

УДК 624.042.4

В. В. Габова, А. В. Родионов, О. О. Сиротенко

Волгоградский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК

Рассматриваются типы воздействия ветровой нагрузки на несущие конструкции. Представлена характеристика динамических нагрузок. Рассмотрены основные и дополнительные параметры расчета пульсационной составляющей ветровой нагрузки.

Ключевые слова: ветровая нагрузка, типы ветровой нагрузки, ускорения от ветровой нагрузки, пульсационная составляющая, нормативные значения пульсационной составляющей, жесткость здания.

Инженерные исследования ветровых воздействий в настоящее время являются быстроразвивающейся областью прикладных наук, ставящей перед собой задачу разработки и совершенствования методов учета ветровых нагрузок на здания и сооружения. В ряде случаев эта задача требует особого внимания, поскольку проектируемые объекты часто имеют уникальные с точки зрения аэродинамики архитектурные формы и требуют определенных методов динамического расчета [1, 2].

Современные высотные здания по сравнению с построенными ранее отличаются исключительной гибкостью, легкостью и зачастую обладают слабыми демпфирующими свойствами. Такие сооружения, как правило, характеризуются повышенной чувствительностью к воздействию ветра. Для объектов, высота которых многократно превосходит поперечные в плане размеры, ветровая нагрузка является основной. При расчете на прочность и деформативность возникает необходимость оценки ветровых воздействий с большей степенью точности, чем это требовалось ранее [3, 4].

Нагрузки и воздействия, возникающие при взаимодействии ветра со строительными конструкциями, по своей природе можно разделить на два типа:

- 1) связанные с непосредственным действием на здания и сооружения максимальных для места строительства ураганных ветров;
- 2) вызывающие интенсивные аэроупругие и неустойчивые изгибные, крутильные и изгибно-крутильные колебания.

Воздействия первого типа называются *расчетной ветровой нагрузкой*, она подразделяется на среднюю и пульсационную составляющие [5].

К колебаниям второго типа относятся различные формы аэродинамической неустойчивости сооружений (в частности, применительно к высоким зданиям это могут быть галопирования и дивергенция), а также колебания, связанные со срывом вихрей с внешней поверхности сооружений и приводящие к резонансному вихревому возбуждению сооружения на одной из его собственных частот. Колебания этого типа могут возникнуть в зданиях и сооружениях, высота которых значительно превышает их поперечный размер.

В связи с этим соответствующие воздействия не учитываются при проектировании невысоких зданий¹.

Динамические нагрузки вносят существенный вклад в напряженно-деформированное состояние несущих конструкций зданий.

Динамические характеристики влияют на выбор методов и параметров расчета динамических нагрузок. Результаты динамических расчетов учитываются при принятии конструктивных решений зданий [6—8].

Динамические воздействия снижают комфортное пребывание людей на верхних этажах. Основной величиной, характеризующей комфортность пребывания людей в помещениях многоэтажных зданий, является ускорение конструкций верхних этажей [9, 10].

Таким образом, при проектировании высоких зданий необходимо учитывать следующие воздействия ветра:

- среднюю и пульсационную составляющие расчетной ветровой нагрузки;
- пиковые значения ветровой нагрузки, действующей на конструктивные элементы ограждения;
- резонансное вихревое возбуждение;
- аэродинамические неустойчивые колебания типа галопирования и дивергенции;
- воздействия, приводящие к нарушению комфортности пешеходных зон, прилегающих к проектируемому зданию² [11, 12].

При расчете ускорений от ветровой нагрузки исследуются нормативные значения пульсационной составляющей:

$$w_c = 0,7w_p, \quad (1)$$

где w_p — нормативное значение пульсационной составляющей ветровой нагрузки.

Максимальное ускорение этажа здания при выполнении требования комфортности не должно превышать величины:

$$a_{c.\max} = 0,08 \text{ м/с}^2,$$

где $a_{c.\max}$ — сумма максимальных ускорений по всем основным формам колебаний.

Динамическая ветровая нагрузка формируется на основе исходных данных для расчета пульсационной составляющей ветровой нагрузки, включающих как основные характеристики (количество учитываемых форм колебаний, матрица масс), так и дополнительные параметры (ветровой район, габариты здания, тип местности, логарифмический декремент колебаний, направление ветра по отношению к обдуваемой поверхности) [13, 14] (рис. 1).

¹ МДС 20-1.2006. Временные рекомендации по назначению нагрузок и воздействий, действующих на многофункциональные высотные здания и комплексы в Москве. М.: ФГУП ЦПП, 2006, 27 с.

² Там же.

