

## Расчетные аэродинамические исследования комплекса Московского международного делового центра «Москва-Сити» при последовательном возведении зданий

Сергей Гургенович Саиян, Александра Михайловна Ефимова  
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Проводятся расчетные исследования аэродинамической интерференции Московского международного делового центра (ММДЦ) «Москва-Сити» при последовательном возведении зданий с учетом их хронологического порядка. До настоящего момента для данного комплекса исследования аэродинамической интерференции выполнялись только для проектируемых зданий с учетом окружающей актуальной и перспективной застройки без расчетных исследований их влияния на уже построенные здания. На основе численного моделирования показана важность учета аэродинамической интерференции и сделаны выводы о взаимовлиянии высотных зданий, а также выявлены наиболее опасные углы атаки ветра, способствующие возникновению максимальных значений средней и пульсационной составляющих ветрового воздействия.

**Материалы и методы.** Расчетный анализ осуществляется на основе методов численного моделирования в программном комплексе ANSYS Fluent. Для расчетных исследований разработаны, верифицированы и валидированы квазидвухмерные аэродинамические модели комплекса зданий ММДЦ «Москва-Сити».

**Результаты.** Приведены результаты для 256 расчетных случаев, включающих 13 расчетных вариантов с последовательным возведением зданий комплекса ММДЦ «Москва-Сити» и 19 расчетов отдельностей высоток. Каждый расчет выполнялся для 8 направлений атаки ветра. В качестве результатов приводятся средние и пульсационные суммарные аэродинамические силы и моменты в зависимости от хронологии возведения сооружений для каждого из зданий комплекса. Определены наиболее опасные направления ветра на основе построенных лепестковых диаграмм аэродинамических коэффициентов (средних и пульсационных) в зависимости от количества возведенных зданий комплекса ММДЦ «Москва-Сити».

**Выводы.** На примере последовательного возведения комплекса ММДЦ «Москва-Сити» показана важность учета аэродинамической интерференции в условиях плотной и изменяющейся городской застройки как для новых, так и уже построенных зданий. Аэродинамическая интерференция приводит к эффектам ветрового экранирования и усилению ветра, что влияет на механическую безопасность зданий и сооружений.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** CFD-моделирование, ветровые воздействия, аэродинамика зданий и сооружений, высотные здания, аэродинамическая интерференция, ММДЦ «Москва-Сити»

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** 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. Вып. 6. С. 906–941. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.906-941

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

## Computational aerodynamic studies of the MIBC “Moscow-City” complex during sequential construction of buildings

Sergey G. Saiyan, Alexandra M. Efimova

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

### ABSTRACT

**Introduction.** Computational studies of aerodynamic interference of the MIBC “Moscow-City” complex with sequential construction of buildings, taking into account their chronological order are carried out. Previous studies only considered the designed buildings and structures, along with the surrounding actual and future development, without computational analysis of their impact on the already constructed buildings. The study demonstrates the importance of considering aerodynamic interference in numerical simulation. It draws conclusions on the mutual influence of high-rise buildings and identifies the wind attack angles that contribute to the maximum values of the average and pulsation components of the wind action.

**Materials and methods.** Numerical simulation methods in the ANSYS Fluent software package were used to conduct computational analysis. Quasi-two-dimensional aerodynamic models of the building complex of MIBC “Moscow-City” were developed, verified and validated for the computational studies.

**Results.** The paper presents the results of 256 design cases, including 13 design variants for the consecutive erection of buildings in the MIBC “Moscow-City” complex and 19 calculations of freestanding high-rise buildings. Each calculation was performed for eight wind attack directions. The paper provides the average and pulsation total aerodynamic forces and moments for each building of the complex, depending on the chronology of building construction. The radar charts of aerodynamic coefficients (average and pulsation) were used to determine the most dangerous wind directions. The number of constructed buildings in the MIBC “Moscow-City” complex was taken into account.

**Conclusions.** Based on the example of the sequential construction of the MIBC “Moscow-City” complex, this study emphasizes the importance of considering aerodynamic interference in dense and changing urban environments for both new and existing buildings. Aerodynamic interference can result in both wind shielding effects and increased wind, which affects the mechanical safety of buildings and structures.

**KEYWORDS:** CFD modelling, wind action, aerodynamics of buildings and constructions, high-rise buildings, aerodynamic interference, MIBC “Moscow-City”

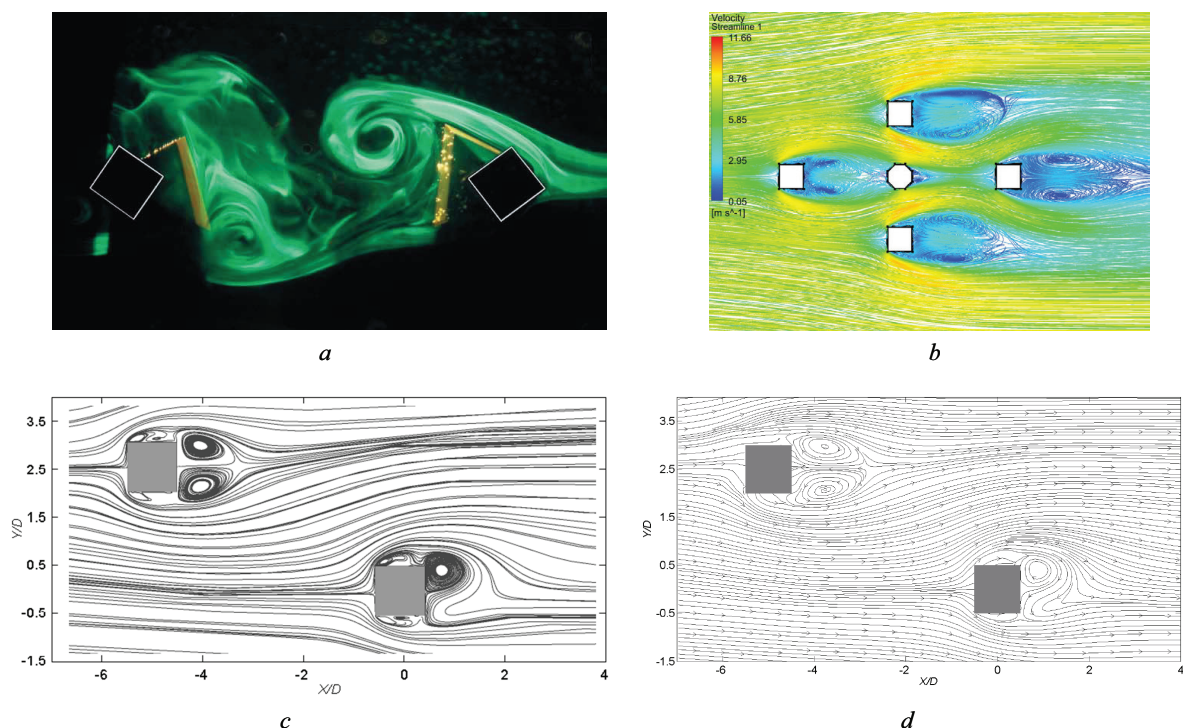
**FOR CITATION:** Saiyan S.G., Efimova A.M. Computational aerodynamic studies of the MIBC “Moscow-City” complex during sequential construction of buildings. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(6):906-941. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.906-941 (rus.).

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

## ВВЕДЕНИЕ

Темпы высотного строительства с каждым годом неуклонно растут, также увеличивается и максимальная высота зданий. Возникает потребность во внедрении перспективных зданий в существующую городскую застройку, что приводит к изменению аэродинамической ситуации окружающих сооружений [1]. Перераспределение воздушного потока в результате возведения новых зданий тесно связано с интерференционным эффектом, представленным на рис. 1.

С развитием комплексного высотного строительства предметом многочисленных аэродинамических исследований все чаще становится аэродинамическая интерференция [5–8]. Аэродинамическая интерференция — явление взаимного влияния сооружений за счет их обтекания ветровым потоком [9]. Актуальна задача прогнозирования взаимодействия воздушных потоков как на перспективные, так и на уже построенные здания. Пренебрежение исследованиями аэродинамической интерференции может привести к пагубным последствиям с точки зрения механической безопасности и комфорта людей. Не-



**Рис. 1.** Визуализация влияния периодических вихревых структур на здание, расположенное в аэродинамическом следе (a) [2]; линии тока при угле атаки ветра  $0^\circ$  (b) [3]; усредненные по времени линии тока на средней высоте: результат LES-моделирования (c) и результат эксперимента в аэродинамической трубе (d) [4]

**Fig. 1.** Visualization of the effect of periodic vortex structures on a building located in an aerodynamic trace (a) [2]; streamlines at wind angle of attack  $0^\circ$  (b) [3]; time-averaged streamlines at mid-height: LES result (c) and wind tunnel result (d) [4]



*a*



*b*

**Рис. 2.** Разрушение градирен электростанции в Феррибридже из-за срывов вихрей при скорости ветра 36 м/с (*a*) [2]; Bridgewater Place ускоряет ветер, поступающий с западного направления, а также создает нисходящий воздушный поток от жилого дома (*b*)<sup>1</sup>

**Fig. 2.** Destruction of cooling towers at Ferrybridge Power Station due to vortex disruption at wind speeds of 36 m/s winds (*a*) [2]; Bridgewater Place accelerates wind coming from a westward direction and also creates a downward airflow from the residential building (*b*)<sup>1</sup>

которые из примеров таких воздействий показаны на рис. 2.

Существует 4 основных подхода для определения ветровых нагрузок и воздействий на здания и сооружения:

- инженерные нормативно-аналитические методики (СП, Eurocode и т.д.)<sup>2</sup>;
- испытания в аэродинамической трубе (АДТ)<sup>3, 4, 5, 6</sup> [10–17];
- математическое и численное (CFD) моделирование (в программных комплексах ANSYS Fluent/CFX, STAR CCM+, COMSOL Multiphysics, FlowVision, ЛОГОС Аэро-Гидро, OpenFOAM и т.д.) [3, 4, 14, 15];
- реальные замеры и мониторинг [18–20].

Каждый метод имеет свои достоинства и недостатки. Использование нормативных подходов ограничено расчетами нагрузок только для простых форм зданий без учета возможных вариантов

расположения высотного сооружения в городской застройке (эффект аэродинамической интерференции), а также рельефа местности. Физическое (экспериментальное) моделирование в АДТ требует большого количества временных ресурсов и финансовых затрат, также оно сопряжено с ограничением при выборе количества датчиков мониторинга давления, сложной и трудоемкой организацией, обработкой, анализом и интерпретацией результатов. Одновременно с этими особенностями проблемой для модельных испытаний является соблюдение полного подобия, что нереализуемо в практических задачах строительства из-за высоких чисел Рейнольдса (обычно для задач строительства  $Re \sim 10^5 - 10^8$ ). Часто при испытаниях допускают отличие числа Рейнольдса на два-три порядка. Математическое (численное) моделирование дает возможность рассчитать любые характеристики ветрового воздействия на здания и сооружения, а также задать условия, трудновоспроизводимые в условиях эксперимента.

Для прогнозирования аэродинамики зданий и сооружений целесообразно использовать комплексный подход (численное моделирование + модельный эксперимент) [12, 13], позволяющий исключить все возможные расхождения и прийти к наиболее достоверной картине ветровых воздействий. Такой метод применяется в мировой практике ведущих научных организаций и аэродинамических труб, а в России для задач строительства реализуется на базе подразделений Научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов им. А.Б. Золотова и Учебно-научно-производственной лаборатории по аэродинамическим и аэроакустическим испытаниям строительных конструкций

<sup>1</sup> Как просчет инженеров привел к тому, что вокруг небоскреба закручиваются ветряные вихри // Novate.ru. URL: <https://novate.ru/blogs/171220/57077/>

<sup>2</sup> СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85\*. М.: Стандартинформ, 2017. 104 с.; Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions.

<sup>3</sup> Каталог уникальных и высотных зданий и сооружений в аэродинамической трубе // Научно-исследовательская и проектно-строительная Фирма «УНИКОН». Новосибирск, 2015. 63 с.

<sup>4</sup> Исследование ветровой нагрузки на фасад комплекса «Федерация» RWDI. Заключительный отчет. RWDI, 2005.

<sup>5</sup> Комплекс «Федерация». Назначение расчетных нагрузок. ЦНИИСК им. Кучеренко, 2006.

<sup>6</sup> Опыт расчетных исследований и решения задач строительной аэрогидродинамики. М., 2018. 15 с.



в НИУ МГСУ [14, 15], а также Научно-исследовательского центра «СтаДиО».

В России высотное строительство сконцентрировано в крупных промышленно-экономических центрах, один из них — г. Москва. В столице основная часть небоскребов сосредоточена на территории Пресненской набережной, где располагается Московский международный деловой центр (ММДЦ) «Москва-Сити».

ММДЦ «Москва-Сити» представляет собой комплекс высотных зданий, строительство которых началось с середины 1990-х гг. (рис. 3). Процесс возведения новых небоскребов осуществляется с цикличностью раз в 1–3 года<sup>7</sup>, что приводит к изменению ветрового воздействия на уже построенные здания. При внедрении нового сооружения оно может оказывать с точки зрения аэродинамики как положительное, так и негативное влияние на существующие здания. Расчет ветрового воздействия на проектируемые здания и сооружения, как правило, выполняется с учетом окружающей застройки

<sup>7</sup> Москва-Сити. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Москва-Сити>

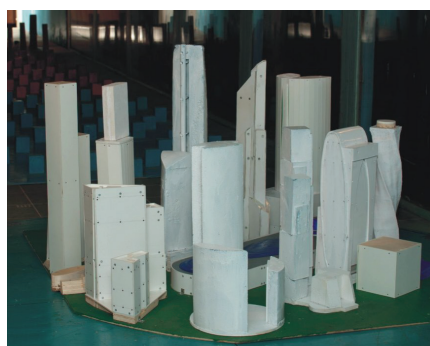
(рис. 4), однако аэродинамическими исследованиями уже построенных зданий пренебрегают. Влияние аэродинамической интерференции необходимо учитывать как для новых, так и близстоящих построек для обеспечения продолжительной эксплуатации и пригодности зданий.

В настоящем исследовании рассматривается влияние последовательного возведения зданий на аэродинамическую интерференцию комплекса ММДЦ «Москва-Сити». Для этого проводилось CFD-моделирование в квазидвухмерной нестационарной постановке для 8 углов атаки ветра (с шагом 45°) для отдельностоящих и групп высотных сооружений с учетом последовательного возведения зданий ММДЦ «Москва-Сити» в хронологическом порядке. На основе численного моделирования сделаны выводы о взаимовлиянии высотных зданий, а также выявлены наиболее опасные углы атаки ветра, способствующие возникновению максимальных значений средней и пульсационной составляющих ветрового воздействия, влияющих на механическую безопасность зданий и сооружений.

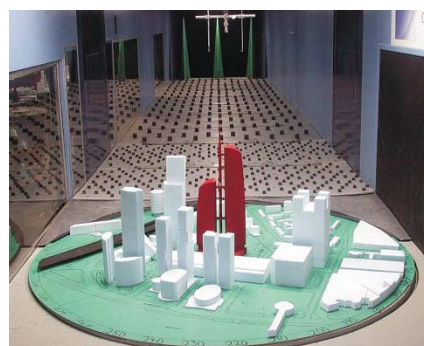


Рис. 3. ММДЦ «Москва-Сити», 2023 г.<sup>3</sup>

Fig. 3. MIBC “Moscow-City”, 2023<sup>3</sup>

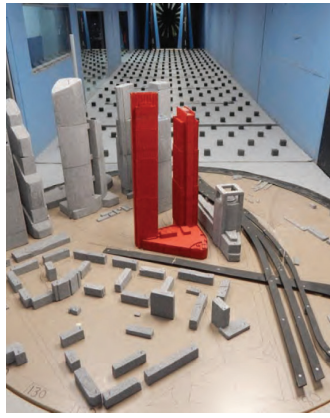


a



b

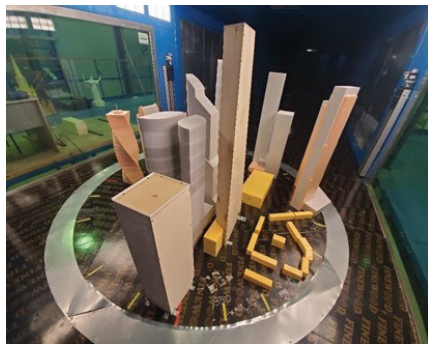




c



d



e



f

Рис. 4. Экспериментальная модель: *a* — ММДЦ «Москва-Сити» для испытаний в аэродинамической трубе 3-АТ-17.5/3 ООО «Фирма УНИКОН»<sup>3</sup>; *b* — небоскреба «Федерация» в АДТ RWDI (Канада)<sup>4,5</sup> [10]; *c* — комплекса «Neva Towers» в АДТ RWDI (Канада) [11]; *d* — небоскреба «Федерация» для испытаний в аэродинамической трубе 3-АТ-17.5/3 ООО «Фирма УНИКОН»<sup>3</sup>; *e* — ММДЦ «Москва-Сити» для испытаний в БИГАТ НИУ МГСУ<sup>6</sup> [12]; *f* — комплекса «Эволюция» в АДТ ВМТ (Великобритания) [13–17]

Fig. 4. Experimental model: *a* — MIBC “Moscow-City” for 3-AT-17.5/3 wind tunnel studies of UNICON Ltd.<sup>3</sup>; *b* — “Federation Tower” in the RWDI wind tunnel (Canada)<sup>4,5</sup> [10]; *c* — “Neva Towers” in the RWDI wind tunnel (Canada) [11]; *d* — “Federation Tower” for 3-AT-17.5/3 wind tunnel studies of UNICON Ltd.<sup>3</sup>; *e* — MIBC “Moscow-City” for Large Research Gradient Wind Tunnel studies of NRU MGSU<sup>6</sup> [12]; *f* — “Evolution Tower” in the BMT wind tunnel (UK) [13–17]

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данном исследовании рассмотрено 256 расчетных случаев (32 расчетных варианта × 8 углов атаки). Из них 13 расчетных вариантов описывают порядок построения высотных зданий комплекса

ММДЦ «Москва-Сити». Первым расчетным случаем является совокупность комплексов «Башня на Набережной» и «Федерация: Запад», замыкающий 13-й расчет включает 14 комплексов ММДЦ «Москва-Сити», начиная «Башней на Набережной»,

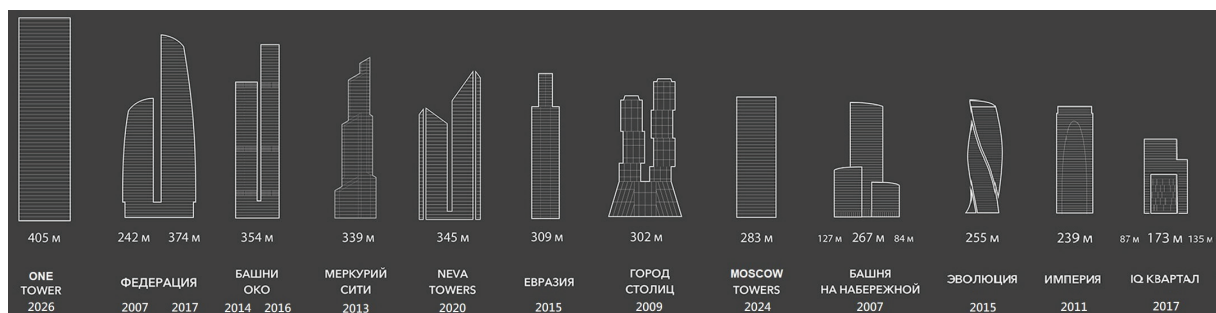


Рис. 5. Исследуемые объекты ММДЦ «Москва-Сити» с последовательностью их возведения<sup>8</sup>

Fig. 5. Investigated objects of the MIBC “Moscow-City” with construction sequence<sup>8</sup>

<sup>8</sup> Московский международный деловой центр «Москва-Сити» // Градостроительный комплекс Москвы. URL: <https://stroj.mos.ru/infographics/moskovskii-miezhdu-narodnyi-dielovoi-tsentr-moskva-siti>

возведенной в 2007 г., заканчивая перспективным проектом «One Tower», конец строительства которого намечается в 2026 г. Остальные 19 расчетных случаев — это отдельностоящие высотные здания комплекса «Москва-Сити», для которых проводилось CFD-моделирование без учета окружающей застройки. Данные результаты использовались в качестве референсных значений для сравнения. Хронология строительства проекта ММДЦ «Москва-Сити» показана на рис. 5.

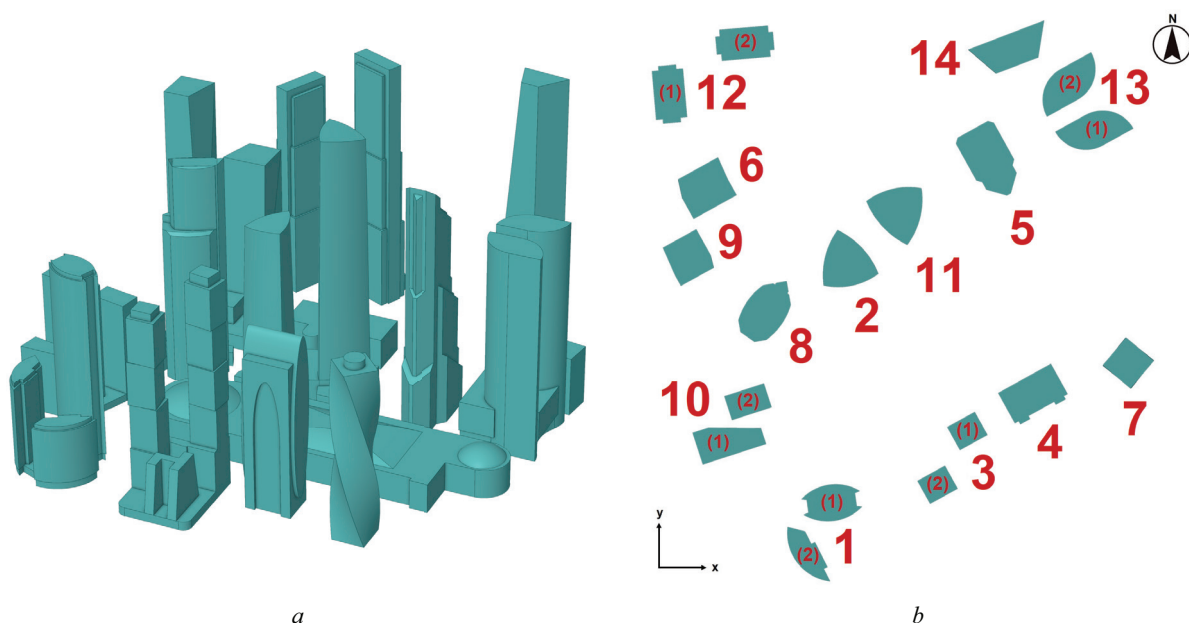
На рис. 6 приведена трехмерная геометрическая модель ММДЦ «Москва-Сити» в ANSYS SpaceClaim, а также плоские сечения на высоте 120 м с указанием хронологии возведения, которые рассматривались в рамках настоящей статьи.

