collection of articles of the 80th Anniversary All-Russian Scientific and Technical Conference*. 2023; 55-61. EDN FUXTVT. (rus.).
- Yadav H., Roy A.K. Wind-Induced Aerodynamic Responses of Triangular High-Rise Buildings with Varying Cross-Section Areas. *Buildings*. 2024; 14(9):2722. DOI: 10.3390/buildings14092722
- Shan W., Yang Q., Guo K., Chen C., Zhen W., Kim Y.C. Across-wind response characteristics of tall-square towers in urban flow: An experimental study focused on the aeroelastic effects. *Physics of Fluids*. 2024; 36(3). DOI: 10.1063/5.0194289
- Abdelwahab M., Ghazal T., Nadeem K., Abo-shosha H., Elshaer A. Performance-based wind design for tall buildings : review and comparative study. *Journal of Building Engineering*. 2023; 68:106103. DOI: 10.1016/j.jobee.2023.106103
- Xu Z., Yin J. The influence of aeroelastic effects on wind load and wind-induced response of a super-tall building: an experimental study. *Buildings*. 2023; 13(7):1871. DOI: 10.3390/buildings13071871
- Wijesooriya K., Mohotti D., Mendis P. A technical review of computational fluid dynamics (CFD) applications on wind design of tall buildings and structures: Past, present and future. *Journal of Building Engineering*. 2023; 74(106828). DOI: 10.1016/j.jobee.2023.106828
- Hareendran S.P., Alipour A., Shafei B., Sarkar P. Characterizing wind-structure interaction for performance-based wind design of tall buildings. *Engineering Structures*. 2023; 289:115812. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.115812
- Saiyan S.G., Efimova A.M. Computational aerodynamic studies of the MIBC “Moscow-City” complex during sequential construction of buildings. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(6):906-941. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.906-941 (rus.).
- Mengistu M.T., Repetto M.P. Analytical downburst wind load calculation methods: review and full-scale validation. *Engineering Structures*. 2024; 321:118970. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118970
- Zhao S., Zhang C., Dai X., Yan Z. Review of Wind-Induced Effects Estimation through Nonlinear Analysis of Tall Buildings, High-Rise Structures, Flexible Bridges and Transmission Lines. *Buildings*. 2023; 13(8):2033. DOI: 10.3390/buildings13082033
- Varibrus D.S., Gribanov D.S. Methodology for calculating the response of a structure to wind pulsations. *Innovative Science*. 2021; 5:35-37. EDN FCIXXI. (rus.).
- Negrozova I.Yu., Afanasyeva I.N. A review of analytical and semi-empirical approaches for analysis of flutter aerodynamic instability. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2023; 1(54):119-140. DOI: 10.24866/2227-6858/2023-1/119-140. EDN MCXFQE. (rus.).
- Kwon D.K., Kareem A. Hybrid simulation of a tall building with a double-decker tuned sloshing damper system under wind loads. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2020; 29(15). DOI: 10.1002/tal.1790
- Ilyukhina E.A., Lahman S.I., Miller A.B., Travush V.I. Design solutions of the high-rise building “Lakhta center” in Saint-Petersburg. *Academia. Architecture and Construction*. 2019; 3:110-121. DOI: 10.22337/2077-9038-2019-3-110-121. EDN MLORRC. (rus.).
- Ding F., Kareem A. Tall buildings with dynamic facade under winds. *Engineering*. 2020; 6(12):1443-1453. DOI: 10.1016/j.eng.2020.07.020
- Saiyan S.G. Modeling the acceleration of the upper floors of a high-rise building under wind action. *Days of Student Science : collection of reports of the scientific*

and technical conference on the results of research work of students of the Institute of Fundamental Education of the National Research University Moscow State University of Civil Engineering for the 2019-2020 academic year. 2020; 295-298. EDN JHLVLJ. (rus.).

18. Saiyan S., Andreev V., Paushkin A. Numerical simulation of accelerations of the upper floors of a high-rise building under wind influence. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022; 269-279. DOI: 10.1007/978-3-031-10853-2_25

19. Sun W., Wang X., Dong D., Zhang M., Li Q. A comprehensive review on estimation of equivalent static wind loads on long-span roofs. *Advances in Structural Engineering*. 2023; 26(14):2572-2599. DOI: 10.1177/13694332231190706

20. Zhang S., Guo K., Yang Q., Xu X. Review of Wind Field Characteristics of Downbursts and Wind Effects on Structures under Their Action. *Buildings*. 2024; 14(9):2653. DOI: 10.3390/buildings14092653

21. Bruno L., Coste N., Mannini C., Mariotti A., Patruno L., Schito P. et al. Codes and standards on computational wind engineering for structural design: State of art and recent trends. *Wind and Structures*. 2023; 37:133-151. DOI: 10.12989/was.2023.37.2.133

22. Mishichev D.K. Comparative analysis of domestic and foreign standards in terms of determining wind load on buildings. *The potential of intellectually gifted youth — the development of science and education : materials of the XII International Scientific Forum*

of Young Scientists, Innovators, Students and Schoolchildren. 2023; 482-485. EDN FAFZOA. (rus.).

23. Tiwari L., Asher A., Deshpande A., Murudi M. Analysis of 150 m long wind mast using Indian code, U.S. Code & Eurocode. *AIP Conference Proceedings*. 2024; 3013:030003. DOI: 10.1063/5.0204653

24. Baballëku M., Verzivoli A., Luka R., Zgjanolli R. Fundamental basic wind speed in Albania: An adoption in accordance with Eurocodes. *Journal of Transactions in Systems Engineering*. 2023; 1(2):56-72. DOI: 10.15157/JTSE.2023.1.2.56-72

25. Llanes-Tizoc M.D., Valenzuela-Beltrán F., Bojórquez E., Bojórquez J., Gaxiola-Camacho J.R., Leal-Graciano J.M. et al. Rayleigh Damping vs. Modal Damping Matrix Superposition for Steel Frames and Evaluation of Higher-Mode Contribution. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 2024. DOI: 10.1007/s40996-024-01615-2

26. Miyamoto K., She J., Sato D., Chen Y., Soriano R.D.A., Nakano S. Wind-load estimation for seismically isolated building by equivalent-input-disturbance approach with robust-control strategy. *Control Engineering Practice*. 2024; 145:105853. DOI: 10.1016/j.conengprac.2024.105853

27. Sidorov V.N., Badina E.S., Klimushkin D.O. Modification of Rayleigh dissipation function for numerical simulation of internal damping in rod structures. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(6):960-970. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.960-970. EDN MYGSCN. (rus.).

Received November 15, 2024.

Adopted in revised form on November 29, 2024.

Approved for publication on November 29, 2024.

B I O N O T E S : **Sergey G. Saiyan** — researcher at the Scientific and Educational Center for Computer Modeling of Unique Buildings, Structures and Complexes named after A.B. Zolotova; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 987238, Scopus: 57195230884, ORCID: 0000-0003-0694-4865, ResearcherID: AAT-1424-2021; Berformert@gmail.com;

Artemiy V. Vasiliev — student; **National University of Oil and Gas “Gubkin University”**; 65 Leninskiy pr., Moscow, 119991; vasiliev.artemiy@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Sergey G. Saiyan — scientific guidance, research concept, research methodology, numerical modeling techniques, development of calculation models, analysis and processing of research results, writing the text of the article, scientific editing of the text, final conclusions.

Artemiy V. Vasiliev — collection and analysis of materials on MIBC «Moscow-City», computational research, creation of illustrations, processing and analysis of research results.

The authors declare that there is no conflict of interest.