Вычислительная гидрогазодинамика (CFD) реализует методы численного моделирования для решения задач, связанных с течениями жидкостей и газов. Моделирование ветровых потоков и воздействий на здания и сооружения сводится в общем случае к численному решению системы трехмерных нестационарных нелинейных уравнений Навье – Стокса.

В практических задачах определения ветровых нагрузок и воздействий на здания и сооружения с обоснованным упрощением ветровые потоки принимаются несжимаемыми ( $\rho = \text{const}$ ) и изотермическими ( $T = \text{const}$ ) а внешние массовые силы не учитываются. Тогда нестационарные нелинейные уравнения гидрогазодинамики примут следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \Delta u_x; \\ \frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \Delta u_y; \\ \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \Delta u_z, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $u_x, u_y, u_z$  — компоненты вектора скорости потока  $\vec{u}$ , м/с;  $t$  — время, с;  $\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $p$  — давление, Па;  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости воздуха, м<sup>2</sup>/с;  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  — дифференциальный оператор Лапласа.



**Рис. 6.** Геометрическая модель ММДЦ «Москва-Сити» в ANSYS SpaceClaim: *a* — трехмерная модель; *b* — плоские сечения на высоте 120 м; хронология возведения зданий: 1 (1) — «Башня на Набережной: С»; 1 (2) — «Башня на Набережной: В»; 2 — «Федерация: Запад»; 3 (1) — «Город столиц: Москва»; 3 (2) — «Город столиц: Санкт-Петербург»; 4 — «Империя»; 5 — «Меркурий»; 6 — «ОКО: Северная башня»; 7 — «Эволюция»; 8 — «Евразия»; 9 — «ОКО: Южная башня»; 10 (1) — «IQ-квартал: Башня 3»; 10 (2) — «IQ-квартал: Башня 2»; 11 — «Федерация: Восток»; 12 (1) — «Neva Towers: Башня 1»; 12 (2) — «Neva Towers: Башня 2»; 13 (1) — «Moscow Towers: Башня 1»; 13 (2) — «Moscow Towers: Башня 2»; 14 — «One Tower»

**Fig. 6.** Geometric model of the MIBC “Moscow-City” in ANSYS SpaceClaim: *a* — 3D model; *b* — 2D model of plane sections at a height of 120 meters; building construction timeline: 1 (1) — “Naberezhnaya Tower: C”; 1 (2) — “Naberezhnaya Tower: B”; 2 — “Federation Tower: West”; 3 (1) — “City of Capitals: Moscow”; 3 (2) — “City of Capitals: Saint-Petersburg”; 4 — “Imperia Tower”; 5 — “Mercury City Tower”; 6 — “OKO: North Tower”; 7 — “Evolution Tower”; 8 — “Eurasia Tower”; 9 — “OKO: South Tower”; 10 (1) — “IQ-quarter: Tower 3”; 10 (2) — “IQ-quarter: Tower 2”; 11 — “Federation Tower: East”; 12 (1) — “Neva Towers: Case 1”; 12 (2) — “Neva Towers: Case 2”; 13 (1) — “Moscow Towers: Case 1”; 13 (2) — “Moscow Towers: Case 2”; 14 — “One Tower”



Также необходимо выполнение уравнений неразрывности и состояния:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0; \quad (2)$$

$$\rho = \text{const}. \quad (3)$$

Численное решение систем уравнений (1)–(3) 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. Система гидрогазодинамических уравнений (1)–(3) разрешается напрямую для всех масштабов турбулентности. Данный подход требует чрезвычайно больших вычислительных ресурсов (разрешение должно происходить до уровня колмогоровских масштабов турбулентности и времени жизни «малых» вихрей). При современных возможностях ЭВМ метод реализуем только для очень малых скоростей потока (малых чисел Рейнольдса) и для исследовательских задач с использованием суперкомпьютеров.

2. LES (Large Eddy Simulation) — моделирование крупных вихрей. В этом подходе заложено применение осреднения по пространству уравнений Навье – Стокса. Реализация осреднения происходит через неявный фильтр, позволяющий отделить «крупные» вихри от «мелких», которыми обычно являются размеры ячейки (сетки), совокупность данных ячеек (конечных объемов) составляет конечно-объемную сетку. Вихри, превышающие размер конечного объема, разрешаются напрямую, остальные вихревые структуры моделируются на уровне подсеточной модели турбулентности.

3. URANS/RANS (Unsteady Reynolds Averaged Navier – Stokes) — осредненные по Рейнольдсу (осредненные по времени) уравнения Навье – Стокса. Метод основан на представлении скорости потока в виде суммы осредненной и пульсационной составляющих. В связи с этим в уравнениях Навье – Стокса появляются дополнительные сдвиговые напряжения — 6 неизвестных, которые нужно определить. Замыкание уравнений Рейнольдса (определение турбулентных напряжений ( $\tau_{ij}^T = \rho \overline{u'_i u'_j}$ )) производится с помощью полуэмпирических моделей турбулентности. В RANS подходе все турбулентные вихри моделируются, т.е. не происходит их явного разрешения как в DNS и LES подходах.

4. Совокупность двух последних подходов, описывающих турбулентные течения, образует целый пласт моделей, объединяющих преимущества моделей LES (высокая точность расчета отрывных течений) и RANS (высокая точность расчета пристенных течений при скромных требованиях к сетке). Такие модели турбулентности называются гибридными.

В настоящей работе используется гибридная модель турбулентности SBES<sup>9</sup> (моделирование вихрей со смешанным напряжением). Комбинирование двух моделей дает возможность достаточно точно предсказывать осредненные и пульсационные характеристики не только в зонах отрывных, но и присоединенных турбулентных течений при высоких числах Рейнольдса с использованием доступных сегодня вычислительных ресурсов. Переход между RANS и LES подходами для модели турбулентности SBES осуществляется с помощью функции переключателя  $f_S$ :

$$\begin{aligned} \tau_{ij}^{SBES} &= f_S \cdot \tau_{ij}^{RANS} + (1 - f_S) \cdot \tau_{ij}^{LES}; \\ \mu_t^{SBES} &= f_S \cdot \mu_t^{RANS} + (1 - f_S) \cdot \mu_t^{LES}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\tau_{ij}^{RANS}$ ,  $\tau_{ij}^{LES}$  — тензор напряжений (RANS/LES), Па;  $\mu_t^{RANS}$ ,  $\mu_t^{LES}$  — турбулентная вязкость (RANS/LES), Па·с.

Для исследования явления аэродинамической интерференции необходимо корректно рассчитать ветровую нагрузку на сооружения, а также учесть перераспределение ветрового потока после его взаимодействия со зданиями. Модель турбулентности SBES разрешает крупные энергонесущие турбулентные структуры в свободном потоке с подсеточной моделью LES-WALE и описывает пристеночное течение RANS подходом.

ANSYS Fluent использует в качестве численного решения метод конечных (контрольных) объемов (МКО) для преобразования скалярного уравнения переноса (5) в алгебраическое (6), которое может быть решено численно:

$$\begin{aligned} \underbrace{\int_V \frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} dV}_{\text{нестационарность}} + \underbrace{\oint_A \rho \varphi \vec{u} \cdot d\vec{A}}_{\text{конвекция}} &= \\ = \underbrace{\oint_A \Gamma_\varphi \nabla \varphi \cdot d\vec{A}}_{\text{диффузия}} + \underbrace{\int_V S_\varphi dV}_{\text{генерация}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\varphi$  — искомая скалярная величина;  $V$  — объем ячейки, м<sup>3</sup>;  $\vec{u}$  — вектор скорости ( $= u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$ ), м/с;  $\vec{A}$  — вектор площади поверхности ячейки, м<sup>2</sup>;  $\Gamma_\varphi$  — коэффициент диффузии для  $\varphi$ ;  $\vec{\nabla} \varphi$  — градиент искомой величины  $\varphi \left( = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \vec{k} \right)$ ;  $S_\varphi$  — массовые силы или источник.

Метод конечных объемов заключается в представлении законов сохранения (массы, импульса и энергии) в интегральной форме. Расчетная область с помощью сетки разбивается на совокупность конечных объемов. Узлы, в которых ищется решение, находятся в центрах контрольных объемов. После интегрирования уравнения переноса (5) по каждому

<sup>9</sup> ANSYS Fluent Theory Guide. ANSYS Inc. Canonsburg, 2020.

конечному объему получается дискретное уравнение (6), выражающее локальный закон сохранения:

$$\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} V + \sum_f^{N_{\text{faces}}} \rho_f \vec{u}_f \varphi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_{\text{faces}}} \Gamma_\varphi \nabla \varphi_f \cdot \vec{A}_f + S_\varphi V_{\text{cell}}, \quad (6)$$

где  $N_{\text{faces}}$  — количество граней, образующих конечный объем;  $\varphi_f$  — величина  $\varphi$ , конвектирующая через поверхность;  $\rho_f \vec{u}_f \cdot \vec{A}_f$  — массовый поток через поверхность;  $\vec{A}_f$  — вектор площади поверхности  $f$ ,  $|\vec{A}| (= |A_x \vec{i} + A_y \vec{j} + A_z \vec{k}|)$ ;  $\nabla \varphi_f$  — градиент  $\varphi$  на поверхности  $f$ .

Разработка конечно-объемной сетки для расчетных вариантов осуществлялась в ANSYS Meshing. В табл. 1, 2 приведены параметры конечно-объемных сеток, используемых для CFD-моделирования. Размерность конечно-объемных моделей составляет ~210 тыс. ячеек (внешняя область ~51 тыс., внутренняя область ~149–159 тыс.). Конечно-объемные

сетки показаны на рис. 7. Параметры конечно-объемной сетки выбраны на основе верификационного исследования, описанного далее в настоящей статье.

Все расчеты выполнены в квазидвухмерной нестационарной постановке с параметрами, представленными в табл. 3. Выбор квазидвухмерной постановки расчетных исследований обусловлен большой вычислительной сложностью трехмерного нестационарного CFD-моделирования для 256 расчетных случаев. Рассматриваемые здания имеют высоту, намного большую их поперечных размеров, что позволяет принимать эту постановку. Для наиболее опасных углов атаки, реализующих наибольшие ветровые воздействия, возможны уточняющие трехмерные расчеты.

Расчетная область с указанными граничными и начальными условиями, а также параметрами численного моделирования для аэродинамических

Табл. 1. Параметры для генерации сетки во внешней расчетной области (рис. 7, а)

Table 1. Parameters for mesh generation in the external computational domain (fig. 7, a)

Параметр Parameter	Значение Value	
Размер элементов конечнообъемной сетки Size of the finite volume mesh elements	В прямоугольном объеме In a rectangular volume	15 м / м
	На поверхности полуокружности inlet On the surface of the inlet semicircle	2 м / м
	На поверхности полуокружности outlet On the surface of the outlet semicircle	4 м / м
	По направлению оси OZ In the direction along the axis OZ	1 конечный объем 1 finite volume
Метод генерации Generation method	MultiZone с гексаэдрической сеткой и заданным минимальным размером ребра MultiZone with hexahedral mesh and specified minimum edge size	3 м / м

Табл. 2. Параметры для генерации сетки во внутренней расчетной области (рис. 7, б)

Table 2. Parameters for mesh generation in the internal computational domain (fig. 7, b)

Параметр Parameter	Значение Value	
Размер элементов конечнообъемной сетки Size of the finite volume mesh elements	В цилиндрическом объеме In a cylindrical volume	2 м / м
	На поверхности объектов On the surface of objects	2 м / м
	По направлению оси OZ In the direction along the axis OZ	1 конечный объем 1 finite volume
Пограничный слой Boundary layer	Плавный переход Smooth Transition	Коэффициент перехода — 0,5 Transition Ratio — 0.5 Максимальное количество слоев — 5 Maximum Layers — 5 Скорость роста — 1,2 Growth Rate — 1.2
Метод генерации Generation method	MultiZone с гексаэдрической сеткой и заданным минимальным размером ребра MultiZone with hexahedral mesh and specified minimum edge size	3 м / м



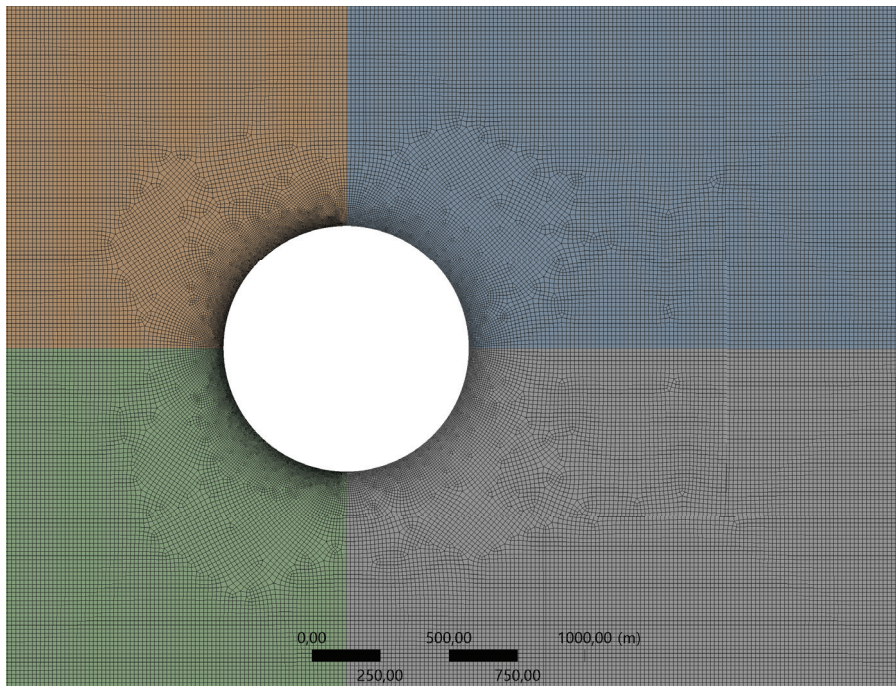
исследований комплекса зданий ММДЦ «Москва-Сити» показана на рис. 8.

При проведении нестационарных аэродинамических расчетов одним из ключевых параметров является временной шаг. Определение необходимого шага по времени, обеспечивающего быстрое получение результатов и при этом достаточного для моделирования вихреобразования вследствие турбулентности потока, обычно осуществляется по одному из двух подходов:

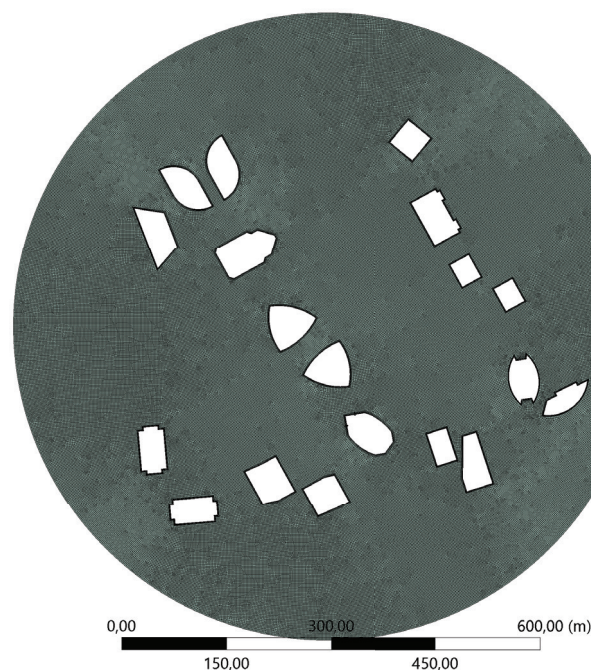
1. Шаг временной дискретизации может быть выбран исходя из необходимости отслеживания,

по крайней мере, 10–20 точек для наивысшей частоты возбуждения отклика, например, суммарной аэродинамической силы или на основе числа Струхала, представляющего безразмерную величину частоты срыва вихрей для оценки резонансных явлений.

2. Назначение шага по времени возможно исходя из выполнения критерия Куранта – Фридрихса – Леви (CFL). При использовании явных схем интегрирования уравнений должно обеспечиваться выполнение критерия  $CFL < 1$ , при применении неявных схем допустимы значения  $CLF = 3-10$ .

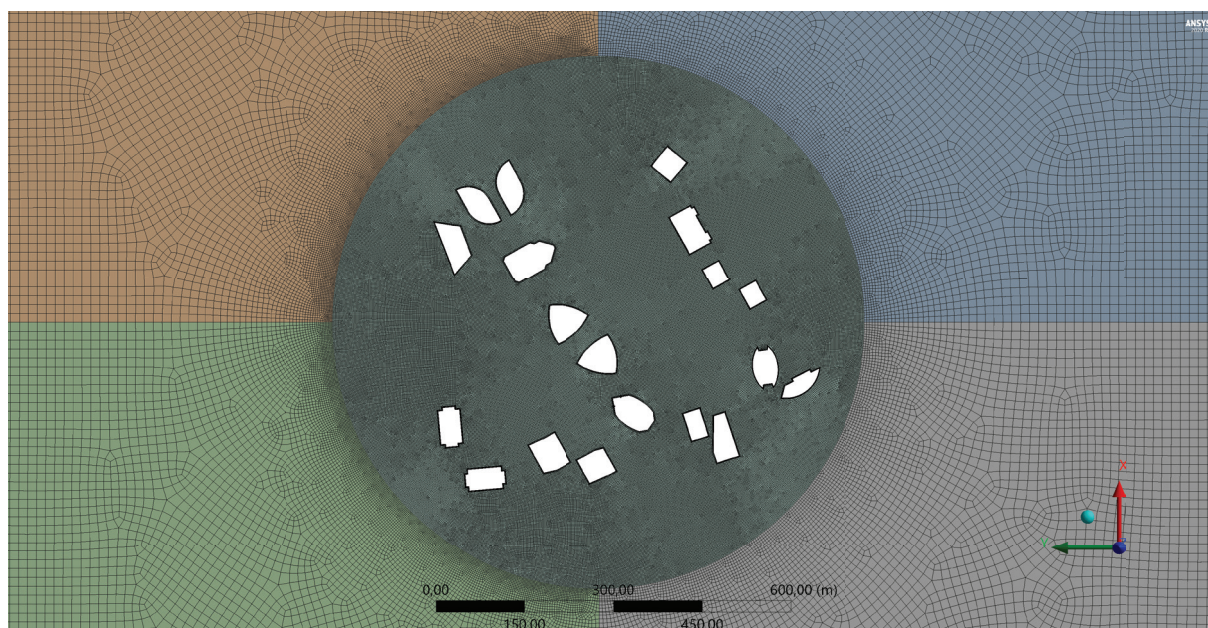


a

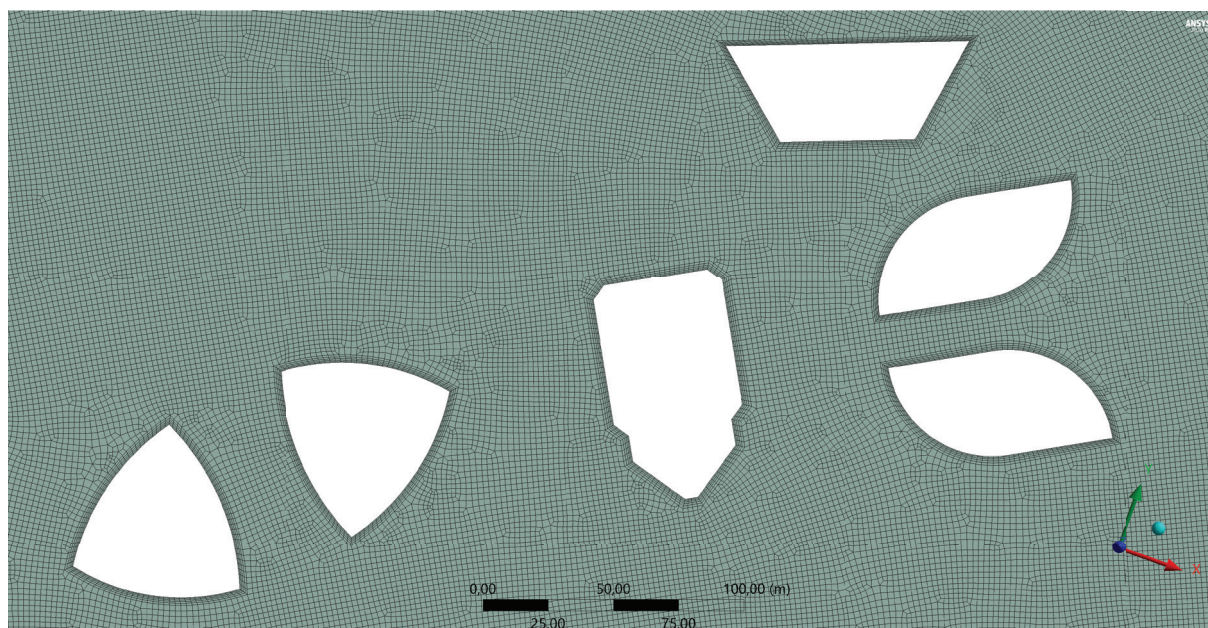


b





c



d

Рис. 7. Разработанные конечно-объемные сетки в ANSYS Meshing

Fig. 7. Developed finite-volume meshes in ANSYS Meshing

Общее физическое время моделирования назначено исходя из полного прохождения волны через расчетную область и дополнительного времени, необходимого для того, чтобы процесс приобрел установившийся характер. Средняя скорость на Inlet составляет 30 м/с, продольный размер расчетной области 3300 м.

Пространственная дискретизация конвективных членов достигается за счет аппроксимации второго порядка кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации энергии. Для импульса используется ограниченная центрально-разностная схема. Способ оценки градиентов основан на ме-

тоде наименьших квадратов между двумя значениями в центрах соседних ячеек. Градиент давления вычисляется по схеме второго порядка. Временная дискретизация проводится ограниченной неявной схемой второго порядка.

По результатам расчетных исследований вычисляются значения средней  $\pm$  пульсационной составляющей ветрового воздействия. За среднее значение принимается среднее арифметическое:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i; \quad (7)$$



Табл. 3. Параметры CFD-моделирования

Table 3. CFD modelling parameters

Параметр Parameter	Описание Description
Размер расчетной области Domain size	<p>Внешняя (прямоугольная) — <math>2500 \times 3300 \times 3</math> м (<math>x \times y \times z</math>)                      External (rectangular) — <math>2,500 \times 3,300 \times 3</math> m (<math>x \times y \times z</math>)                      Внутренняя (цилиндрическая) — <math>R = 450</math> м, <math>h = 3</math> м                      Internal (cylindrical) — <math>R = 450</math> m, <math>h = 3</math> m</p>
Граничные условия Boundary conditions	<p>Граничные условия для всех расчетов одинаковы (рис. 9):                      The boundary conditions for all calculations are the same (fig. 9):  <i>На входе (Inlet):</i>                      Inlet:  <math>\frac{dp}{dn} = 0</math>, <math>u_n = 30</math> м/с, принятая на высоте 120 м для первого ветрового района типа местности В, согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия»; <math>u_\tau = 0</math>  <math>\frac{dp}{dn} = 0</math>, <math>u_n = 30</math> m/s, adopted at a height of 120 m for the first wind area of terrain type B, according to SP 20.13330.2016 “Loads and Impacts”; <math>u_\tau = 0</math>, <math>\frac{dp}{dn} = 0</math>, <math>u_n = 30</math> m/s                      Интенсивность турбулентности <math>I = 1</math> % характерный размер вихря <math>l = 300</math> м приняты согласно Еврокоду                      Turbulence intensity <math>I = 1</math> % characteristic vortex size <math>l = 300</math> m are accepted, according to Eurocode  <i>На выходе (Outlet), в том числе турбулентные параметры для обратных потоков:</i>                      Outlet, including turbulence parameters for return flows:  <math>\frac{du_n}{dn} = 0</math>, <math>I = 1</math> %, <math>l = 300</math> м  <math>\frac{du_n}{dn} = 0</math>, <math>I = 1</math> %, <math>l = 300</math> m                      Условие симметрии потока (<i>Symmetry</i>) задано для верхней, нижней и боковых границ расчетной области:                      The symmetry condition for flow is applied to the upper, lower and lateral boundaries of the computational domain:  <math>\frac{du_n}{dn} = 0</math>, <math>u_n = 0</math>, <math>\frac{du_\tau}{dn} = 0</math>                      Условие стенки без проскальзывания (<i>no slip wall</i>) назначено на поверхности исследуемых объектов:                      The no-slip wall condition is assigned on the surface of the investigated objects:  <math>u_n = 0</math>, <math>u_\tau = 0</math>, <math>\frac{dp}{dn} = 0</math></p>
Начальные условия Initial conditions	<p>Гибридная инициализация (ANSYS Fluent)                      Hybrid Initialization (ANSYS Fluent)                      Поле скорости: <math>\nabla^2 \varphi = 0</math>, <math>\varphi</math> — потенциал скорости.                      Velocity Field: <math>\nabla^2 \varphi = 0</math>, <math>\varphi</math> — velocity potential.                      Условие на стенке: <math>\frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big _{\text{стенка}} = 0</math>                      Wall Boundaries: <math>\frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big _{\text{wall}} = 0</math>                      Условие на входе в расчетную область: <math>\frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big _{\text{inlet}} = V_\perp</math>                      Inlet Boundaries: <math>\frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big _{\text{inlet}} = V_\perp</math>                      Условия свободного потока: <math>\frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big _\infty = u_\infty</math>, <math>\frac{\partial \varphi}{\partial y} \Big _\infty = v_\infty</math>, <math>\frac{\partial \varphi}{\partial z} \Big _\infty = w_\infty</math>                      Free stream conditions: <math>\frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big _\infty = u_\infty</math>, <math>\frac{\partial \varphi}{\partial y} \Big _\infty = v_\infty</math>, <math>\frac{\partial \varphi}{\partial z} \Big _\infty = w_\infty</math>                      Условие на выходе из расчетной области: <math>\varphi = 0</math>                      Outlet Boundaries: <math>\varphi = 0</math>                      Поле давления: <math>\nabla^2 P = 0</math>, <math>P</math> — давление                      Pressure Field: <math>\nabla^2 P = 0</math>, <math>P</math> — pressure</p>

Окончание табл. 3 / End of the Table 3

Параметр Parameter	Описание Description
Временной шаг Time step	0,05 с / s
Максимальное количество итераций за один временной шаг Maximum number of iterations per time step	20
Модель турбулентности Turbulence model	Гибридная модель SBES с подсеточно-масштабной моделью WALE Hybrid SBES model with subgrid-scale WALE model
Решатель Solver	Основанный на решении уравнения для давления Pressure-Based
Численная схема Numerical scheme	Связанный алгоритм Coupled algorithm
Временная аппроксимация Time approximation	Неявная формулировка второго порядка Implicit second-order formulation
Физическое время счета Simulation time	200 с / s

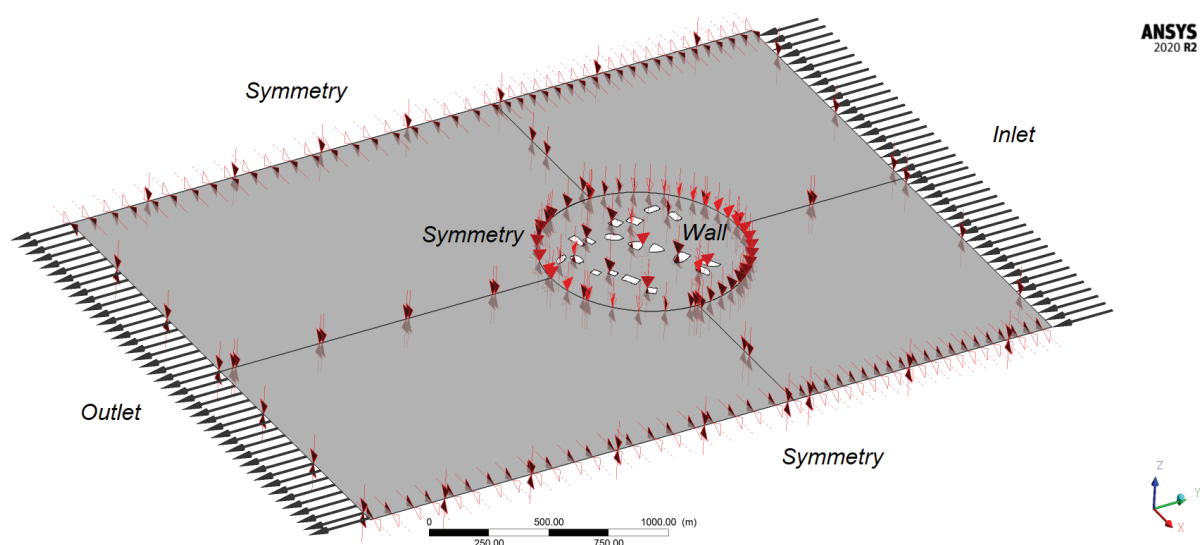


Рис. 8. Расчетная область с указанными граничными условиями для аэродинамического моделирования комплекса зданий ММДЦ «Москва-Сити»

Fig. 8. Computational domain with specified boundary conditions for aerodynamic simulation of the MIBC “Moscow-City”

за пульсационную составляющую принимается стандартное отклонение  $\sigma$ , имеющее ту же размерность, что и исходные величины:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}, \quad (8)$$

где  $x_i$  — значения наблюдаемой величины (аэродинамические силы и моменты) во времени;  $\bar{x}$  — среднее значение наблюдаемой величины (средняя аэродинамическая сила и момент);  $N$  — количество выборки (отсчетов по времени).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Точность и эффективность численного моделирования напрямую связаны с сеточной сходи-

мостью, настройками численных схем, выбором параметров задачи, а также с граничными и начальными условиями в расчетной модели. Для проверки корректности получаемых численных результатов аэродинамических расчетов были проведены верификация и валидация рассчитываемых моделей на основе данных экспериментальных (модельных) испытаний в АДТ, а также альтернативных численных расчетов, приведенных в литературе [25–29]. В качестве эталона для проверки методики численного моделирования выбрана задача ветрового воздействия на квадратную призму (рис. 9).

В данной задаче верифицировались и валидировались средние аэродинамические коэффициенты давления ветра  $C_p$  по контуру призмы (рис. 9), а также суммарные аэродинамические коэффициенты

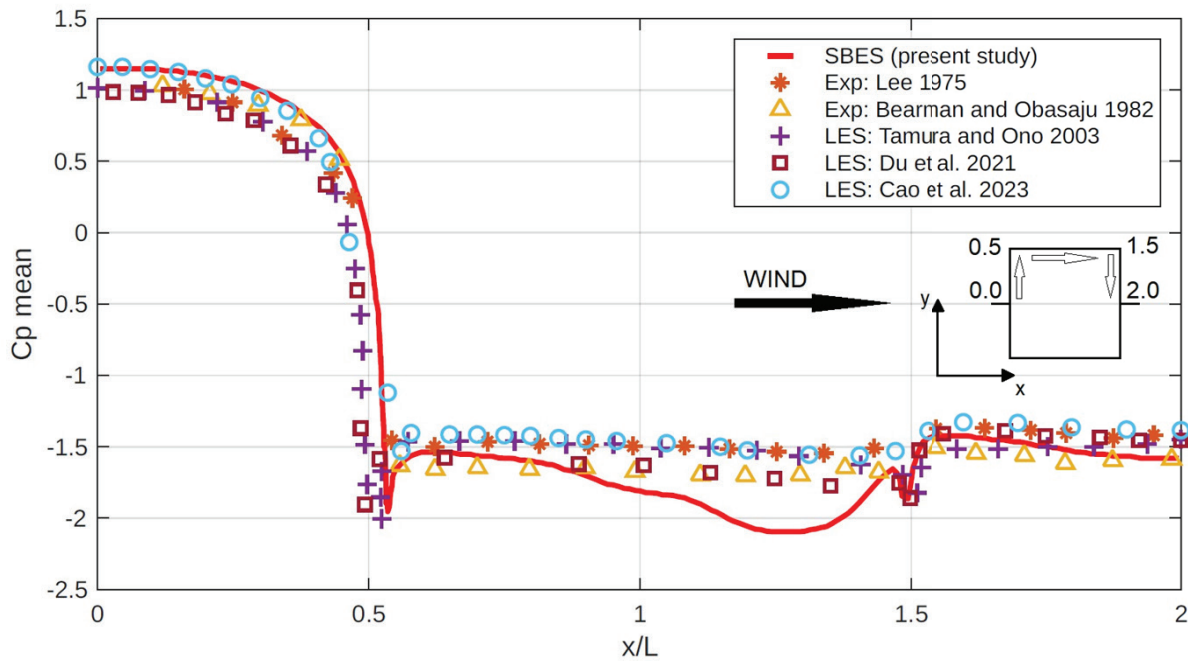


Рис. 9. Распределение среднего давления по контуру квадратной призмы. Красным цветом показаны результаты настоящего исследования по модели турбулентности SBES; маркерами отмечены результаты экспериментальных (модельных) испытаний в аэродинамических трубах, а также результаты альтернативных расчетных исследований [21–25]

Fig. 9. Mean pressure distribution along the contour of a square prism. The red colour shows the results of the present study using the SBES turbulence model; markers indicate the results of experimental (model) tests in wind tunnels, as well as the results of alternative computational studies [21–25]

средней лобовой  $\bar{C}_x$  и пульсационной подъемной  $C'_y$  сил, представленные в табл. 4.

Из результатов сопоставительного анализа для наветренной стороны аэродинамические коэффициенты показывают хорошее совпадение между данными численного моделирования моделью турбулентности SBES (настоящее исследование) и экспериментальными исследованиями в аэродинамических трубах, а также данными альтернативных расчетов с использованием модели турбулентности LES.

Согласие между экспериментальным и численным моделированием несколько ухудшается у боковых стенок и улучшается у подветренной стороны. Ухудшение результатов у боковых стенок может быть связано с особенностью квазидвухмерной постановки расчетного исследования, для которой

характерно некоторое завышение значений пульсационной составляющей по сравнению с полномасштабной трехмерной нестационарной задачей, что является приемлемым для практических расчетов. Для сопоставления аэродинамических коэффициентов сил в табл. 4 представлены результаты настоящего CFD-моделирования, а также данные альтернативных источников.

Основываясь на приведенных выше результатах верификационного и валидационного сравнения, можно сказать о корректности принятых методов и параметров численного моделирования, выбранных в настоящей статье, способных адекватно описать течение воздушных потоков и воздействие ветра на здания и сооружения для получения более точных и достоверных результатов при по-

Табл. 4. Сравнение результатов аэродинамических коэффициентов сил

Table 4. Comparison of results of aerodynamic force coefficients

Источник Source	$\bar{C}_x$	$C'_y$
SBES (present study)	2,350	1,510
Exp: Lee 1975 [25]	2,050	1,220
Exp: Bearman and Obasaju 1982 [26]	–	1,200
LES: Tamura and Ono 2003 [27]	2,130	1,200
LES: Du et al. 2021 [28]	2,090	1,470
LES: Cao et al. 2023 [29]	2,269	1,228



следующих численных расчетах комплекса ММДЦ «Москва-Сити».

В результате CFD-моделирования комплексов зданий ММДЦ «Москва-Сити» были получены графики суммарных аэродинамических сил  $F_x$  и  $F_y$  во времени. Графики изменения составляющих аэродинамической силы для комплексов 10 (1) — «IQ-квартал: Башня 3», 11 — «Федерация: Восток», 12 (1) — «Neva Towers: Башня 1» и 13 (1) — «Moscow Towers: Башня 1», приведенные на рис. 10, 11, описывают актуальную картину аэродинамических нагрузок при угле атаки ветра  $315^\circ$  на момент написания статьи (возведены все комплексы, кроме One Tower).

В результате аэродинамических исследований ММДЦ «Москва-Сити» получены изополя давлений, скоростей ветрового потока, завихренностей и кинетической энергии турбулентности. Для преобладающих северных и западных ветров на рис. 12–16

представлены результаты CFD-исследования аэродинамической интерференции, описывающие взаимное влияние 19 зданий ММДЦ «Москва-Сити».

Результаты ветрового воздействия в условиях окружающей застройки сравниваются с референсными значениями, представляющими собой аэродинамические силы на отдельностоящие здания (для каждого здания без учета окружающей застройки). В табл. 5 указаны значения аэродинамических сил и крутящего момента (среднее  $\pm$  пульсационное) на каждое здание из комплекса «Москва-Сити» с нумерацией, соответствующей рис. 6, в зависимости от угла атаки ветра.

Каждая строка содержит значения средней  $\pm$  пульсационной составляющих ветрового воздействия, а именно аэродинамических сил  $F_x$ ,  $F_y$  с размерностью  $10^4$ , Н, крутящий момент  $M_z$  с размерностью  $10^4$ , Н·м, и стандартное отклонение  $\sigma$  (с той же

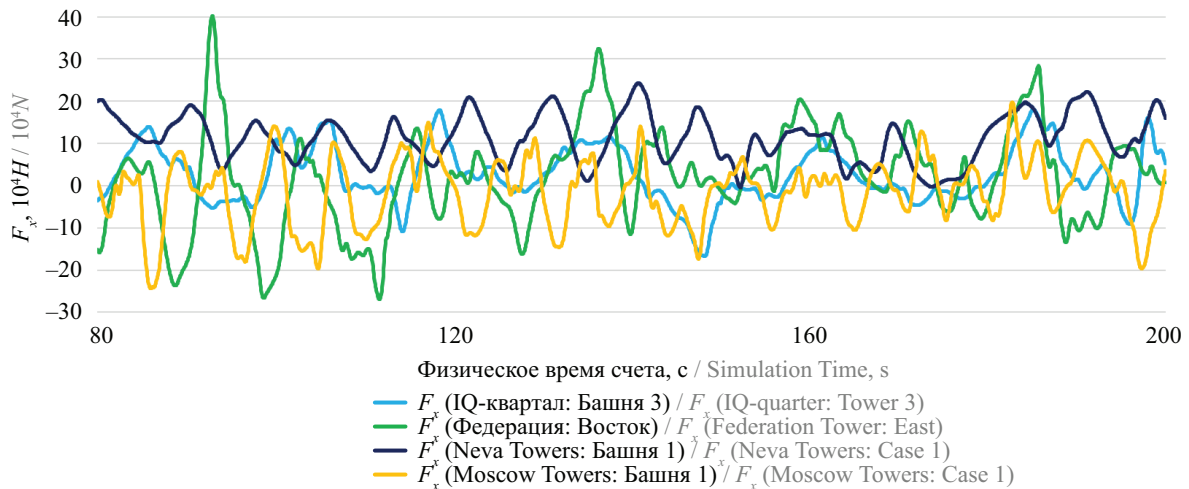


Рис. 10. Аэродинамическая сила  $F_x$

Fig. 10. Aerodynamic force  $F_x$

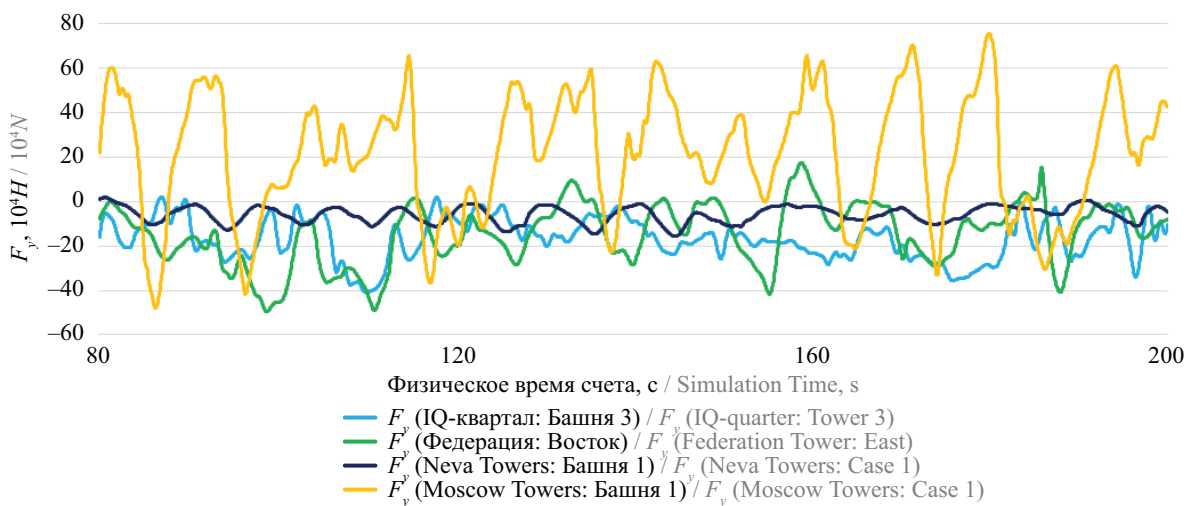


Рис. 11. Аэродинамическая сила  $F_y$

Fig. 11. Aerodynamic force  $F_y$

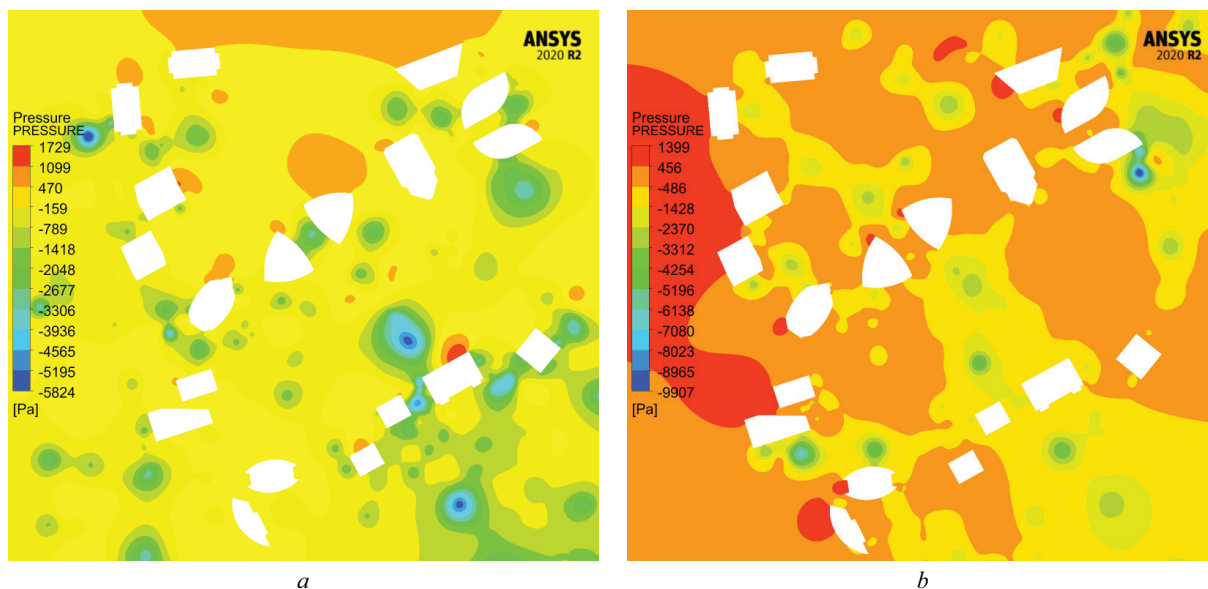


Рис. 12. Статическое давление при физическом времени  $T = 200$  с:  $a$  — северный ветер (угол атаки ветра  $0^\circ$ );  $b$  — западный ветер (угол атаки ветра  $270^\circ$ )

Fig. 12. Static pressure at simulation time  $T = 200$  s:  $a$  — north wind (wind attack angle  $0^\circ$ );  $b$  — west wind (wind attack angle  $270^\circ$ )

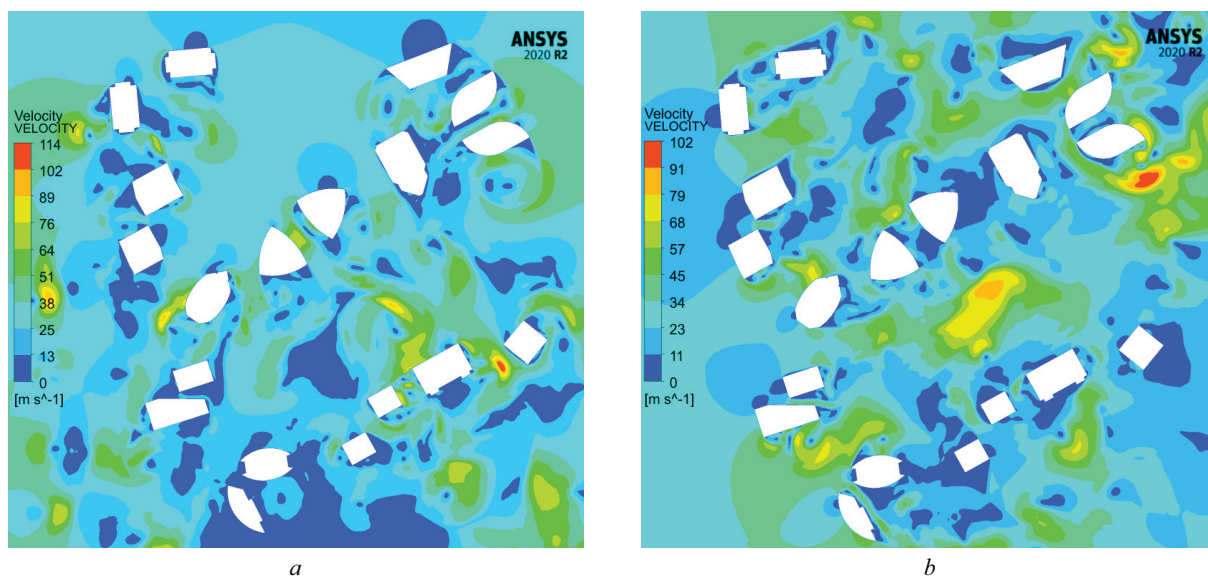


Рис. 13. Скорость ветрового потока при физическом времени  $T = 200$  с:  $a$  — северный ветер (угол атаки ветра  $0^\circ$ );  $b$  — западный ветер (угол атаки ветра  $270^\circ$ )

Fig. 13. Wind flow velocity at simulation time  $T = 200$  s:  $a$  — north wind (wind attack angle  $0^\circ$ );  $b$  — west wind (wind attack angle  $270^\circ$ )

размерностью), определяющее пульсационную составляющую.

Явление аэродинамической интерференции может оказывать как положительное, так и негативное влияние за счет внедрения высотных зданий в окружающую застройку. Результаты аэродинамических исследований комплекса ММДЦ «Москва-Сити» для 8 углов атаки ветра, представленные в табл. 6–19, содержат информацию о взаимном влиянии пер-

спективных зданий на существующие при их последовательном возведении.

В табл. 6–19 приняты следующие обозначения:

- первый столбец — хронологический порядок возведения зданий;
- второй столбец — обозначение корпусов строящегося комплекса. Если комплекс состоит из одного корпуса, второй столбец в таблице отсутствует;

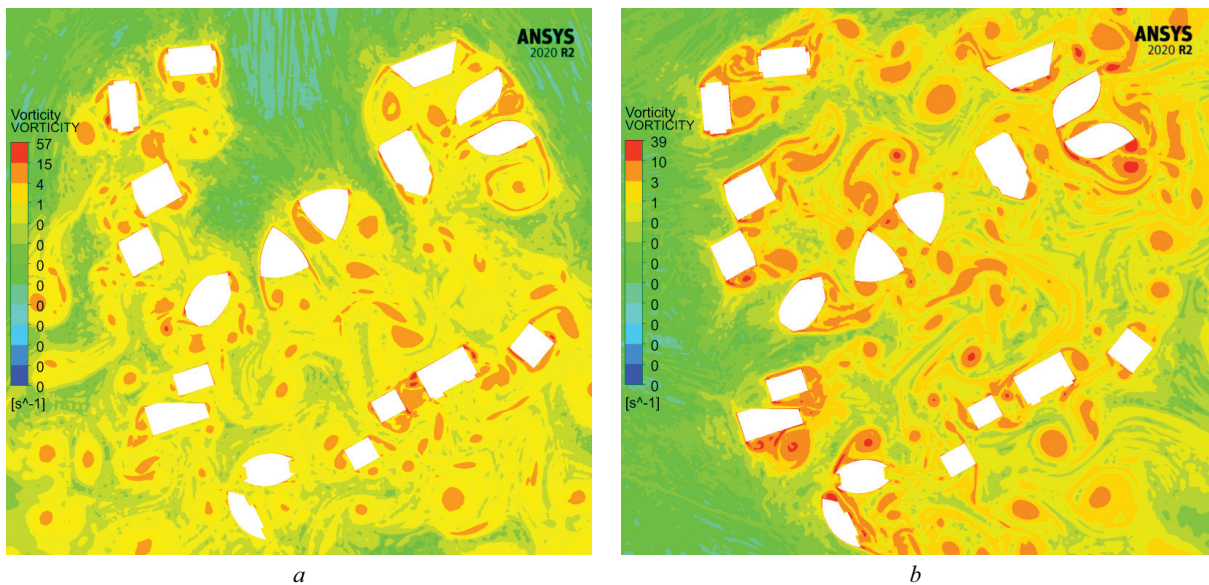


Рис. 14. Завихренности при физическом времени  $T = 200$  с:  $a$  — северный ветер (угол атаки ветра  $0^\circ$ );  $b$  — западный ветер (угол атаки ветра  $270^\circ$ )

Fig. 14. Vortices at simulation time  $T = 200$  s:  $a$  — north wind (wind attack angle  $0^\circ$ );  $b$  — west wind (wind attack angle  $270^\circ$ )

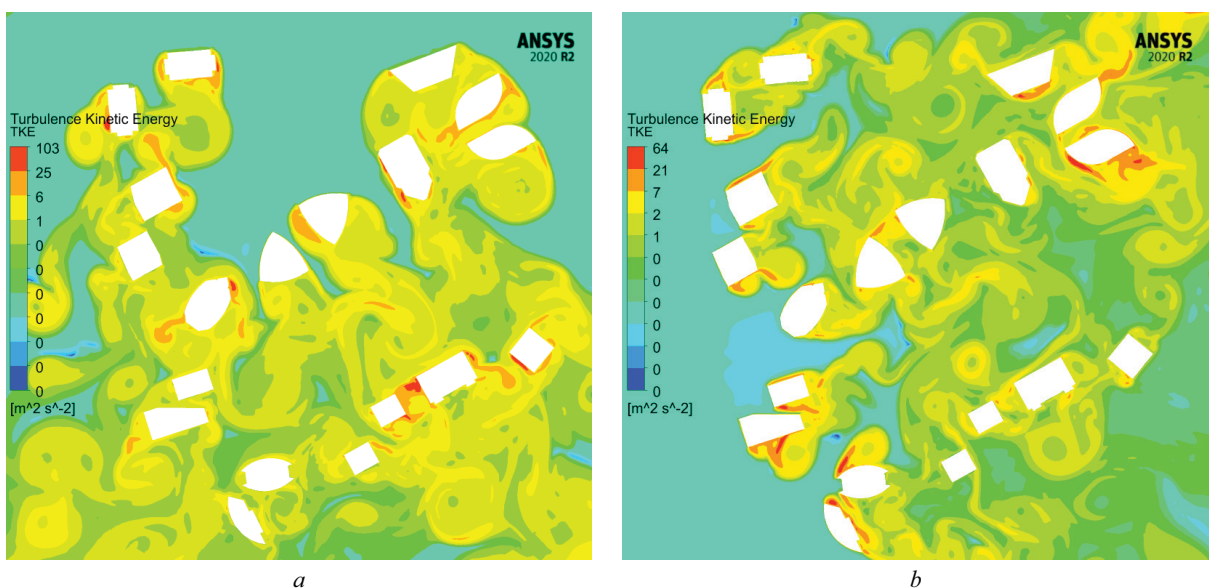


Рис. 15. Кинетическая энергия турбулентности при физическом времени  $T = 200$  с:  $a$  — северный ветер (угол атаки ветра  $0^\circ$ );  $b$  — западный ветер (угол атаки ветра  $270^\circ$ )

Fig. 15. Turbulence kinetic energy (TKE) at simulation time  $T = 200$  s:  $a$  — north wind (wind attack angle  $0^\circ$ );  $b$  — west wind (wind attack angle  $270^\circ$ )

- первая строка — угол атаки ветра;
- в ячейках таблицы для каждого угла атаки ветра указаны значения средней  $\pm$  пульсационной составляющих ветрового воздействия, а именно аэродинамических сил  $F_x, F_y$  с размерностью  $10^4$  Н, крутящий момент  $M_z$  с размерностью  $10^4$  Н·м, и их стандартное отклонение  $\sigma$  (с той же размерностью), определяющее пульсационную составляющую.

Для более наглядного представления результатов влияния аэродинамической интерференции при последовательном возведении зданий были по-

строены лепестковые диаграммы аэродинамических коэффициентов сил для средней и пульсационной составляющих ветрового воздействия, определяемые по формулам:

$$C_x = \frac{F_x}{\rho \cdot u_\infty^2 \cdot S}; \quad C_y = \frac{F_y}{\rho \cdot u_\infty^2 \cdot S}; \quad C_R = \sqrt{C_x^2 + C_y^2}, \quad (8)$$

где  $F_x, F_y$  — проекция суммарной аэродинамической силы на ось  $OX$  и  $OY$  соответственно, Н;  $\rho = 1,225$  кг/м<sup>3</sup> — плотность воздуха;  $u_\infty = 30$  м/с —



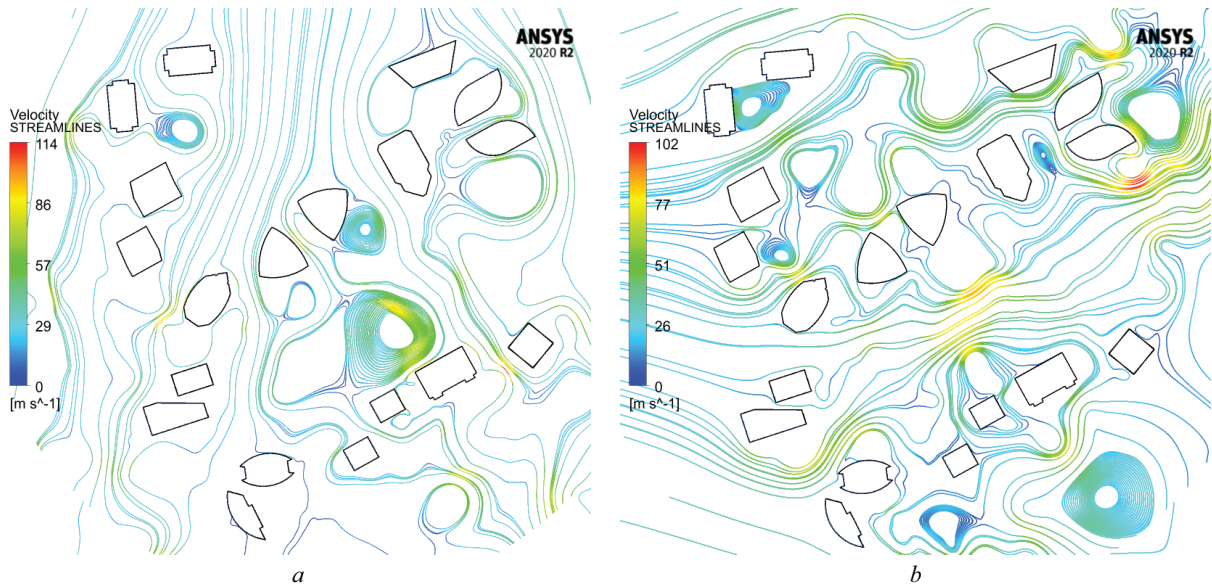


Рис. 16. Линии тока при физическом времени  $T = 200$  с:  $a$  — северный ветер (угол атаки ветра  $0^\circ$ );  $b$  — западный ветер (угол атаки ветра  $270^\circ$ )

Fig. 16. Streamlines at simulation time  $T = 200$  s:  $a$  — north wind (wind attack angle  $0^\circ$ );  $b$  — west wind (wind attack angle  $270^\circ$ )

Табл. 5. Ветровые воздействия на отдельностоящие здания

Table 5. Wind impacts on detached buildings

	$90^\circ$			$45^\circ$			$0^\circ$			$M_z \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$
	$M_z \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$M_z \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$M_z \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$			
$43 \pm 31$	$-1 \pm 4$	$-4 \pm 1$	$-98 \pm 86$	$-18 \pm 8$	$-9 \pm 9$	$-4 \pm 97$	$-34 \pm 8$	$4 \pm 13$	1 (1)			
$-270 \pm 258$	$-17 \pm 11$	$-31 \pm 6$	$-86 \pm 248$	$-26 \pm 9$	$-34 \pm 9$	$56 \pm 194$	$-20 \pm 5$	$-18 \pm 8$	1 (2)			
$-10 \pm 112$	$-8 \pm 10$	$-25 \pm 4$	$209 \pm 126$	$-15 \pm 12$	$-24 \pm 13$	$98 \pm 98$	$-22 \pm 5$	$-8 \pm 9$	2			
$-6 \pm 32$	$3 \pm 8$	$-13 \pm 3$	$28 \pm 40$	$-12 \pm 3$	$1 \pm 1$	$-19 \pm 34$	$-15 \pm 4$	$-1 \pm 7$	3 (1)			
$-6 \pm 32$	$3 \pm 9$	$-14 \pm 4$	$29 \pm 42$	$-13 \pm 3$	$2 \pm 1$	$-19 \pm 41$	$-15 \pm 4$	$4 \pm 8$	3 (2)			
$24 \pm 145$	$10 \pm 16$	$-23 \pm 5$	$39 \pm 70$	$-18 \pm 6$	$-2 \pm 9$	$-81 \pm 79$	$-24 \pm 6$	$-1 \pm 11$	4			
$-201 \pm 142$	$-1 \pm 17$	$-30 \pm 8$	$40 \pm 178$	$-19 \pm 8$	$-29 \pm 11$	$58 \pm 102$	$-16 \pm 4$	$-9 \pm 12$	5			
$-7 \pm 75$	$3 \pm 12$	$-24 \pm 6$	$111 \pm 126$	$-23 \pm 5$	$4 \pm 3$	$-131 \pm 77$	$-18 \pm 5$	$-15 \pm 12$	6			
$3 \pm 55$	$0 \pm 11$	$-21 \pm 5$	$-11 \pm 67$	$-13 \pm 9$	$-10 \pm 7$	$7 \pm 56$	$-20 \pm 5$	$-1 \pm 11$	7			
$226 \pm 164$	$8 \pm 15$	$-28 \pm 6$	$109 \pm 44$	$-3 \pm 5$	$-7 \pm 5$	$-195 \pm 74$	$-15 \pm 6$	$2 \pm 10$	8			
$-13 \pm 62$	$10 \pm 10$	$-19 \pm 4$	$122 \pm 63$	$-17 \pm 3$	$2 \pm 2$	$-57 \pm 87$	$-15 \pm 3$	$-16 \pm 6$	9			
$177 \pm 55$	$16 \pm 7$	$-12 \pm 2$	$-209 \pm 213$	$-35 \pm 11$	$3 \pm 8$	$-36 \pm 133$	$-29 \pm 10$	$-8 \pm 12$	10 (1)			
$-15 \pm 89$	$18 \pm 4$	$-10 \pm 2$	$3 \pm 117$	$-21 \pm 6$	$-7 \pm 9$	$-36 \pm 43$	$-16 \pm 6$	$-1 \pm 7$	10 (2)			
$1 \pm 128$	$-2 \pm 16$	$-29 \pm 7$	$-16 \pm 122$	$-17 \pm 7$	$-17 \pm 7$	$-18 \pm 123$	$-25 \pm 6$	$-5 \pm 15$	11			
$-6 \pm 113$	$-2 \pm 13$	$-32 \pm 7$	$70 \pm 109$	$-5 \pm 6$	$-27 \pm 11$	$-23 \pm 53$	$-8 \pm 2$	$-1 \pm 8$	12 (1)			
$-13 \pm 55$	$-2 \pm 8$	$-8 \pm 2$	$-50 \pm 90$	$-24 \pm 10$	$-5 \pm 8$	$-30 \pm 111$	$-32 \pm 7$	$2 \pm 14$	12 (2)			
$158 \pm 71$	$4 \pm 8$	$-3 \pm 1$	$-114 \pm 180$	$-33 \pm 11$	$-1 \pm 10$	$111 \pm 256$	$-42 \pm 9$	$7 \pm 13$	13 (1)			
$94 \pm 207$	$23 \pm 15$	$-34 \pm 7$	$-28 \pm 28$	$-5 \pm 3$	$1 \pm 2$	$-254 \pm 176$	$-15 \pm 7$	$3 \pm 10$	13 (2)			
$226 \pm 316$	$15 \pm 19$	$-20 \pm 4$	$-42 \pm 122$	$-28 \pm 4$	$10 \pm 2$	$-97 \pm 282$	$-41 \pm 9$	$16 \pm 16$	14			
$M_z \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$M_z \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$M_z \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$				

Окончание табл. 5 / End of the Table 5

	315°			270°			225°			180°			135°			
	$M_x \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$M_x \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$M_x \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$M_x \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$M_x \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	
72 ± 95	-25 ± 9	10 ± 9	43 ± 30	2 ± 5	4 ± 1	-99 ± 87	22 ± 8	8 ± 9	1 ± 94	32 ± 7	-3 ± 12	82 ± 96	25 ± 9	-10 ± 9	1 (1)	
-88 ± 24	-8 ± 2	-5 ± 2	-179 ± 220	17 ± 9	29 ± 6	138 ± 193	21 ± 8	28 ± 10	290 ± 134	13 ± 5	11 ± 6	-179 ± 30	-6 ± 2	-9 ± 3	1 (2)	
-102 ± 111	-8 ± 12	25 ± 8	-22 ± 115	0 ± 15	26 ± 7	-19 ± 122	17 ± 7	18 ± 7	16 ± 143	26 ± 7	-5 ± 20	102 ± 79	20 ± 6	-10 ± 11	2	
14 ± 39	-14 ± 8	8 ± 5	-6 ± 33	-3 ± 9	14 ± 3	29 ± 42	13 ± 2	-2 ± 1	-21 ± 26	15 ± 4	0 ± 8	20 ± 38	12 ± 8	-9 ± 5	3 (1)	
20 ± 37	-11 ± 8	9 ± 5	-5 ± 35	-3 ± 9	15 ± 4	29 ± 40	13 ± 3	-1 ± 1	-21 ± 40	15 ± 4	1 ± 8	16 ± 42	14 ± 8	-8 ± 5	3 (2)	
58 ± 57	-10 ± 7	17 ± 5	27 ± 76	-12 ± 13	22 ± 4	50 ± 204	28 ± 6	-7 ± 4	-127 ± 166	28 ± 9	1 ± 14	68 ± 168	24 ± 14	-19 ± 8	4	
-57 ± 76	3 ± 2	18 ± 4	-120 ± 126	7 ± 11	29 ± 7	165 ± 164	26 ± 11	21 ± 15	196 ± 100	18 ± 5	15 ± 15	-163 ± 96	-2 ± 10	-23 ± 7	5	
-5 ± 88	3 ± 2	25 ± 4	-1 ± 105	-12 ± 12	22 ± 5	159 ± 116	22 ± 4	-6 ± 2	-102 ± 89	16 ± 3	7 ± 12	3 ± 55	7 ± 8	-20 ± 9	6	
-14 ± 68	-11 ± 8	10 ± 8	4 ± 51	0 ± 12	20 ± 5	-20 ± 64	11 ± 10	12 ± 7	3 ± 50	21 ± 5	1 ± 12	-14 ± 70	11 ± 8	-12 ± 9	7	
-142 ± 163	-22 ± 12	26 ± 14	56 ± 121	-8 ± 12	26 ± 6	65 ± 37	7 ± 4	-2 ± 4	-99 ± 58	13 ± 3	-3 ± 9	80 ± 150	21 ± 12	-26 ± 9	8	
1 ± 67	2 ± 3	21 ± 4	-11 ± 63	-3 ± 11	22 ± 6	102 ± 61	16 ± 4	0 ± 2	-59 ± 77	17 ± 5	8 ± 12	5 ± 72	-1 ± 2	-19 ± 5	9	
-39 ± 249	-41 ± 12	12 ± 7	-177 ± 230	-16 ± 8	12 ± 2	59 ± 330	43 ± 11	8 ± 8	195 ± 343	42 ± 11	-5 ± 11	196 ± 174	28 ± 14	-11 ± 8	10 (1)	
30 ± 80	-20 ± 10	11 ± 6	-18 ± 89	-19 ± 4	11 ± 2	6 ± 70	19 ± 7	2 ± 8	-29 ± 55	18 ± 6	-1 ± 8	28 ± 70	19 ± 9	-11 ± 5	10 (2)	
96 ± 88	-21 ± 6	10 ± 11	-7 ± 116	7 ± 10	25 ± 5	24 ± 96	19 ± 12	19 ± 12	40 ± 95	22 ± 4	6 ± 9	-92 ± 115	7 ± 13	-26 ± 8	11	
-54 ± 97	-5 ± 8	24 ± 11	-25 ± 102	3 ± 13	30 ± 7	70 ± 94	7 ± 7	25 ± 11	-24 ± 51	8 ± 2	-1 ± 8	-57 ± 102	3 ± 8	-26 ± 10	12 (1)	
67 ± 85	-23 ± 10	6 ± 7	-14 ± 52	2 ± 7	8 ± 2	-57 ± 100	25 ± 9	4 ± 7	-23 ± 115	31 ± 7	-2 ± 13	70 ± 99	25 ± 12	-6 ± 7	12 (2)	
334 ± 215	-25 ± 9	12 ± 10	169 ± 64	-3 ± 8	3 ± 1	-115 ± 170	32 ± 11	1 ± 10	115 ± 251	42 ± 13	-7 ± 13	394 ± 209	27 ± 10	-11 ± 10	13 (1)	
-205 ± 270	-31 ± 12	32 ± 11	96 ± 219	-23 ± 15	35 ± 6	-28 ± 29	5 ± 3	-1 ± 2	-268 ± 191	16 ± 6	-4 ± 9	-162 ± 260	31 ± 12	-30 ± 9	13 (2)	
332 ± 101	-39 ± 7	-4 ± 6	12 ± 110	-24 ± 4	11 ± 3	-257 ± 318	22 ± 13	7 ± 9	-220 ± 533	43 ± 10	-5 ± 7	330 ± 499	40 ± 14	-26 ± 6	14	
$M_x \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$M_x \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$M_x \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$M_x \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$M_x \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$		





Окончание табл. 6 / End of the Table 6

	14		13		12		11		10		9		8		
	I(2)	I(1)	I(2)	I(1)	I(2)	I(1)	I(2)	I(1)	I(2)	I(1)	I(2)	I(1)	I(2)	I(1)	
$F_x \pm \sigma$	-2 ± 14	-2 ± 8	-1 ± 16	-2 ± 10	-3 ± 13	-2 ± 10	-4 ± 16	-2 ± 8	-4 ± 16	-2 ± 10	-7 ± 14	-1 ± 9	-2 ± 16	-2 ± 9	0°
$F_y \pm \sigma$	-2 ± 10	-9 ± 14	0 ± 10	-12 ± 15	-2 ± 10	-8 ± 15	-2 ± 10	-11 ± 11	-3 ± 10	-12 ± 15	-5 ± 11	-7 ± 13	-1 ± 10	-10 ± 17	
$M_z \pm \sigma$	13 ± 170	-44 ± 106	8 ± 203	-56 ± 141	-35 ± 187	-58 ± 146	-28 ± 203	-75 ± 135	-2 ± 237	-57 ± 142	-38 ± 200	-30 ± 143	29 ± 170	-49 ± 148	45°
$F_x \pm \sigma$	-4 ± 12	-3 ± 9	-7 ± 13	-3 ± 8	-2 ± 12	-4 ± 8	-3 ± 13	-5 ± 8	-4 ± 13	-4 ± 7	-6 ± 13	-4 ± 9	-5 ± 12	-4 ± 7	
$F_y \pm \sigma$	-1 ± 8	-10 ± 11	-3 ± 8	-9 ± 11	0 ± 8	-12 ± 7	0 ± 7	-11 ± 9	-1 ± 8	-11 ± 7	-2 ± 9	-10 ± 11	-2 ± 8	-5 ± 10	
$M_z \pm \sigma$	-65 ± 193	-153 ± 107	-84 ± 166	-139 ± 117	-51 ± 168	-166 ± 105	-68 ± 155	-142 ± 106	-78 ± 169	-164 ± 79	-123 ± 192	-174 ± 90	-55 ± 181	-134 ± 87	90°
$F_x \pm \sigma$	-42 ± 13	-6 ± 5	-41 ± 12	-5 ± 5	-43 ± 10	-5 ± 5	-43 ± 10	-6 ± 5	-41 ± 9	-5 ± 3	-40 ± 13	-7 ± 7	-41 ± 12	-8 ± 6	
$F_y \pm \sigma$	-25 ± 16	8 ± 8	-26 ± 14	7 ± 8	-26 ± 13	8 ± 7	-27 ± 15	11 ± 8	-27 ± 13	9 ± 6	-25 ± 15	11 ± 9	-25 ± 15	13 ± 9	
$M_z \pm \sigma$	-378 ± 314	70 ± 92	-374 ± 327	60 ± 85	-378 ± 322	77 ± 86	-406 ± 333	103 ± 78	-413 ± 304	85 ± 72	-399 ± 306	96 ± 85	-414 ± 316	135 ± 82	135°
$F_x \pm \sigma$	-36 ± 9	-6 ± 4	-40 ± 9	-8 ± 4	-33 ± 7	-6 ± 4	-32 ± 8	-7 ± 5	-35 ± 8	-7 ± 5	-38 ± 9	-7 ± 5	-38 ± 10	-8 ± 6	
$F_y \pm \sigma$	-21 ± 11	13 ± 8	-22 ± 12	7 ± 5	-18 ± 10	13 ± 7	-17 ± 9	10 ± 7	-20 ± 11	12 ± 8	-21 ± 11	16 ± 7	-20 ± 11	19 ± 10	
$M_z \pm \sigma$	-350 ± 263	105 ± 58	-369 ± 303	117 ± 50	-329 ± 235	103 ± 57	-313 ± 231	103 ± 58	-333 ± 252	104 ± 63	-355 ± 268	133 ± 66	-346 ± 273	134 ± 76	180°
$F_x \pm \sigma$	-2 ± 2	-3 ± 11	-2 ± 3	-3 ± 11	-1 ± 2	-4 ± 11	-2 ± 2	-3 ± 12	-2 ± 3	-3 ± 12	-6 ± 4	-4 ± 11	-8 ± 3	-5 ± 11	
$F_y \pm \sigma$	2 ± 2	20 ± 6	2 ± 2	20 ± 6	3 ± 2	20 ± 6	2 ± 2	21 ± 6	2 ± 2	22 ± 6	1 ± 2	26 ± 6	0 ± 2	25 ± 5	
$M_z \pm \sigma$	154 ± 32	65 ± 59	148 ± 36	66 ± 59	159 ± 36	66 ± 58	159 ± 37	68 ± 59	165 ± 38	77 ± 60	141 ± 35	28 ± 77	127 ± 37	19 ± 76	225°
$F_x \pm \sigma$	22 ± 5	6 ± 5	21 ± 5	6 ± 5	22 ± 5	6 ± 5	21 ± 5	5 ± 6	22 ± 4	7 ± 5	19 ± 5	4 ± 7	18 ± 4	3 ± 5	
$F_y \pm \sigma$	16 ± 5	-4 ± 14	15 ± 5	-2 ± 15	16 ± 5	-5 ± 15	15 ± 5	-3 ± 15	16 ± 5	-7 ± 13	15 ± 4	-2 ± 18	13 ± 4	-5 ± 12	
$M_z \pm \sigma$	-7 ± 89	-9 ± 98	-8 ± 66	-18 ± 80	-8 ± 89	-13 ± 89	3 ± 72	-9 ± 84	-3 ± 80	-12 ± 85	53 ± 77	-11 ± 100	72 ± 68	-16 ± 74	270°
$F_x \pm \sigma$	16 ± 6	7 ± 5	17 ± 7	7 ± 6	15 ± 5	6 ± 5	15 ± 6	6 ± 7	14 ± 5	6 ± 5	14 ± 7	7 ± 3	14 ± 6	7 ± 4	
$F_y \pm \sigma$	7 ± 6	5 ± 15	7 ± 7	6 ± 17	5 ± 6	9 ± 14	6 ± 6	12 ± 14	6 ± 5	9 ± 12	4 ± 6	4 ± 11	4 ± 6	3 ± 10	
$M_z \pm \sigma$	-364 ± 78	-7 ± 114	-354 ± 83	-8 ± 119	-333 ± 76	-14 ± 118	-286 ± 81	-14 ± 109	-304 ± 76	-7 ± 102	-226 ± 76	49 ± 91	-226 ± 75	48 ± 83	315°
$F_x \pm \sigma$	-4 ± 14	-3 ± 8	-3 ± 14	-1 ± 8	-5 ± 10	-2 ± 6	0 ± 11	-1 ± 6	-2 ± 12	0 ± 7	-8 ± 11	6 ± 6	-10 ± 15	10 ± 7	
$F_y \pm \sigma$	-2 ± 11	-1 ± 13	-3 ± 10	-4 ± 13	-3 ± 8	0 ± 11	0 ± 8	-5 ± 11	-1 ± 8	-4 ± 11	-9 ± 8	-8 ± 11	-10 ± 9	-15 ± 14	
$M_z \pm \sigma$	-65 ± 214	-34 ± 141	-104 ± 185	-51 ± 138	-73 ± 159	-3 ± 102	-61 ± 144	-30 ± 120	-36 ± 157	-31 ± 123	20 ± 126	54 ± 101	122 ± 142	99 ± 143	





**Табл. 8.** Влияние последовательно возводимых зданий на комплекс зданий 3 (1) — «Город столиц: Москва» и 3 (2) — «Город столиц: Санкт-Петербург»

**Table 8.** Impact of sequentially constructed buildings on 3 (1) — “City of Capitals: Moscow” and 3 (2) — “City of Capitals: Saint-Petersburg”

	8		7		6		5		4		3	
	3(2)	3(1)	3(2)	3(1)	3(2)	3(1)	3(2)	3(1)	3(2)	3(1)	3(2)	3(1)
	2 ± 7	5 ± 8	3 ± 8	5 ± 8	0 ± 7	3 ± 6	2 ± 6	5 ± 7	4 ± 5	-1 ± 6	3 ± 5	1 ± 6
	-9 ± 9	-9 ± 7	-11 ± 9	-10 ± 6	-11 ± 9	-7 ± 7	-8 ± 8	-8 ± 7	-12 ± 7	-13 ± 4	-11 ± 6	-12 ± 3
	-8 ± 39	-14 ± 36	-14 ± 39	-21 ± 36	-8 ± 37	-15 ± 31	-10 ± 33	-9 ± 39	-8 ± 26	-25 ± 30	-12 ± 26	-19 ± 27
	-1 ± 5	1 ± 4	-1 ± 4	2 ± 3	-1 ± 7	0 ± 4	0 ± 6	1 ± 3	-1 ± 6	1 ± 3	0 ± 5	0 ± 2
	-1 ± 6	-5 ± 3	1 ± 4	-7 ± 3	0 ± 6	-5 ± 4	0 ± 5	-5 ± 3	1 ± 6	-5 ± 3	-2 ± 7	-11 ± 3
	6 ± 24	-4 ± 14	6 ± 21	-2 ± 15	3 ± 25	-1 ± 15	6 ± 22	-3 ± 14	6 ± 25	-2 ± 15	-11 ± 37	21 ± 35
	-11 ± 4	-9 ± 4	-10 ± 4	-9 ± 4	-10 ± 4	-8 ± 4	-10 ± 4	-7 ± 5	-10 ± 4	-7 ± 4	-9 ± 3	-14 ± 3
	-3 ± 7	7 ± 4	-4 ± 6	6 ± 5	-2 ± 6	7 ± 4	-2 ± 6	7 ± 4	-1 ± 6	7 ± 4	-1 ± 5	10 ± 7
	-17 ± 22	3 ± 19	-16 ± 23	3 ± 18	-15 ± 24	4 ± 18	-15 ± 23	4 ± 18	-15 ± 24	7 ± 18	-13 ± 20	-3 ± 39
	-20 ± 5	-8 ± 6	-19 ± 5	-8 ± 5	-19 ± 5	-8 ± 6	-18 ± 5	-7 ± 6	-19 ± 5	-7 ± 5	-17 ± 4	-5 ± 5
	11 ± 10	9 ± 4	9 ± 9	8 ± 5	8 ± 9	8 ± 5	10 ± 9	9 ± 6	10 ± 9	9 ± 5	9 ± 8	9 ± 4
	5 ± 50	15 ± 23	3 ± 40	16 ± 25	6 ± 45	16 ± 24	6 ± 48	13 ± 23	6 ± 49	13 ± 21	13 ± 44	0 ± 20
	2 ± 3	-7 ± 5	1 ± 4	-7 ± 6	3 ± 4	-7 ± 5	3 ± 4	-7 ± 4	3 ± 4	-7 ± 6	0 ± 5	-5 ± 6
	13 ± 31	9 ± 4	13 ± 2	10 ± 5	14 ± 2	10 ± 5	13 ± 2	10 ± 5	14 ± 2	11 ± 6	14 ± 3	10 ± 5
	52 ± 17	0 ± 18	-17 ± 29	1 ± 23	-22 ± 25	2 ± 20	-21 ± 26	-1 ± 17	-21 ± 27	-2 ± 27	-14 ± 28	-9 ± 29
	-1 ± 9	-1 ± 5	-1 ± 7	-1 ± 4	0 ± 6	0 ± 5	-1 ± 7	-1 ± 5	-1 ± 6	-1 ± 4	-1 ± 6	1 ± 5
	3 ± 5	1 ± 5	3 ± 4	0 ± 5	3 ± 5	1 ± 5	4 ± 4	0 ± 5	5 ± 4	0 ± 5	4 ± 5	-2 ± 5
	-6 ± 26	2 ± 23	-8 ± 25	4 ± 23	-7 ± 26	5 ± 26	-8 ± 25	6 ± 23	-6 ± 27	3 ± 22	-7 ± 25	3 ± 24
	13 ± 7	14 ± 7	12 ± 5	16 ± 5	14 ± 6	18 ± 6	12 ± 5	18 ± 5	12 ± 6	14 ± 5	12 ± 6	13 ± 4
	7 ± 9	2 ± 8	-8 ± 5	-2 ± 8	-10 ± 8	-2 ± 9	-10 ± 7	-5 ± 8	-10 ± 7	-2 ± 6	-10 ± 7	0 ± 6
	11 ± 30	-19 ± 29	11 ± 20	-12 ± 34	10 ± 33	-11 ± 35	10 ± 31	-4 ± 38	7 ± 28	-8 ± 26	8 ± 27	-12 ± 21
	4 ± 6	6 ± 8	5 ± 6	8 ± 8	4 ± 4	8 ± 7	6 ± 7	11 ± 8	6 ± 6	15 ± 7	6 ± 5	12 ± 8
	-4 ± 7	-6 ± 6	-8 ± 7	-7 ± 5	-6 ± 5	-4 ± 5	-12 ± 8	-4 ± 8	-9 ± 6	-4 ± 8	-10 ± 5	-3 ± 8
	5 ± 32	-8 ± 41	6 ± 33	-11 ± 34	9 ± 21	-8 ± 31	10 ± 41	3 ± 41	14 ± 30	2 ± 38	12 ± 26	2 ± 36

	14		13		12		11		10		9	
	3(2)	3(1)	3(2)	3(1)	3(2)	3(1)	3(2)	3(1)	3(2)	3(1)	3(2)	3(1)
$F_x \pm \sigma$	1 ± 8	4 ± 8	2 ± 7	3 ± 8	3 ± 9	3 ± 8	1 ± 6	3 ± 8	3 ± 7	5 ± 8	4 ± 8	3 ± 6
$F_y \pm \sigma$	-4 ± 9	-5 ± 8	-5 ± 11	-6 ± 7	-8 ± 10	-9 ± 7	-5 ± 9	-8 ± 6	-11 ± 9	-10 ± 7	-9 ± 8	-9 ± 7
$M_z \pm \sigma$	-2 ± 37	-7 ± 41	1 ± 38	-10 ± 38	-1 ± 42	-13 ± 34	3 ± 32	-14 ± 33	-8 ± 40	-20 ± 38	-3 ± 34	-20 ± 32
$F_x \pm \sigma$	0 ± 6	2 ± 7	0 ± 6	1 ± 6	-1 ± 6	1 ± 4	-1 ± 6	2 ± 3	0 ± 7	1 ± 4	-1 ± 5	1 ± 3
$F_y \pm \sigma$	-1 ± 6	-4 ± 7	-1 ± 7	-4 ± 6	-1 ± 6	-9 ± 4	-1 ± 5	-6 ± 3	-1 ± 6	-8 ± 4	0 ± 6	-7 ± 3
$M_z \pm \sigma$	5 ± 27	-7 ± 24	8 ± 31	-7 ± 25	12 ± 31	-6 ± 18	8 ± 23	-5 ± 16	9 ± 26	-6 ± 14	9 ± 26	-5 ± 15
$F_x \pm \sigma$	-8 ± 3	-7 ± 4	-8 ± 3	-8 ± 4	-7 ± 3	-7 ± 3	-8 ± 3	-8 ± 3	-8 ± 3	-6 ± 2	-9 ± 4	-8 ± 4
$F_y \pm \sigma$	-2 ± 6	6 ± 4	-2 ± 5	6 ± 4	-2 ± 5	6 ± 3	-3 ± 5	6 ± 4	-2 ± 5	6 ± 3	-2 ± 6	7 ± 5
$M_z \pm \sigma$	-16 ± 21	4 ± 17	-15 ± 21	1 ± 16	-16 ± 19	3 ± 13	-16 ± 18	4 ± 15	-15 ± 18	2 ± 11	-16 ± 22	2 ± 18
$F_x \pm \sigma$	-16 ± 4	-6 ± 4	-16 ± 4	-7 ± 5	-17 ± 4	-6 ± 5	-17 ± 4	-6 ± 5	-17 ± 4	-7 ± 5	-19 ± 5	-7 ± 5
$F_y \pm \sigma$	8 ± 8	7 ± 3	-2 ± 4	9 ± 5	10 ± 8	8 ± 4	9 ± 8	8 ± 5	9 ± 9	7 ± 4	11 ± 9	8 ± 4
$M_z \pm \sigma$	3 ± 38	14 ± 17	19 ± 29	12 ± 28	4 ± 43	12 ± 18	4 ± 41	12 ± 21	4 ± 41	15 ± 17	1 ± 48	13 ± 19
$F_x \pm \sigma$	3 ± 4	-7 ± 6	3 ± 4	-7 ± 4	4 ± 4	-8 ± 6	3 ± 4	-7 ± 5	3 ± 4	-8 ± 6	1 ± 4	-7 ± 5
$F_y \pm \sigma$	14 ± 3	10 ± 5	13 ± 3	9 ± 4	15 ± 3	10 ± 4	14 ± 3	10 ± 4	15 ± 3	10 ± 5	14 ± 3	10 ± 4
$M_z \pm \sigma$	-18 ± 26	-2 ± 27	-18 ± 25	-3 ± 17	-19 ± 29	-1 ± 20	-20 ± 27	0 ± 17	-19 ± 28	3 ± 25	-19 ± 29	2 ± 18
$F_x \pm \sigma$	-2 ± 7	0 ± 6	-3 ± 6	0 ± 6	-3 ± 8	0 ± 5	1 ± 8	-2 ± 6	-2 ± 6	-1 ± 5	-1 ± 6	-1 ± 5
$F_y \pm \sigma$	2 ± 7	0 ± 7	2 ± 6	-1 ± 7	2 ± 7	0 ± 6	2 ± 6	0 ± 6	3 ± 6	0 ± 6	3 ± 6	0 ± 6
$M_z \pm \sigma$	-4 ± 31	4 ± 31	-5 ± 29	5 ± 30	-7 ± 27	1 ± 24	-11 ± 30	4 ± 27	-8 ± 28	6 ± 30	-6 ± 25	1 ± 24
$F_x \pm \sigma$	2 ± 7	4 ± 8	2 ± 6	5 ± 9	1 ± 5	4 ± 7	2 ± 7	4 ± 8	0 ± 7	6 ± 8	13 ± 6	15 ± 5
$F_y \pm \sigma$	-1 ± 7	-4 ± 9	-2 ± 8	-3 ± 8	-2 ± 6	-3 ± 8	-3 ± 7	-1 ± 9	-1 ± 8	-4 ± 8	-8 ± 6	2 ± 9
$M_z \pm \sigma$	-1 ± 36	10 ± 44	-4 ± 37	6 ± 35	2 ± 31	5 ± 39	-1 ± 35	8 ± 39	-6 ± 35	2 ± 38	12 ± 26	-19 ± 36
$F_x \pm \sigma$	3 ± 10	7 ± 10	4 ± 8	6 ± 9	2 ± 5	6 ± 9	4 ± 8	7 ± 9	3 ± 7	5 ± 8	4 ± 5	5 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-7 ± 9	-1 ± 10	-6 ± 9	-2 ± 8	-4 ± 6	-2 ± 9	-5 ± 8	-5 ± 7	-6 ± 8	-7 ± 8	-4 ± 6	-6 ± 5
$M_z \pm \sigma$	1 ± 36	1 ± 43	1 ± 36	-4 ± 37	-11 ± 32	-2 ± 36	-6 ± 38	-1 ± 35	-3 ± 31	-6 ± 37	6 ± 23	-9 ± 30

Табл. 9. Влияние последовательно возводимых зданий на комплекс 4 — «Империю»

Table 9. Impact of sequentially constructed buildings on 4 — “Imperia Tower”

	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
$F_x \pm \sigma$	6 ± 14	-7 ± 19	-8 ± 8	25 ± 7	-4 ± 11	8 ± 12	50 ± 123	7 ± 14
$F_y \pm \sigma$	-12 ± 15	-6 ± 16	30 ± 216	10 ± 8	27 ± 10	27 ± 10	11 ± 7	-12 ± 16
$M_z \pm \sigma$	-49 ± 157	-7 ± 19	30 ± 216	77 ± 85	17 ± 185	-88 ± 134	-29 ± 118	-8 ± 157
$F_x \pm \sigma$	6 ± 11	-1 ± 9	1 ± 75	15 ± 10	34 ± 166	1 ± 8	16 ± 9	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-17 ± 8	-2 ± 9	18 ± 68	15 ± 11	38 ± 171	-1 ± 7	11 ± 5	-20 ± 5
$M_z \pm \sigma$	-35 ± 117	-2 ± 9	18 ± 68	15 ± 11	38 ± 171	-1 ± 7	11 ± 5	-20 ± 5
$F_x \pm \sigma$	0 ± 12	-2 ± 6	-17 ± 51	11 ± 8	93 ± 69	0 ± 6	10 ± 6	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-27 ± 9	-16 ± 6	-17 ± 51	11 ± 8	93 ± 69	9 ± 9	10 ± 6	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-42 ± 129	-16 ± 6	-17 ± 51	11 ± 8	93 ± 69	-39 ± 90	10 ± 6	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	2 ± 12	-2 ± 7	-16 ± 59	11 ± 7	90 ± 68	8 ± 8	6 ± 8	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-24 ± 9	-16 ± 7	-16 ± 59	11 ± 7	90 ± 68	8 ± 8	6 ± 8	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-37 ± 122	-16 ± 7	-16 ± 59	11 ± 7	90 ± 68	-51 ± 67	6 ± 8	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	0 ± 12	-3 ± 7	-3 ± 7	12 ± 9	95 ± 69	-2 ± 6	7 ± 6	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-26 ± 9	-18 ± 6	-23 ± 65	12 ± 9	95 ± 69	10 ± 10	7 ± 6	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-44 ± 134	-18 ± 6	-23 ± 65	12 ± 9	95 ± 69	-44 ± 87	7 ± 6	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	1 ± 12	-2 ± 7	-31 ± 56	10 ± 6	86 ± 61	-3 ± 9	5 ± 7	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-27 ± 10	-19 ± 7	-31 ± 56	10 ± 6	86 ± 61	8 ± 9	5 ± 7	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-27 ± 133	-19 ± 7	-31 ± 56	10 ± 6	86 ± 61	-31 ± 109	5 ± 7	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	-5 ± 11	-5 ± 7	-7 ± 6	9 ± 7	78 ± 68	-2 ± 9	4 ± 8	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-23 ± 9	-16 ± 7	-15 ± 72	9 ± 7	78 ± 68	9 ± 11	4 ± 8	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-42 ± 125	-16 ± 7	-15 ± 72	9 ± 7	78 ± 68	-35 ± 105	4 ± 8	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	-2 ± 13	-3 ± 7	-7 ± 6	10 ± 7	82 ± 64	7 ± 10	3 ± 8	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-26 ± 9	-19 ± 6	-7 ± 6	10 ± 7	82 ± 64	7 ± 10	3 ± 8	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-77 ± 126	-19 ± 6	-7 ± 6	10 ± 7	82 ± 64	-37 ± 95	3 ± 8	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	5 ± 14	-11 ± 14	28 ± 205	10 ± 8	77 ± 72	-38 ± 108	49 ± 126	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-14 ± 13	-11 ± 14	28 ± 205	10 ± 8	77 ± 72	-38 ± 108	49 ± 126	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-34 ± 154	-11 ± 14	28 ± 205	10 ± 8	77 ± 72	-38 ± 108	49 ± 126	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	6 ± 14	-6 ± 16	-8 ± 8	25 ± 7	-15 ± 7	8 ± 12	50 ± 123	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-12 ± 15	-6 ± 16	-8 ± 8	25 ± 7	-15 ± 7	8 ± 12	50 ± 123	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-49 ± 157	-6 ± 16	-8 ± 8	25 ± 7	-15 ± 7	8 ± 12	50 ± 123	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	7 ± 10	-17 ± 6	18 ± 68	15 ± 11	31 ± 7	9 ± 8	11 ± 5	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-17 ± 8	-17 ± 6	18 ± 68	15 ± 11	31 ± 7	9 ± 8	11 ± 5	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-35 ± 117	-17 ± 6	18 ± 68	15 ± 11	31 ± 7	9 ± 8	11 ± 5	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	0 ± 12	-2 ± 6	-24 ± 4	26 ± 6	30 ± 7	0 ± 6	10 ± 6	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-27 ± 9	-16 ± 6	-24 ± 4	26 ± 6	30 ± 7	0 ± 6	10 ± 6	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-42 ± 129	-16 ± 6	-24 ± 4	26 ± 6	30 ± 7	0 ± 6	10 ± 6	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	2 ± 12	-16 ± 7	-23 ± 4	26 ± 6	30 ± 7	8 ± 8	6 ± 8	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-24 ± 9	-20 ± 7	-23 ± 4	26 ± 6	30 ± 7	8 ± 8	6 ± 8	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-37 ± 122	-20 ± 7	-23 ± 4	26 ± 6	30 ± 7	8 ± 8	6 ± 8	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	0 ± 12	-16 ± 6	-23 ± 4	28 ± 7	4 ± 212	-2 ± 6	5 ± 7	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-27 ± 9	-16 ± 6	-23 ± 4	28 ± 7	4 ± 212	10 ± 10	5 ± 7	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-42 ± 129	-16 ± 6	-23 ± 4	28 ± 7	4 ± 212	-44 ± 87	5 ± 7	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	2 ± 12	-16 ± 7	-9 ± 7	25 ± 9	23 ± 151	-51 ± 67	6 ± 8	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-24 ± 9	-16 ± 7	-9 ± 7	25 ± 9	23 ± 151	-51 ± 67	6 ± 8	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-37 ± 122	-16 ± 7	-9 ± 7	25 ± 9	23 ± 151	-51 ± 67	6 ± 8	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	0 ± 12	-3 ± 7	-9 ± 7	28 ± 7	-2 ± 14	-2 ± 6	7 ± 6	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-26 ± 9	-18 ± 6	-9 ± 7	28 ± 7	-2 ± 14	10 ± 10	7 ± 6	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-44 ± 134	-18 ± 6	-9 ± 7	28 ± 7	-2 ± 14	-44 ± 87	7 ± 6	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	1 ± 12	-2 ± 7	-9 ± 7	27 ± 7	-2 ± 13	-3 ± 9	5 ± 7	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-27 ± 10	-19 ± 7	-9 ± 7	27 ± 7	-2 ± 13	8 ± 9	5 ± 7	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-27 ± 133	-19 ± 7	-9 ± 7	27 ± 7	-2 ± 13	-31 ± 109	5 ± 7	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	-5 ± 11	-5 ± 7	-7 ± 6	27 ± 7	-2 ± 12	-2 ± 9	4 ± 8	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-23 ± 9	-16 ± 7	-7 ± 6	27 ± 7	-2 ± 12	9 ± 11	4 ± 8	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-42 ± 125	-16 ± 7	-7 ± 6	27 ± 7	-2 ± 12	-35 ± 105	4 ± 8	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	-2 ± 13	-3 ± 7	-7 ± 6	25 ± 7	-2 ± 12	7 ± 10	3 ± 8	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-26 ± 9	-19 ± 6	-7 ± 6	25 ± 7	-2 ± 12	7 ± 10	3 ± 8	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-77 ± 126	-19 ± 6	-7 ± 6	25 ± 7	-2 ± 12	-37 ± 95	3 ± 8	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	5 ± 14	-11 ± 14	28 ± 205	10 ± 8	77 ± 72	-38 ± 108	49 ± 126	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-14 ± 13	-11 ± 14	28 ± 205	10 ± 8	77 ± 72	-38 ± 108	49 ± 126	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-34 ± 154	-11 ± 14	28 ± 205	10 ± 8	77 ± 72	-38 ± 108	49 ± 126	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	6 ± 14	-7 ± 19	-8 ± 8	25 ± 7	-4 ± 11	8 ± 12	50 ± 123	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-12 ± 15	-6 ± 16	-8 ± 8	25 ± 7	-4 ± 11	8 ± 12	50 ± 123	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-49 ± 157	-6 ± 16	-8 ± 8	25 ± 7	-4 ± 11	8 ± 12	50 ± 123	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	7 ± 10	-17 ± 6	18 ± 68	15 ± 11	31 ± 7	9 ± 8	11 ± 5	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-17 ± 8	-17 ± 6	18 ± 68	15 ± 11	31 ± 7	9 ± 8	11 ± 5	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-35 ± 117	-17 ± 6	18 ± 68	15 ± 11	31 ± 7	9 ± 8	11 ± 5	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	0 ± 12	-2 ± 6	-24 ± 4	26 ± 6	30 ± 7	0 ± 6	10 ± 6	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-27 ± 9	-16 ± 6	-24 ± 4	26 ± 6	30 ± 7	0 ± 6	10 ± 6	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-42 ± 129	-16 ± 6	-24 ± 4	26 ± 6	30 ± 7	0 ± 6	10 ± 6	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	2 ± 12	-16 ± 7	-23 ± 4	26 ± 6	30 ± 7	8 ± 8	6 ± 8	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-24 ± 9	-20 ± 7	-23 ± 4	26 ± 6	30 ± 7	8 ± 8	6 ± 8	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-37 ± 122	-20 ± 7	-23 ± 4	26 ± 6	30 ± 7	8 ± 8	6 ± 8	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	0 ± 12	-3 ± 7	-9 ± 7	28 ± 7	-2 ± 14	-2 ± 6	7 ± 6	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-26 ± 9	-18 ± 6	-9 ± 7	28 ± 7	-2 ± 14	10 ± 10	7 ± 6	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-44 ± 134	-18 ± 6	-9 ± 7	28 ± 7	-2 ± 14	-44 ± 87	7 ± 6	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	1 ± 12	-2 ± 7	-9 ± 7	27 ± 7	-2 ± 13	-3 ± 9	5 ± 7	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-27 ± 10	-19 ± 7	-9 ± 7	27 ± 7	-2 ± 13	8 ± 9	5 ± 7	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-27 ± 133	-19 ± 7	-9 ± 7	27 ± 7	-2 ± 13	-31 ± 109	5 ± 7	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	-5 ± 11	-5 ± 7	-7 ± 6	27 ± 7	-2 ± 12	-2 ± 9	4 ± 8	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-23 ± 9	-16 ± 7	-7 ± 6	27 ± 7	-2 ± 12	9 ± 11	4 ± 8	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-42 ± 125	-16 ± 7	-7 ± 6	27 ± 7	-2 ± 12	-35 ± 105	4 ± 8	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	-2 ± 13	-3 ± 7	-7 ± 6	25 ± 7	-2 ± 12	7 ± 10	3 ± 8	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-26 ± 9	-19 ± 6	-7 ± 6	25 ± 7	-2 ± 12	7 ± 10	3 ± 8	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-77 ± 126	-19 ± 6	-7 ± 6	25 ± 7	-2 ± 12	-37 ± 95	3 ± 8	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	5 ± 14	-11 ± 14	28 ± 205	10 ± 8	77 ± 72	-38 ± 108	49 ± 126	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-14 ± 13	-11 ± 14	28 ± 205	10 ± 8	77 ± 72	-38 ± 108	49 ± 126	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-34 ± 154	-11 ± 14	28 ± 205	10 ± 8	77 ± 72	-38 ± 108	49 ± 126	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	6 ± 14	-7 ± 19	-8 ± 8	25 ± 7	-4 ± 11	8 ± 12	50 ± 123	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-12 ± 15	-6 ± 16	-8 ± 8	25 ± 7	-4 ± 11	8 ± 12	50 ± 123	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-49 ± 157	-6 ± 16	-8 ± 8	25 ± 7	-4 ± 11	8 ± 12	50 ± 123	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	7 ± 10	-17 ± 6	18 ± 68	15 ± 11	31 ± 7	9 ± 8	11 ± 5	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-17 ± 8	-17 ± 6	18 ± 68	15 ± 11	31 ± 7	9 ± 8	11 ± 5	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-35 ± 117	-17 ± 6	18 ± 68	15 ± 11	31 ± 7	9 ± 8	11 ± 5	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	0 ± 12	-2 ± 6	-24 ± 4	26 ± 6	30 ± 7	0 ± 6	10 ± 6	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-27 ± 9	-16 ± 6	-24 ± 4	26 ± 6	30 ± 7	0 ± 6	10 ± 6	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-42 ± 129	-16 ± 6	-24 ± 4	26 ± 6	30 ± 7	0 ± 6	10 ± 6	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	2 ± 12	-16 ± 7	-23 ± 4	26 ± 6	30 ± 7	8 ± 8	6 ± 8	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-24 ± 9	-20 ± 7	-23 ± 4	26 ± 6	30 ± 7	8 ± 8	6 ± 8	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-37 ± 122	-20 ± 7	-23 ± 4	26 ± 6	30 ± 7	8 ± 8	6 ± 8	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	0 ± 12	-3 ± 7	-9 ± 7	28 ± 7	-2 ± 14	-2 ± 6	7 ± 6	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-26 ± 9	-18 ± 6	-9 ± 7	28 ± 7	-2 ± 14	10 ± 10	7 ± 6	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-44 ± 134	-18 ± 6	-9 ± 7	28 ± 7	-2 ± 14	-44 ± 87	7 ± 6	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	1 ± 12	-2 ± 7	-9 ± 7	27 ± 7	-2 ± 13	-3 ± 9	5 ± 7	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-27 ± 10	-19 ± 7	-9 ± 7	27 ± 7	-2 ± 13	8 ± 9	5 ± 7	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-27 ± 133	-19 ± 7	-9 ± 7	27 ± 7	-2 ± 13	-31 ± 109	5 ± 7	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	-5 ± 11	-5 ± 7	-7 ± 6	27 ± 7	-2 ± 12	-2 ± 9	4 ± 8	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-23 ± 9	-16 ± 7	-7 ± 6	27 ± 7	-2 ± 12	9 ± 11	4 ± 8	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-42 ± 125	-16 ± 7	-7 ± 6	27 ± 7	-2 ± 12	-35 ± 105	4 ± 8	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	-2 ± 13	-3 ± 7	-7 ± 6	25 ± 7	-2 ± 12	7 ± 10	3 ± 8	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-26 ± 9							



Табл. 10. Влияние последовательно возводимых зданий на комплекс 5 — «Меркурий»

Table 10. Impact of sequentially constructed buildings on 5 — “Mercury City Tower”

	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5
$F_x \pm \sigma$	-2 ± 11	-4 ± 12	-2 ± 9	-3 ± 8	-8 ± 8	-7 ± 9	-7 ± 8	-7 ± 8	-8 ± 8	-8 ± 10
$F_y \pm \sigma$	-5 ± 8	-15 ± 6	-12 ± 4	-12 ± 3	-11 ± 3	-12 ± 3	-12 ± 3	-12 ± 3	-12 ± 3	-12 ± 4
$M_z \pm \sigma$	44 ± 123	78 ± 107	30 ± 88	42 ± 84	42 ± 79	42 ± 80	36 ± 79	46 ± 84	50 ± 85	42 ± 86
$F_x \pm \sigma$	-9 ± 8	-9 ± 10	-18 ± 7	-18 ± 6	-20 ± 8	-25 ± 8	-24 ± 9	-25 ± 9	-23 ± 8	-27 ± 9
$F_y \pm \sigma$	-3 ± 7	-7 ± 5	-11 ± 5	-8 ± 7	-10 ± 7	-12 ± 9	-12 ± 9	-13 ± 8	-12 ± 8	-14 ± 9
$M_z \pm \sigma$	50 ± 91	48 ± 85	55 ± 78	38 ± 98	-1 ± 107	6 ± 123	-13 ± 131	8 ± 135	27 ± 123	4 ± 137
$F_x \pm \sigma$	-31 ± 10	-29 ± 11	-26 ± 7	-29 ± 7	-29 ± 9	-30 ± 8	-29 ± 9	-29 ± 8	-32 ± 8	-34 ± 9
$F_y \pm \sigma$	-15 ± 12	-13 ± 13	-11 ± 10	-8 ± 13	-2 ± 16	-6 ± 17	-2 ± 18	1 ± 16	-5 ± 17	0 ± 20
$M_z \pm \sigma$	-190 ± 145	-130 ± 150	-154 ± 133	-208 ± 139	-223 ± 161	-219 ± 154	-221 ± 145	-251 ± 139	-202 ± 168	-234 ± 164
$F_x \pm \sigma$	-10 ± 11	-9 ± 12	-6 ± 13	-3 ± 14	-8 ± 14	-9 ± 13	-7 ± 18	-10 ± 14	-17 ± 16	-16 ± 14
$F_y \pm \sigma$	7 ± 10	6 ± 10	6 ± 9	5 ± 8	4 ± 12	0 ± 10	-1 ± 13	1 ± 11	2 ± 12	3 ± 13
$M_z \pm \sigma$	-117 ± 159	-103 ± 184	-6 ± 184	2 ± 173	-41 ± 181	-61 ± 179	-44 ± 250	-96 ± 180	-106 ± 226	-109 ± 159
$F_x \pm \sigma$	10 ± 18	6 ± 16	10 ± 17	11 ± 20	10 ± 18	13 ± 21	12 ± 15	6 ± 14	6 ± 14	8 ± 16
$F_y \pm \sigma$	7 ± 10	8 ± 11	9 ± 13	7 ± 10	6 ± 12	7 ± 12	9 ± 12	4 ± 9	10 ± 13	7 ± 8
$M_z \pm \sigma$	88 ± 266	76 ± 226	126 ± 222	107 ± 219	74 ± 209	75 ± 235	96 ± 185	39 ± 191	80 ± 158	67 ± 188
$F_x \pm \sigma$	6 ± 10	6 ± 11	9 ± 14	6 ± 11	5 ± 11	8 ± 14	9 ± 20	4 ± 14	1 ± 11	4 ± 15
$F_y \pm \sigma$	6 ± 9	4 ± 8	9 ± 10	6 ± 9	8 ± 8	10 ± 11	10 ± 14	6 ± 11	5 ± 12	7 ± 12
$M_z \pm \sigma$	73 ± 139	94 ± 139	91 ± 184	63 ± 138	109 ± 122	143 ± 204	203 ± 186	149 ± 203	158 ± 172	159 ± 157
$F_x \pm \sigma$	11 ± 11	4 ± 14	8 ± 13	11 ± 11	10 ± 10	10 ± 9	14 ± 10	10 ± 11	11 ± 10	23 ± 14
$F_y \pm \sigma$	4 ± 14	0 ± 11	4 ± 15	3 ± 11	2 ± 12	3 ± 10	7 ± 13	3 ± 12	4 ± 15	9 ± 15
$M_z \pm \sigma$	-32 ± 161	-30 ± 155	-21 ± 188	-39 ± 168	-58 ± 135	-63 ± 138	-130 ± 175	-69 ± 153	-96 ± 163	-172 ± 171
$F_x \pm \sigma$	17 ± 18	18 ± 15	20 ± 17	22 ± 12	22 ± 11	18 ± 8	22 ± 11	16 ± 6	21 ± 5	21 ± 5
$F_y \pm \sigma$	-7 ± 16	-3 ± 12	0 ± 18	-4 ± 12	-4 ± 12	-2 ± 8	-3 ± 11	-1 ± 6	3 ± 3	4 ± 3
$M_z \pm \sigma$	-33 ± 193	-79 ± 184	-74 ± 186	-108 ± 127	-62 ± 111	-46 ± 101	-46 ± 115	-48 ± 87	-88 ± 97	-99 ± 95



	14	13	12	11	10
$F_x \pm \sigma$	9 ± 15	5 ± 16	6 ± 14	4 ± 13	7 ± 12
$F_y \pm \sigma$	-9 ± 14	-8 ± 15	-27 ± 7	-25 ± 6	-23 ± 6
$M_z \pm \sigma$	14 ± 86	11 ± 102	-11 ± 75	-16 ± 70	-13 ± 64
$F_x \pm \sigma$	-4 ± 13	-6 ± 12	-11 ± 10	-8 ± 8	-6 ± 9
$F_y \pm \sigma$	-18 ± 10	-16 ± 9	-15 ± 4	-12 ± 5	-14 ± 3
$M_z \pm \sigma$	13 ± 65	11 ± 63	10 ± 59	4 ± 57	16 ± 65
$F_x \pm \sigma$	-15 ± 2	-14 ± 3	-13 ± 3	-14 ± 3	-14 ± 3
$F_y \pm \sigma$	-2 ± 6	-1 ± 6	-1 ± 6	-3 ± 7	-2 ± 7
$M_z \pm \sigma$	4 ± 32	3 ± 27	4 ± 28	6 ± 37	8 ± 37
$F_x \pm \sigma$	8 ± 3	7 ± 2	8 ± 3	8 ± 4	10 ± 3
$F_y \pm \sigma$	20 ± 3	19 ± 3	22 ± 4	23 ± 4	24 ± 4
$M_z \pm \sigma$	-30 ± 58	-29 ± 57	-36 ± 66	-38 ± 66	-36 ± 70
$F_x \pm \sigma$	8 ± 10	7 ± 10	9 ± 10	7 ± 11	5 ± 9
$F_y \pm \sigma$	19 ± 7	16 ± 6	19 ± 8	19 ± 8	19 ± 6
$M_z \pm \sigma$	37 ± 54	37 ± 34	34 ± 51	41 ± 50	38 ± 46
$F_x \pm \sigma$	8 ± 9	12 ± 11	9 ± 9	10 ± 9	12 ± 10
$F_y \pm \sigma$	6 ± 7	6 ± 8	7 ± 7	6 ± 8	5 ± 7
$M_z \pm \sigma$	7 ± 46	1 ± 64	0 ± 53	1 ± 54	-3 ± 53
$F_x \pm \sigma$	7 ± 9	8 ± 8	6 ± 8	6 ± 7	6 ± 10
$F_y \pm \sigma$	-6 ± 9	-4 ± 10	-2 ± 8	-2 ± 6	-2 ± 8
$M_z \pm \sigma$	7 ± 44	7 ± 52	8 ± 42	7 ± 35	7 ± 44
$F_x \pm \sigma$	7 ± 13	7 ± 12	5 ± 11	8 ± 13	16 ± 12
$F_y \pm \sigma$	-4 ± 13	-4 ± 9	-6 ± 11	-8 ± 13	-11 ± 13
$M_z \pm \sigma$	14 ± 70	-5 ± 69	-3 ± 59	-1 ± 78	0 ± 81

Табл. 13. Влияние последовательно возводимых зданий на комплекс 8 — «Евразия»

Table 13. Impact of sequentially constructed buildings on 8 — “Eurasia Tower”

	14	13	12	11	10	9	8
$F_x \pm \sigma$	-5 ± 15	-4 ± 17	-1 ± 15	-4 ± 12	-2 ± 10	-2 ± 12	-1 ± 16
$F_y \pm \sigma$	-4 ± 8	-4 ± 8	-4 ± 8	-5 ± 5	-3 ± 4	-6 ± 6	-7 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-144 ± 165	-141 ± 191	-108 ± 193	-107 ± 76	-122 ± 84	-165 ± 93	-166 ± 166
$F_x \pm \sigma$	-5 ± 10	-6 ± 10	-10 ± 9	-6 ± 8	-6 ± 7	-5 ± 9	-5 ± 13
$F_y \pm \sigma$	-2 ± 6	-2 ± 6	0 ± 7	-1 ± 6	0 ± 4	-2 ± 6	2 ± 11
$M_z \pm \sigma$	-73 ± 111	-73 ± 109	-55 ± 114	-46 ± 106	-84 ± 82	-108 ± 106	-48 ± 176
$F_x \pm \sigma$	-18 ± 9	-18 ± 9	-19 ± 8	-19 ± 10	-12 ± 8	-13 ± 9	-12 ± 9
$F_y \pm \sigma$	6 ± 12	6 ± 11	5 ± 13	5 ± 14	5 ± 10	3 ± 12	0 ± 9
$M_z \pm \sigma$	229 ± 154	225 ± 168	239 ± 173	227 ± 137	169 ± 131	199 ± 163	161 ± 134
$F_x \pm \sigma$	-11 ± 10	-12 ± 8	-7 ± 11	-11 ± 11	-11 ± 10	-6 ± 13	-7 ± 13
$F_y \pm \sigma$	6 ± 9	9 ± 8	4 ± 8	8 ± 8	6 ± 8	1 ± 7	4 ± 10
$M_z \pm \sigma$	27 ± 124	9 ± 122	1 ± 133	8 ± 141	14 ± 119	-10 ± 103	10 ± 128
$F_x \pm \sigma$	-12 ± 9	-11 ± 8	-11 ± 8	-13 ± 9	-11 ± 9	-13 ± 14	-12 ± 15
$F_y \pm \sigma$	5 ± 8	5 ± 7	5 ± 8	6 ± 9	4 ± 8	8 ± 12	10 ± 12
$M_z \pm \sigma$	-7 ± 114	-10 ± 125	22 ± 122	4 ± 134	-6 ± 124	6 ± 137	54 ± 179
$F_x \pm \sigma$	6 ± 9	2 ± 8	4 ± 8	4 ± 10	4 ± 9	4 ± 9	0 ± 4
$F_y \pm \sigma$	4 ± 11	9 ± 11	8 ± 10	5 ± 11	4 ± 9	6 ± 8	4 ± 4
$M_z \pm \sigma$	96 ± 66	120 ± 63	119 ± 65	85 ± 67	91 ± 63	99 ± 67	34 ± 38
$F_x \pm \sigma$	6 ± 8	7 ± 8	9 ± 9	8 ± 7	6 ± 6	10 ± 8	23 ± 5
$F_y \pm \sigma$	6 ± 12	6 ± 12	3 ± 13	4 ± 11	5 ± 9	3 ± 14	-10 ± 13
$M_z \pm \sigma$	149 ± 106	148 ± 97	156 ± 112	131 ± 90	140 ± 74	127 ± 112	110 ± 105
$F_x \pm \sigma$	3 ± 10	2 ± 11	6 ± 11	1 ± 8	3 ± 6	-1 ± 5	9 ± 7
$F_y \pm \sigma$	-1 ± 10	0 ± 9	-1 ± 10	-1 ± 6	0 ± 6	0 ± 4	-9 ± 6
$M_z \pm \sigma$	-30 ± 127	-4 ± 126	-18 ± 108	-26 ± 72	3 ± 75	-12 ± 59	-10 ± 95





	13		14		
	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	
					0°
$F_x \pm \sigma$	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)
$F_y \pm \sigma$	1 ± 6	4 ± 8	-3 ± 9	4 ± 8	-3 ± 10
$M_z \pm \sigma$	-3 ± 9	-5 ± 13	-13 ± 12	-5 ± 13	-15 ± 11
					45°
$F_x \pm \sigma$	21 ± 49	34 ± 59	79 ± 178	34 ± 59	125 ± 211
$F_y \pm \sigma$	-2 ± 8	-5 ± 5	-1 ± 9	-5 ± 5	0 ± 7
$M_z \pm \sigma$	4 ± 10	2 ± 9	-18 ± 20	2 ± 9	-11 ± 17
					90°
$F_x \pm \sigma$	21 ± 55	8 ± 48	-82 ± 276	8 ± 48	-56 ± 233
$F_y \pm \sigma$	-13 ± 10	-15 ± 10	-4 ± 7	-15 ± 10	-3 ± 6
$M_z \pm \sigma$	11 ± 18	12 ± 18	-6 ± 14	12 ± 18	-5 ± 15
					135°
$F_x \pm \sigma$	8 ± 104	2 ± 100	-112 ± 214	2 ± 100	-111 ± 195
$F_y \pm \sigma$	-9 ± 8	-5 ± 5	-6 ± 8	-5 ± 5	-5 ± 8
$M_z \pm \sigma$	5 ± 13	2 ± 7	6 ± 11	2 ± 7	6 ± 8
					180°
$F_x \pm \sigma$	-2 ± 63	-6 ± 49	-69 ± 158	-6 ± 49	-39 ± 91
$F_y \pm \sigma$	0 ± 6	-2 ± 6	-7 ± 7	-2 ± 6	-7 ± 7
$M_z \pm \sigma$	-1 ± 8	-2 ± 9	27 ± 7	-2 ± 9	30 ± 7
					225°
$F_x \pm \sigma$	-6 ± 55	-4 ± 60	88 ± 101	-4 ± 60	93 ± 99
$F_y \pm \sigma$	-1 ± 3	0 ± 3	6 ± 3	0 ± 3	6 ± 3
$M_z \pm \sigma$	-9 ± 8	-9 ± 8	31 ± 4	-9 ± 8	31 ± 4
					270°
$F_x \pm \sigma$	-7 ± 38	-9 ± 40	-86 ± 59	-9 ± 40	-99 ± 49
$F_y \pm \sigma$	13 ± 4	13 ± 4	21 ± 5	13 ± 4	22 ± 4
$M_z \pm \sigma$	-7 ± 6	-7 ± 7	-44 ± 18	-7 ± 7	-50 ± 15
					315°
$F_x \pm \sigma$	-2 ± 51	2 ± 51	19 ± 325	2 ± 51	22 ± 375
$F_y \pm \sigma$	21 ± 7	20 ± 7	3 ± 7	20 ± 7	3 ± 7
$M_z \pm \sigma$	-13 ± 12	-12 ± 11	-15 ± 11	-12 ± 11	-17 ± 11
$F_x \pm \sigma$	45 ± 66	47 ± 59	371 ± 186	47 ± 59	331 ± 188

Табл. 16. Влияние последовательно возводимых зданий на комплекс 11 — «Федерация: Восток»

Table 16. Impact of sequentially constructed buildings on 11 — “Federation Tower: East”

	11		12		13		14		
	7 ± 13	-19 ± 8	-3 ± 15	-25 ± 10	4 ± 16	-25 ± 10	11 ± 20	-26 ± 11	
									0°
$F_x \pm \sigma$	3 ± 97	3 ± 11	4 ± 11	-20 ± 133	-23 ± 110	1 ± 6	13 ± 143	0 ± 4	3 ± 11
$F_y \pm \sigma$	-8 ± 10	-8 ± 10	-13 ± 6	-63 ± 85	-62 ± 60	-9 ± 4	2 ± 6	-10 ± 44	-8 ± 10
$M_z \pm \sigma$	-27 ± 11	-35 ± 86	-28 ± 12	-27 ± 11	-35 ± 19	-35 ± 19	-35 ± 17	-35 ± 17	-35 ± 86
									45°
$F_x \pm \sigma$	2 ± 13	2 ± 13	1 ± 14	-59 ± 133	-75 ± 149	0 ± 17	-4 ± 12	-70 ± 165	2 ± 13
$F_y \pm \sigma$	-12 ± 16	-12 ± 16	-16 ± 17	-16 ± 17	-21 ± 15	-21 ± 15	-19 ± 17	-19 ± 17	-12 ± 16
$M_z \pm \sigma$	2 ± 12	-90 ± 212	-110 ± 202	-110 ± 202	-143 ± 199	-143 ± 199	-142 ± 214	-142 ± 214	-90 ± 212
									90°
$F_x \pm \sigma$	-3 ± 16	-3 ± 16	-6 ± 12	-6 ± 12	-5 ± 14	-5 ± 14	-3 ± 16	-3 ± 16	-3 ± 16
$F_y \pm \sigma$	5 ± 14	5 ± 14	0 ± 10	0 ± 10	3 ± 12	3 ± 12	2 ± 10	2 ± 10	5 ± 14
$M_z \pm \sigma$	97 ± 200	97 ± 200	58 ± 186	58 ± 186	90 ± 194	90 ± 194	71 ± 201	71 ± 201	97 ± 200
									135°
$F_x \pm \sigma$	-2 ± 9	-2 ± 9	-1 ± 11	-1 ± 11	0 ± 8	0 ± 8	-2 ± 9	-2 ± 9	-2 ± 9
$F_y \pm \sigma$	-1 ± 9	-1 ± 9	-1 ± 10	-1 ± 10	-2 ± 8	-2 ± 8	0 ± 8	0 ± 8	-1 ± 9
$M_z \pm \sigma$	-9 ± 89	-9 ± 89	18 ± 93	18 ± 93	-2 ± 72	-2 ± 72	15 ± 75	15 ± 75	-9 ± 89
									180°
$F_x \pm \sigma$	-1 ± 8	-1 ± 8	0 ± 10	0 ± 10	-1 ± 8	-1 ± 8	-1 ± 8	-1 ± 8	-1 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-2 ± 10	-2 ± 10	-1 ± 12	-1 ± 12	-1 ± 11	-1 ± 11	-3 ± 12	-3 ± 12	-2 ± 10
$M_z \pm \sigma$	-2 ± 101	-2 ± 101	-1 ± 89	-1 ± 89	-35 ± 112	-35 ± 112	-1 ± 110	-1 ± 110	-2 ± 101
									225°
$F_x \pm \sigma$	10 ± 13	10 ± 13	1 ± 10	1 ± 10	0 ± 12	0 ± 12	4 ± 14	4 ± 14	10 ± 13
$F_y \pm \sigma$	-26 ± 11	-26 ± 11	-12 ± 13	-12 ± 13	-17 ± 14	-17 ± 14	-23 ± 15	-23 ± 15	-26 ± 11
$M_z \pm \sigma$	142 ± 131	142 ± 131	55 ± 136	55 ± 136	55 ± 153	55 ± 153	78 ± 184	78 ± 184	142 ± 131

Табл. 17. Влияние последовательно возводимых зданий на комплекс зданий 12 (1) — «Neva Towers: Case 1» и 12 (2) — «Neva Towers: Case 2»

Table 17. Impact of sequentially constructed buildings on 12 (1) — “Neva Towers: Case 1” and 12 (2) — “Neva Towers: Case 2”

	12		
	12(1)	12(2)	
			0°
$F_x \pm \sigma$	-25 ± 10	-25 ± 10	-25 ± 10
$F_y \pm \sigma$	-6 ± 3	-6 ± 3	-6 ± 3
$M_z \pm \sigma$	-17 ± 138	-17 ± 138	-17 ± 138
			45°
$F_x \pm \sigma$	-24 ± 8	-24 ± 8	-24 ± 8
$F_y \pm \sigma$	0 ± 12	0 ± 12	0 ± 12
$M_z \pm \sigma$	-89 ± 108	-89 ± 108	-89 ± 108
			90°
$F_x \pm \sigma$	-13 ± 14	-13 ± 14	-13 ± 14
$F_y \pm \sigma$	1 ± 10	1 ± 10	1 ± 10
$M_z \pm \sigma$	-28 ± 104	-28 ± 104	-28 ± 104
			135°
$F_x \pm \sigma$	-5 ± 10	-5 ± 10	-5 ± 10
$F_y \pm \sigma$	0 ± 6	0 ± 6	0 ± 6
$M_z \pm \sigma$	-11 ± 92	-11 ± 92	-11 ± 92
			180°
$F_x \pm \sigma$	-2 ± 9	-2 ± 9	-2 ± 9
$F_y \pm \sigma$	1 ± 5	1 ± 5	1 ± 5
$M_z \pm \sigma$	10 ± 73	10 ± 73	10 ± 73
			225°
$F_x \pm \sigma$	20 ± 9	20 ± 9	20 ± 9
$F_y \pm \sigma$	10 ± 5	10 ± 5	10 ± 5
$M_z \pm \sigma$	92 ± 59	92 ± 59	92 ± 59
			270°
$F_x \pm \sigma$	23 ± 6	23 ± 6	23 ± 6
$F_y \pm \sigma$	4 ± 8	4 ± 8	4 ± 8
$M_z \pm \sigma$	51 ± 82	51 ± 82	51 ± 82
			315°
$F_x \pm \sigma$	13 ± 6	13 ± 6	13 ± 6
$F_y \pm \sigma$	-6 ± 5	-6 ± 5	-6 ± 5
$M_z \pm \sigma$	-42 ± 48	-42 ± 48	-42 ± 48

Окончание табл. 17 / End of the Table 17

	13		14		13		14		13		14	
	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)
$F_x \pm \sigma$	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)
$F_y \pm \sigma$	-24 ± 11	1 ± 8	-26 ± 11	2 ± 9	-26 ± 11	2 ± 9	-26 ± 11	2 ± 9	-26 ± 11	2 ± 9	-26 ± 11	2 ± 9
$M_z \pm \sigma$	-7 ± 4	-20 ± 5	-6 ± 4	-20 ± 5	-6 ± 4	-20 ± 5	-6 ± 4	-20 ± 5	-6 ± 4	-20 ± 5	-6 ± 4	-20 ± 5
$F_x \pm \sigma$	-10 ± 131	-13 ± 71	-11 ± 150	-27 ± 74	-11 ± 150	-27 ± 74	-11 ± 150	-27 ± 74	-11 ± 150	-27 ± 74	-11 ± 150	-27 ± 74
$F_y \pm \sigma$	-24 ± 10	2 ± 2	-22 ± 11	1 ± 2	-22 ± 11	1 ± 2	-22 ± 11	1 ± 2	-22 ± 11	1 ± 2	-22 ± 11	1 ± 2
$M_z \pm \sigma$	0 ± 12	-28 ± 4	0 ± 11	-30 ± 5	0 ± 11	-30 ± 5	0 ± 11	-30 ± 5	0 ± 11	-30 ± 5	0 ± 11	-30 ± 5
$F_x \pm \sigma$	-91 ± 118	-46 ± 124	-111 ± 141	-35 ± 132	-111 ± 141	-35 ± 132	-111 ± 141	-35 ± 132	-111 ± 141	-35 ± 132	-111 ± 141	-35 ± 132
$F_y \pm \sigma$	-11 ± 10	-6 ± 11	-10 ± 14	-6 ± 10	-10 ± 14	-6 ± 10	-10 ± 14	-6 ± 10	-10 ± 14	-6 ± 10	-10 ± 14	-6 ± 10
$M_z \pm \sigma$	-1 ± 8	5 ± 15	1 ± 9	6 ± 17	1 ± 9	6 ± 17	1 ± 9	6 ± 17	1 ± 9	6 ± 17	1 ± 9	6 ± 17
$F_x \pm \sigma$	-20 ± 103	9 ± 115	13 ± 129	25 ± 150	13 ± 129	25 ± 150	13 ± 129	25 ± 150	13 ± 129	25 ± 150	13 ± 129	25 ± 150
$F_y \pm \sigma$	-8 ± 10	-1 ± 11	-6 ± 10	-1 ± 8	-6 ± 10	-1 ± 8	-6 ± 10	-1 ± 8	-6 ± 10	-1 ± 8	-6 ± 10	-1 ± 8
$M_z \pm \sigma$	0 ± 7	5 ± 18	0 ± 7	8 ± 12	0 ± 7	8 ± 12	0 ± 7	8 ± 12	0 ± 7	8 ± 12	0 ± 7	8 ± 12
$F_x \pm \sigma$	-16 ± 100	-22 ± 141	-10 ± 101	16 ± 97	-10 ± 101	16 ± 97	-10 ± 101	16 ± 97	-10 ± 101	16 ± 97	-10 ± 101	16 ± 97
$F_y \pm \sigma$	-3 ± 11	-1 ± 11	0 ± 12	-2 ± 7	0 ± 12	-2 ± 7	0 ± 12	-2 ± 7	0 ± 12	-2 ± 7	0 ± 12	-2 ± 7
$M_z \pm \sigma$	1 ± 6	9 ± 17	3 ± 7	3 ± 13	3 ± 7	3 ± 13	3 ± 7	3 ± 13	3 ± 7	3 ± 13	3 ± 7	3 ± 13
$F_x \pm \sigma$	18 ± 75	-12 ± 133	17 ± 78	10 ± 98	17 ± 78	10 ± 98	17 ± 78	10 ± 98	17 ± 78	10 ± 98	17 ± 78	10 ± 98
$F_y \pm \sigma$	19 ± 8	-5 ± 9	19 ± 8	-4 ± 10	19 ± 8	-4 ± 10	19 ± 8	-4 ± 10	19 ± 8	-4 ± 10	19 ± 8	-4 ± 10
$M_z \pm \sigma$	10 ± 5	4 ± 15	11 ± 6	6 ± 15	11 ± 6	6 ± 15	11 ± 6	6 ± 15	11 ± 6	6 ± 15	11 ± 6	6 ± 15
$F_x \pm \sigma$	91 ± 54	65 ± 109	96 ± 57	60 ± 96	96 ± 57	60 ± 96	96 ± 57	60 ± 96	96 ± 57	60 ± 96	96 ± 57	60 ± 96
$F_y \pm \sigma$	23 ± 7	7 ± 7	22 ± 5	6 ± 5	22 ± 5	6 ± 5	22 ± 5	6 ± 5	22 ± 5	6 ± 5	22 ± 5	6 ± 5
$M_z \pm \sigma$	4 ± 9	1 ± 19	4 ± 8	1 ± 15	4 ± 8	1 ± 15	4 ± 8	1 ± 15	4 ± 8	1 ± 15	4 ± 8	1 ± 15
$F_x \pm \sigma$	42 ± 86	2 ± 107	42 ± 75	9 ± 102	42 ± 75	9 ± 102	42 ± 75	9 ± 102	42 ± 75	9 ± 102	42 ± 75	9 ± 102
$F_y \pm \sigma$	12 ± 6	9 ± 4	11 ± 6	9 ± 5	11 ± 6	9 ± 5	11 ± 6	9 ± 5	11 ± 6	9 ± 5	11 ± 6	9 ± 5
$M_z \pm \sigma$	-7 ± 5	-16 ± 8	-9 ± 5	-17 ± 9	-9 ± 5	-17 ± 9	-9 ± 5	-17 ± 9	-9 ± 5	-17 ± 9	-9 ± 5	-17 ± 9
$F_x \pm \sigma$	-38 ± 49	57 ± 57	-37 ± 53	57 ± 63	-37 ± 53	57 ± 63	-37 ± 53	57 ± 63	-37 ± 53	57 ± 63	-37 ± 53	57 ± 63

Табл. 18. Влияние последовательно возводимых зданий на комплекс зданий 13 (1) — «Moscow Towers: Case 1» и 13 (2) — «Moscow Towers: Case 2»

Table 18. Impact of sequentially constructed buildings on 13 (1) — “Moscow Towers: Case 1” and 13 (2) — “Moscow Towers: Case 2”

	13		14		13		14		13		14	
	13(1)	13(2)	13(1)	13(2)	13(1)	13(2)	13(1)	13(2)	13(1)	13(2)	13(1)	13(2)
$F_x \pm \sigma$	-2 ± 10	12 ± 3	0 ± 9	10 ± 8	-2 ± 10	12 ± 3	0 ± 9	10 ± 8	-2 ± 10	12 ± 3	0 ± 9	10 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-18 ± 12	-13 ± 4	-15 ± 13	-7 ± 5	-18 ± 12	-13 ± 4	-15 ± 13	-7 ± 5	-18 ± 12	-13 ± 4	-15 ± 13	-7 ± 5
$M_z \pm \sigma$	107 ± 210	-315 ± 57	-36 ± 172	-361 ± 114	107 ± 210	-315 ± 57	-36 ± 172	-361 ± 114	107 ± 210	-315 ± 57	-36 ± 172	-361 ± 114
$F_x \pm \sigma$	1 ± 10	-6 ± 2	2 ± 12	-9 ± 4	1 ± 10	-6 ± 2	2 ± 12	-9 ± 4	1 ± 10	-6 ± 2	2 ± 12	-9 ± 4
$F_y \pm \sigma$	-30 ± 10	0 ± 3	-34 ± 11	-3 ± 5	-30 ± 10	0 ± 3	-34 ± 11	-3 ± 5	-30 ± 10	0 ± 3	-34 ± 11	-3 ± 5
$M_z \pm \sigma$	-135 ± 163	161 ± 44	-184 ± 188	-17 ± 40	-135 ± 163	161 ± 44	-184 ± 188	-17 ± 40	-135 ± 163	161 ± 44	-184 ± 188	-17 ± 40
$F_x \pm \sigma$	-3 ± 2	-30 ± 6	-3 ± 1	-19 ± 3	-3 ± 2	-30 ± 6	-3 ± 1	-19 ± 3	-3 ± 2	-30 ± 6	-3 ± 1	-19 ± 3
$F_y \pm \sigma$	2 ± 2	22 ± 13	0 ± 2	8 ± 6	2 ± 2	22 ± 13	0 ± 2	8 ± 6	2 ± 2	22 ± 13	0 ± 2	8 ± 6
$M_z \pm \sigma$	31 ± 26	91 ± 230	8 ± 23	24 ± 128	31 ± 26	91 ± 230	8 ± 23	24 ± 128	31 ± 26	91 ± 230	8 ± 23	24 ± 128
$F_x \pm \sigma$	-16 ± 10	-1 ± 18	-14 ± 7	9 ± 13	-16 ± 10	-1 ± 18	-14 ± 7	9 ± 13	-16 ± 10	-1 ± 18	-14 ± 7	9 ± 13
$F_y \pm \sigma$	36 ± 9	-4 ± 13	29 ± 6	-12 ± 9	36 ± 9	-4 ± 13	29 ± 6	-12 ± 9	36 ± 9	-4 ± 13	29 ± 6	-12 ± 9
$M_z \pm \sigma$	337 ± 136	-101 ± 347	350 ± 114	-116 ± 135	337 ± 136	-101 ± 347	350 ± 114	-116 ± 135	337 ± 136	-101 ± 347	350 ± 114	-116 ± 135
$F_x \pm \sigma$	-2 ± 10	2 ± 16	-2 ± 10	2 ± 14	-2 ± 10	2 ± 16	-2 ± 10	2 ± 14	-2 ± 10	2 ± 16	-2 ± 10	2 ± 14
$F_y \pm \sigma$	17 ± 18	-2 ± 13	16 ± 20	-3 ± 9	17 ± 18	-2 ± 13	16 ± 20	-3 ± 9	17 ± 18	-2 ± 13	16 ± 20	-3 ± 9
$M_z \pm \sigma$	23 ± 238	-92 ± 215	33 ± 209	-95 ± 195	23 ± 238	-92 ± 215	33 ± 209	-95 ± 195	23 ± 238	-92 ± 215	33 ± 209	-95 ± 195
$F_x \pm \sigma$	0 ± 6	0 ± 9	-1 ± 5	0 ± 7	0 ± 6	0 ± 9	-1 ± 5	0 ± 7	0 ± 6	0 ± 9	-1 ± 5	0 ± 7
$F_y \pm \sigma$	6 ± 11	1 ± 7	7 ± 12	0 ± 7	6 ± 11	1 ± 7	7 ± 12	0 ± 7	6 ± 11	1 ± 7	7 ± 12	0 ± 7
$M_z \pm \sigma$	-33 ± 146	-24 ± 114	-42 ± 161	-7 ± 138	-33 ± 146	-24 ± 114	-42 ± 161	-7 ± 138	-33 ± 146	-24 ± 114	-42 ± 161	-7 ± 138
$F_x \pm \sigma$	-1 ± 7	8 ± 11	7 ± 1	5 ± 9	-1 ± 7	8 ± 11	7 ± 1	5 ± 9	-1 ± 7	8 ± 11	7 ± 1	5 ± 9
$F_y \pm \sigma$	-1 ± 12	-6 ± 13	-3 ± 15	0 ± 11	-1 ± 12	-6 ± 13	-3 ± 15	0 ± 11	-1 ± 12	-6 ± 13	-3 ± 15	0 ± 11
$M_z \pm \sigma$	44 ± 148	49 ± 191	40 ± 181	116 ± 200	44 ± 148	49 ± 191	40 ± 181	116 ± 200	44 ± 148	49 ± 191	40 ± 181	116 ± 200
$F_x \pm \sigma$	-2 ± 9	47 ± 15	-3 ± 10	20 ± 16	-2 ± 9	47 ± 15	-3 ± 10	20 ± 16	-2 ± 9	47 ± 15	-3 ± 10	20 ± 16
$F_y \pm \sigma$	24 ± 34	-35 ± 21	6 ± 22	-7 ± 16	24 ± 34	-35 ± 21	6 ± 22	-7 ± 16	24 ± 34	-35 ± 21	6 ± 22	-7 ± 16
$M_z \pm \sigma$	317 ± 379	-158 ± 274	160 ± 303	102 ± 221	317 ± 379	-158 ± 274	160 ± 303	102 ± 221	317 ± 379	-158 ± 274	160 ± 303	102 ± 221



Табл. 19. Влияние последовательно возводимых зданий на комплекс 14 — «One Tower»

Table 19. Impact of sequentially constructed buildings on 14 — “One Tower”

14	0°			45°			90°			135°			180°			225°			270°			315°		
	$F_x \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$M_z \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$M_z \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$M_z \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$M_z \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$M_z \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$M_z \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$M_z \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$M_z \pm \sigma$
	11 ± 9	-25 ± 6	-64 ± 133	1 ± 4	-21 ± 7	145 ± 105	-3 ± 7	16 ± 13	-113 ± 382	-5 ± 13	23 ± 16	-173 ± 334	0 ± 8	7 ± 11	-94 ± 187	2 ± 7	10 ± 16	-94 ± 300	8 ± 11	-6 ± 23	-109 ± 350	12 ± 6	-45 ± 14	229 ± 137

скорость потока;  $S$  — миделевое сечение (проекция здания вдоль фронта ветра),  $m^2$ .

Площади миделевых сечений для выбранных зданий и сооружений представлены в табл. 20.

На рис. 17 приведены лепестковые диаграммы равнодействующего аэродинамического коэффициента  $C_R$  комплексов ММДЦ «Москва-Сити»: «Федерация: Запад», «Меркурий», «ОКО: Северная башня», «Эволюция» и «Евразия».

Возникающий среди зданий комплекса ММДЦ «Москва-Сити» эффект аэродинамической интерференции в среднем приводит к уменьшению аэродинамического коэффициента средней составляющей ветровой нагрузки и увеличению пульсаций.

На основе табл. 6–19 и лепестковых диаграмм можно определить наиболее опасные углы атаки ветра, приводящие к усилению ветрового воздействия, по сравнению с изолированным зданием, а также направления ветров, способствующие возникновению эффекта ветрового экранирования:

- для здания «Федерация: Запад» наибольшее влияние на среднюю составляющую ветрового воздействия оказало строительство комплексов «ОКО: Северная башня» и «Федерация: Восток», уменьшив значение на 83,5 % при угле атаки 315° и 76,9 % при угле атаки 0° соответственно. Возведе-

ние башен «Эволюция» и «Империя» внесло вклад в рост пульсационной составляющей ветрового воздействия на 88,6 % при угле атаки 135° и 70,3 % при угле атаки 90° соответственно;

- для здания «Меркурий» наибольшее влияние на среднюю составляющую ветрового воздействия оказало строительство комплексов «ОКО: Северная башня» и «Эволюция», уменьшив значение на 52,6 % при угле атаки 270° и 41,3 % при угле атаки 135° соответственно. Прирост пульсационной составляющей ветрового воздействия на 83,3 и 45,9 % при угле атаки 315° обусловлен возведением высоток «Евразия» и «Neva Towers» соответственно;

- для здания «ОКО: Северная башня» наибольшее влияние на среднюю составляющую ветрового воздействия оказало строительство комплексов «Neva Towers» и «ОКО: Южная башня», уменьшив значение на 81,1 % при угле атаки 0° и 64,1 % при угле атаки 225° соответственно. Возведение высотного здания «ОКО: Южная башня» внесло вклад в рост пульсационной составляющей ветрового воздействия на 177,9 % при угле атаки 225°, а также ее уменьшение на 43,8 % при угле атаки 45°;

- для здания «Эволюция» наибольшее влияние на среднюю составляющую ветрового воздействия оказало строительство комплексов «Moscow

Табл. 20. Проекция здания вдоль фронта ветра (миделевое сечение)

Table 20. Building projection along wind front (midsection)

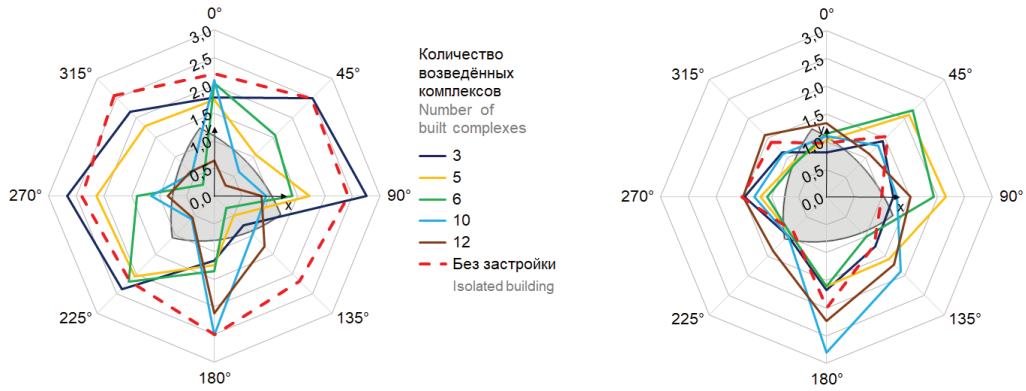
Здание / Угол атаки ветра Building / Angle of wind attack	Миделевое сечение $S, m^2$ Midsection $S, m^2$			
	0/180°	45/225°	90/270°	135/315°
2 — «Федерация: Запад» 2 — “Federation: West”	192	207	197	186
5 — «Меркурий» 5 — “Mercury City Tower”	210	266	258	184
6 — «ОКО: Северная башня» 6 — “OKO: North Tower”	202	181	213	210
7 — «Эволюция» 7 — “Evolution Tower”	176	137	176	137
8 — «Евразия» 8 — “Eurasia Tower”	181	147	210	237

Towers» и «Федерация: Восток», уменьшив значения на 65,9 % при угле атаки 0° и 41,7 % при угле атаки 315° соответственно. Прирост пульсационной составляющей ветрового воздействия на 159,9 % при угле атаки 135° и 40,2 % при угле атаки 0° обус-

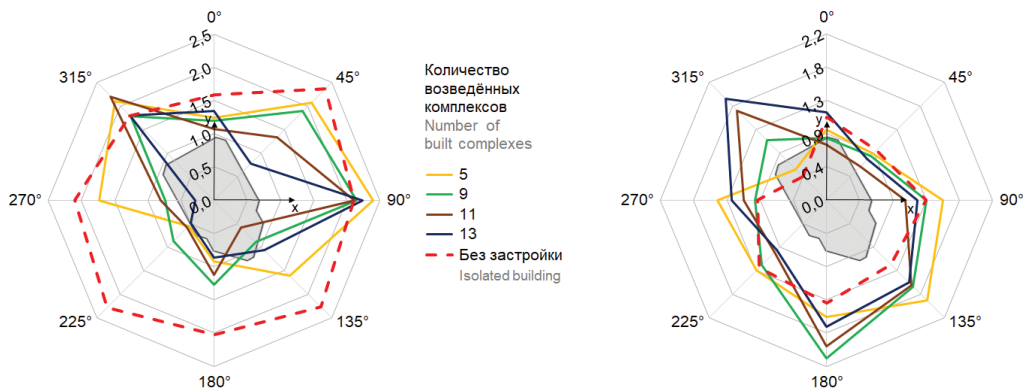
ловлен возведением высоток «Евразия» и «Moscow Towers» соответственно;

- для здания «Евразия» наибольшее влияние на среднюю составляющую ветрового воздействия оказало строительство комплекса «ОКО: Южная

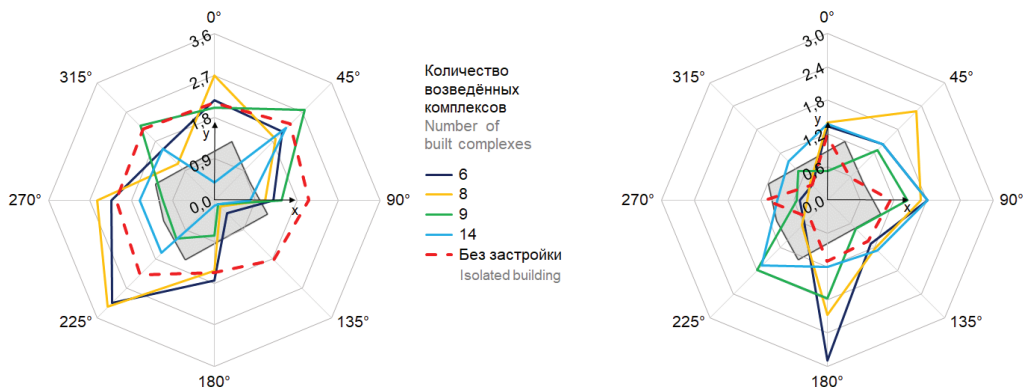
2 — «Федерация: Запад» / “Federation: West”



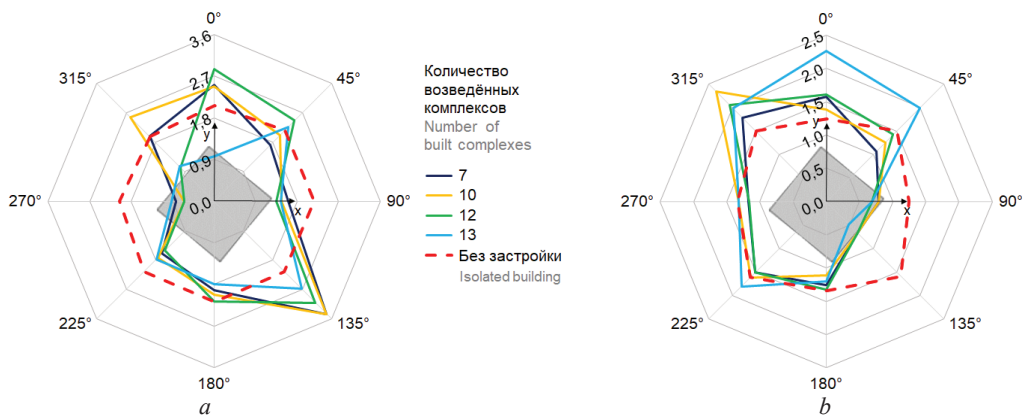
5 — «Меркурий» / “Mercury City Tower”

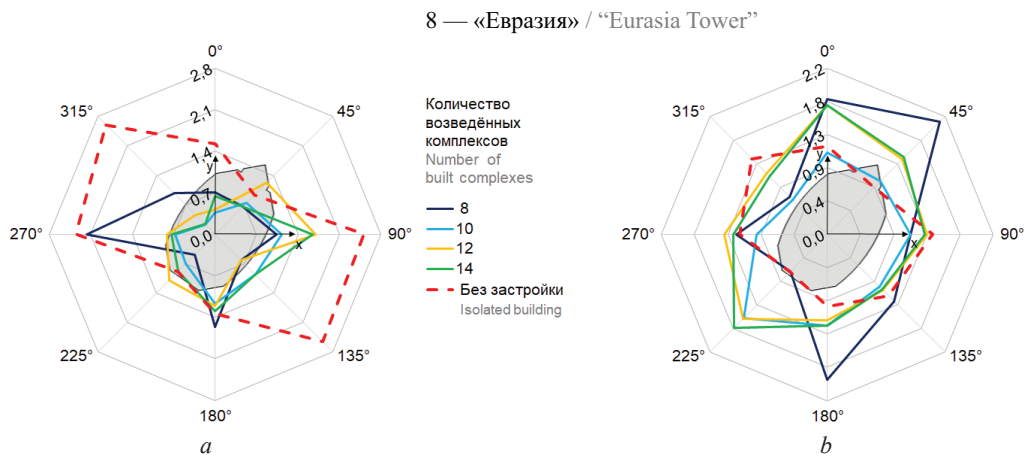


6 — «ОКО: Северная башня» / “OKO: North Tower”



7 — «Эволюция» / “Evolution Tower”





**Рис. 17.** Диаграммы аэродинамического коэффициента  $C_R$  комплексов ММДЦ «Москва-Сити»: *a* — коэффициент  $\bar{C}_R$  средней составляющей ветрового воздействия; *b* — коэффициент  $C'_R$  пульсационной составляющей ветрового воздействия

**Fig. 17.** Diagrams of aerodynamic coefficient  $C_R$  of the MIBC “Moscow-City”: *a* — coefficient  $\bar{C}_R$  of the averaged component of wind action; *b* — coefficient  $C'_R$  of the pulsation component of wind action

башня», уменьшив значение на 92,1 и 58,4 % при углах атаки 315 и 270° соответственно. Возведение высотного здания «ОКО: Южная башня» внесло вклад в рост пульсационной составляющей ветрового воздействия на 112,9 % при угле атаки 225°, а также ее уменьшение на 36,5 % при угле атаки 45°.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выполнено численное аэродинамическое моделирование влияния последовательного возведения зданий ММДЦ «Москва-Сити» на аэродинамическую интерференцию. На основе проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы.

Разработаны, верифицированы и валидированы квазидвухмерные расчетные аэродинамические модели зданий комплекса ММДЦ «Москва-Сити» на основе численного моделирования нестационарных нелинейных уравнений Навье – Стокса, реализованные в ПК ANSYS Fluent, с целью определения влияния последовательного возведения высотных зданий на аэродинамическую интерференцию.

Для комплекса ММДЦ «Москва-Сити» на момент проектирования исследования аэродинамической интерференции проводились только для проектируемых зданий и сооружений с учетом окружающей актуальной и перспективной застройки без расчетных исследований их влияния на уже построенные здания. В настоящей статье на основе расчетного анализа последовательного возведения комплексов зданий ММДЦ «Москва-Сити» показана важность учета аэродинамической интерференции, влияющей на уже построенные здания.

Аэродинамическая интерференция приводит как к эффектам ветрового экранирования, когда влияние окружающей застройки снижает ветровое воздействие на рассматриваемое здание, так и к эффектам усиления ветра, вызванного дополнительными срывами вихрей с близстоящих зданий, и эффектам ускорения ветра из-за сквозного прохода воздушно-го потока между зданиями.

Построены лепестковые диаграммы (при разных углах атаки ветра) аэродинамических коэффициентов средней и пульсационной составляющих ветрового воздействия для зданий: «Федерация: Запад», «Меркурий», «ОКО: Северная башня», «Эволюция» и «Евразия» в зависимости от количества возведенных комплексов. По результатам определены наиболее опасные углы атаки ветра, приводящие к эффектам усиления ветрового воздействия по сравнению с отдельностоящим зданием.

При планировании и развитии городской застройки посредством возведения новых зданий важно учесть не только результаты аэродинамических исследований, определяющих интерференцию новых строений с окружающей застройкой, но и их влияние на существующие здания и сооружения. На примере последовательного возведения комплекса ММДЦ «Москва-Сити» продемонстрировано, что строительство новых зданий способно привести к значительному изменению аэродинамики уже построенных зданий, что требуется учитывать при проектировании. Использование подходов, основанных на численном моделировании, позволит выполнять подобные расчетные исследования с достаточной степенью точности и обосновать степень влияния нового строительства на существующие здания, тем самым обеспечив их механическую безопасность.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Афанасьева И.Н. Вычислительная аэродинамика в задачах строительства : учебное пособие. М. : АСВ, 2017. 720 с.
2. Гузев А., Корнилов Д., Короткин А., Соловьев С. Аэродинамические испытания высотных зданий и сооружений // Высотные здания. 2015. № 1. С. 102–105.
3. Kar R., Dalui S.K. Wind interference effect of neighbouring square buildings in rhombic arrangement on an octagonal building // ASPS Conference Proceedings. 2022. Vol. 1. Issue 1. Pp. 1463–1469. DOI: 10.38208/acp.v1.677
4. Zu G., Lam K. LES and wind tunnel test of flow around two tall buildings in staggered arrangement // Computation. 2018. Vol. 6. Issue 2. P. 28. DOI: 10.3390/computation6020028
5. Sanyal P. AELH-, CFD-, and ANN-based wind interference zone prediction of regular tall buildings // Asian Journal of Civil Engineering. 2023. Vol. 24. Issue 8. Pp. 3881–3891. DOI: 10.1007/s42107-023-00683-5
6. Gurjar S., Amin J.A. Numerical simulation of Wind induced mean interference between two tall buildings // Journal of Materials and Engineering Structures. 2017. No. 4. Pp. 181–192.
7. Cui H., An H., Ma M., Han Z., Saha S.C., Liu Q. Experimental study on wind load and wind-induced interference effect of three high-rise buildings // Journal of Applied Fluid Mechanics. 2023. Vol. 16. Issue 11. DOI: 10.47176/jafm.16.11.1897
8. Wu X., Sun Y., Wu Y., Su N., Peng S. The interference effects of wind load and wind-induced dynamic response of quayside container cranes // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Issue 21. P. 10969. DOI: 10.3390/app122110969
9. Khanduri A.C. Wind-induced interference effects on buildings-integrating experimental and computerized approaches: a thesis doctor of philosophy. Canada, 1997. 334 p.
10. Гамбал С., Стоянов С. Аэродинамика высотных зданий // Высотные здания. 2006. № 1. С. 52–53.
11. Ekici E. Plot 17–18 project: tall building design in “Moscow-City” // CTBUH 2016 Shenzhen, Guangzhou, Hong Kong Conference. 2016. Pp. 1314–1321.
12. Белостоцкий А.М., Дубинский С.И., Афанасьева И.Н. Численное моделирование задач строительной аэродинамики. Разработка методик расчета ветровых воздействий и исследование реальных объектов // Вестник МГСУ. 2010. № 4–5. С. 182–185. EDN RTUJSB.
13. Дубинский С.И. Численное моделирование ветровых воздействий на высотные здания и комплексы : дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 198 с. EDN QEVMND.
14. Белостоцкий А.М., Негрцова И.Ю., Горячевский О.С. Оценка аэроупругой устойчивости шпиля башни // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 11. С. 1745–1762. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1745-1762
15. Горячевский О.С. Численное моделирование ветровых давлений на окна. Валидация для типового многоэтажного здания квадратной формы // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2023. № 19 (3). С. 114–129. DOI: 10.22337/2587-9618-2023-19-3-114-129
16. Попов Н.А. Проведение комплекса работ по статистическому и графическому анализу результатов модельных испытаний в аэродинамической трубе здания, возводимого на участках № 2–3 ММДЦ «Москва-Сити», и прилегающих пешеходных зонах. М. : Эталон-Проект, 2007. 85 с.
17. Попов Н.А. Рекомендации по назначению расчетных ветровых нагрузок, в соответствии с требованиями российских норм расчетных ветровых нагрузок, действующих на здание, возводимое на участках № 2–3 «ММДЦ Москва-Сити». М. : ЦНИИСК им. Кучеренко, 2007. 51 с.
18. Wang X., Zhang G., Li Y., Kong H., Liu L., Zhang C. Field measurements of wind-induced responses of the shanghai world financial center during super typhoon Lekima // Sensors. 2023. Vol. 23. Issue 14. P. 6519. DOI: 10.3390/s23146519
19. Yi J., Li Q.S. Wind tunnel and full-scale study of wind effects on a super-tall building // Journal of Fluids and Structures. 2015. Vol. 58. Pp. 236–253. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2015.08.005
20. Charisi S., Thiis T.K., Aurlien T. Full-scale measurements of wind-pressure coefficients in twin medium-rise buildings // Buildings. 2019. Vol. 9. Issue 3. P. 63. DOI: 10.3390/buildings9030063
21. Lee B.E. The effect of turbulence on the surface pressure field of a square prism // Journal of Fluid Mechanics. 1975. Vol. 69. Issue 2. Pp. 263–282. DOI: 10.1017/S0022112075001437
22. Bearman P.W., Obasaju E.D. An experimental study of pressure fluctuations on fixed and oscillating square-section cylinders // Journal of Fluid Mechanics. 1982. Vol. 119. Pp. 297–321. DOI: 10.1017/S0022112082001360
23. Tamura T., Ono Y. LES analysis on aeroelastic instability of prisms in turbulent flow // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2003. Vol. 91. Issue 12–15. Pp. 1827–1846. DOI: 10.1016/j.jweia.2003.09.032



24. Du X., Shi D., Dong H., Liu Y. Flow around square-like cylinders with corner and side modifications // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2021. Vol. 215. P. 104686. DOI: 10.1016/j.jweia.2021.104686

25. Cao W., Wang X., Liu Y., Yin Y., Yang J., An J. Large eddy simulation on wind-induced interference effects of staggered chamfered square cylinders // *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. Issue 1. DOI: 10.1038/s41598-023-44711-5

Поступила в редакцию 8 февраля 2024 г.

Принята в доработанном виде 22 марта 2024 г.

Одобрена для публикации 22 марта 2024 г.

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

Александра Михайловна Ефимова — студентка; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; sasha.basket.8@yandex.ru.

Вклад авторов:

Саиян С.Г. — научное руководство, концепция исследования, методология исследования, анализ результатов исследования, написание текста статьи, научное редактирование текста, итоговые выводы.

Ефимова А.М. — сбор и анализ материалов по ММДЦ «Москва-Сити», проведение CFD-моделирования, создание иллюстраций, обработка и анализ результатов исследования, написание текста статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Belostotsky A.M., Akimov P.A., Afanasyeva I.N. *Computational aerodynamics in construction problems : textbook*. Moscow, ASV, 2017; 720. (rus.).

2. Guzeyev A., Kornilov D., Korotkin A., Solovyev S. Aerodynamic testing of high-rise buildings and structures. *High-rise buildings*. 2015; 1:102-105. (rus.).

3. Kar R., Dalui S.K. Wind interference effect of neighbouring square buildings in rhombic arrangement on an octagonal building. *ASPS Conference Proceedings*. 2022; 1(1):1463-1469. DOI: 10.38208/acp.v1.677

4. Zu G., Lam K. LES and wind tunnel test of flow around two tall buildings in staggered arrangement. *Computation*. 2018; 6(2):28. DOI: 10.3390/computation6020028

5. Sanyal P. AELH-, CFD-, and ANN-based wind interference zone prediction of regular tall buildings. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2023; 24(8):3881-3891. DOI: 10.1007/s42107-023-00683-5

6. Gurjar S., Amin J.A. Numerical simulation of wind induced mean interference between two tall buildings. *Journal of Materials and Engineering Structures*. 2017; 4:181-192.

7. Cui H., An H., Ma M., Han Z., Saha S.C., Liu Q. Experimental study on wind load and wind-induced interference effect of three high-rise buildings. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2023; 16(11). DOI: 10.47176/jafm.16.11.1897

8. Wu X., Sun Y., Wu Y., Su N., Peng S. The interference effects of wind load and wind-induced dynamic response of quayside container cranes. *Applied Sciences*. 2022; 12(21):10969. DOI: 10.3390/app122110969

9. Khanduri A.C. *Wind-induced interference effects on buildings-integrating experimental and computerized approaches : a thesis doctor of philosophy*. Canada, 1997; 334.

10. Gambal S., Stoyanov S. Aerodynamics of high-rise buildings. *High-rise buildings*. 2006; 1:52-53. (rus.).

11. Ekici E. *Plot 17–18 project: tall building design in “Moscow-City”*. CTBUH 2016 Shenzhen, Guangzhou, Hong Kong Conference. 2016; 1314-1321.

12. Belostotsky A.M., Dubinsky S.I., Afanasyeva I.N. Numerical simulation in civil aerodynamics. Development of methodology of calculation of wind effects and study of real object. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2010; 4-5:182-185. EDN RTUJSB. (rus.).

13. Dubinskiy S.I. *Numerical modeling of wind effects on high-rise buildings : diss. ... Ph.D.* Moscow, 2010; 198. EDN QEVMND. (rus.).

14. Belostotsky A.M., Negrozova I.Yu., Goryachevsky O.S. Estimation of aeroelastic stability of a tower spire. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(11):1745-1762. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1745-1762 (rus.).

15. Goryachevsky O. Numerical modelling of wind loads on windows. Validation for a high-rise square plan building. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2023; 19(3):114-129. DOI: 10.22337/2587-9618-2023-19-3-114-129 (rus.).
16. Popov N.A. *Carrying out a set of works on statistical and graphical analysis of the results of model tests in the wind tunnel of the building to be erected on sites No. 2-3 of Moscow-City MMDC and adjacent pedestrian zones*. Moscow, Etalon-Project, 2007; 85. (rus.).
17. Popov N.A. *Recommendations on assignment of design wind loads, in accordance with the requirements of the Russian norms of design wind loads acting on the building being erected on sites No. 2-3 of MIBC "Moscow-City"*. Москва, TsNIISK named after Kucherenko, 2007; 51. (rus.).
18. Wang X., Zhang G., Li Y., Kong H., Liu L., Zhang C. Field measurements of wind-induced responses of the shanghai world financial center during super typhoon Lekima. *Sensors*. 2023; 23(14):6519. DOI: 10.3390/s23146519
19. Yi J., Li Q.S. Wind tunnel and full-scale study of wind effects on a super-tall building. *Journal of Fluids and Structures*. 2015; 58:236-253. DOI: 10.1016/j.jfluidstruct.2015.08.005
20. Charisi S., Thiis T.K., Aurlien T. Full-scale measurements of wind-pressure coefficients in twin medium-rise buildings. *Buildings*. 2019; 9(3):63. DOI: 10.3390/buildings9030063
21. Lee B.E. The effect of turbulence on the surface pressure field of a square prism. *Journal of Fluid Mechanics*. 1975; 69(2):263-282. DOI: 10.1017/S0022112075001437
22. Bearman P.W., Obasaju E.D. An experimental study of pressure fluctuations on fixed and oscillating square-section cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*. 1982; 119:297-321. DOI: 10.1017/S0022112082001360
23. Tamura T., Ono Y. LES analysis on aeroelastic instability of prisms in turbulent flow. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2003; 91(12-15):1827-1846. DOI: 10.1016/j.jweia.2003.09.032
24. Du X., Shi D., Dong H., Liu Y. Flow around square-like cylinders with corner and side modifications. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2021; 215:104686. DOI: 10.1016/j.jweia.2021.104686
25. Cao W., Wang X., Liu Y., Yin Y., Yang J., An J. Large eddy simulation on wind-induced interference effects of staggered chamfered square cylinders. *Scientific Reports*. 2023; 13(1). DOI: 10.1038/s41598-023-44711-5

Received February 8, 2024.

Adopted in revised form on March 22, 2024.

Approved for publication on March 22, 2024.

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

**Alexandra M. Efimova** — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; sasha.basket.8@yandex.ru.

*Contribution of the authors:*

*Sergey G. Saiyan — scientific guidance, research concept, research methodology, analysis of research results, writing the text of the article, scientific editing of the text, final conclusions.*

*Alexandra M. Efimova — collection and analysis of materials on MIBC "Moscow-City", CFD modeling, creation of illustrations, processing and analysis of research results, writing the text of the article.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*