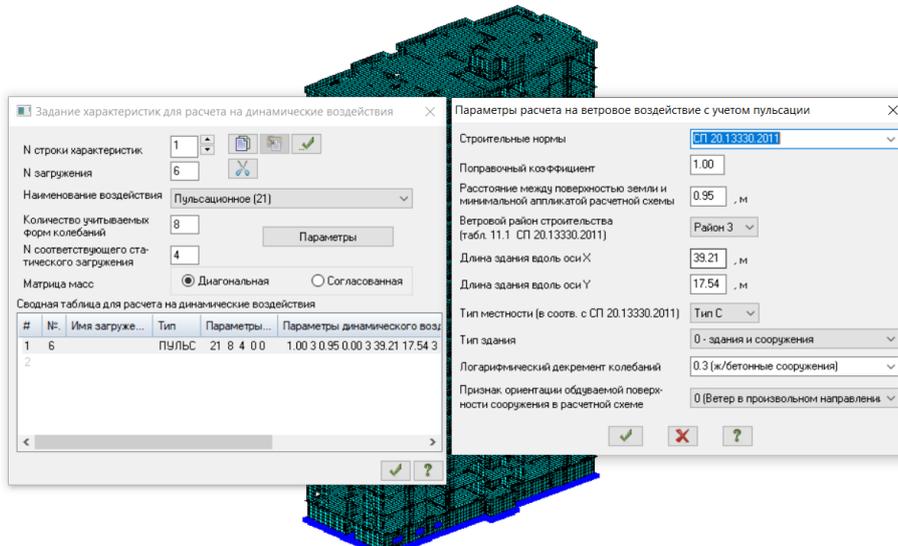


Рис. 1. Исходные данные для расчета пульсационной составляющей ветровой нагрузки: *a* — основные характеристики; *b* — дополнительные параметры расчета

Рассмотрим 21-этажное односекционное жилое здание, многоугольное в плане, с габаритными размерами 40,0×19,5 м, с количеством этажей — 21, а также с цокольным этажом.

Высота рассматриваемого сооружения от поверхности земли до максимально высокой точки (верх парапета) — 68,00 м. Высота цокольного этажа 3,0 м, первого — 3 м, второго и последующих — 3,0 м. По классификации ГОСТ Р 54257—2010 «Надежность строительных конструкций и оснований» проектируемое здание относится к нормальному уровню ответственности 2. Принимаем значение коэффициента надежности по ответственности $\gamma_n = 1,0$. Степень огнестойкости здания — I. Класс конструктивной пожарной опасности — С0.

Жесткость и устойчивость каркаса при вертикальных и горизонтальных воздействиях обеспечивается монолитным (жестким) сопряжением железобетонных колонн и стен с опирающимися на них монолитными железобетонными перекрытиями и покрытием, которые совместно образуют пространственную монолитную рамную конструкцию. Узлы опирания колонн на монолитную фундаментную плиту приняты жесткими.

В пространственном расчете здания учтена совместная работа всех несущих конструкций: колонн, стен, плит перекрытия и покрытия, монолитной фундаментной плиты. Расчетная схема выбрана в виде системы «сооружение — основание». Это позволяет учесть наиболее существенные факторы, определяющие напряженное состояние и деформации основания и конструкций сооружения (статической схемы сооружения, характера грунтовых напластований, свойств грунтов основания и т. д.) [15, 16].

Для реализации расчетной схемы применен программный комплекс «Ли́ра-САПР». Комплекс предназначен для численного исследования пространственных строительных конструкций на прочность, устойчивость

и колебания методом конечных элементов и их автоматизированного конструирования. Шаг конечных элементов принят 0,5 м.

Жесткостные характеристики элементов заданы с учетом их геометрических размеров и материалов. Жесткость здания — отсутствие изменений в его структуре при качании здания от динамических воздействий и воздействия ветра или под влиянием других видов колебательных воздействий.

В некоторых случаях жители многоэтажных зданий даже при допустимых пределах колебаний воспринимают это воздействие, вызывающее негативные ощущения. Поэтому помимо прочности необходимо обеспечить достаточную жесткость здания [17, 18].

Здание испытывает неизбежные колебательные движения под воздействием шквальных ветровых и сейсмических нагрузок. Целью проектирования в этих условиях является создание многоэтажного здания, обладающего возможностью к восприятию действующих нагрузок в соответствии с нормами и удовлетворяющего требованиям комфортного проживания [19, 20].

Пределы значений ускорений колебательного движения позволяют выделить 8 уровней воздействия на человека (табл. 1).

Таблица 1

Уровни воздействия колебательных процессов на жизнедеятельность человека

Уровень	Значение ускорения (м/с ²)	Влияние на человека
1	< 0,05	За порогом чувствительности
2	0,05...0,10	Легкое покачивание подвешенных предметов
3	0,10...0,25	Ощутимое качание, вызывающее чувство дискомфорта
4	0,25...0,4	Колебательное воздействие вызывает трудности при письме
5	0,4...0,5	Потеря равновесия
6	0,5...0,6	Большинство людей не могут сами ходить
7	0,6...0,7	Критическое воздействие на организм человека
8	> 0,85	Падение предметов, угроза возникновения обрушений и завалов

В «Технической инструкции по проектированию конструкций высотных зданий» (JGJ3-2002) и «Технической инструкции по проектированию металлических конструкций высотных зданий» (JGJ99-98)³ определены условия комфортности для помещений высотных зданий повышенной этажности. Согласно нормам «Нагрузки на строительные конструкции» (GB50009-2001)⁴ предусматривается проводить расчет ветровой нагрузки не реже 1 раза

³ Техническая инструкция по проектированию конструкций высотных зданий. JGJ3-2002. URL: https://ros-pipe.ru/tekh_info/tekhnicheskie-stati/proektirovanie-zdaniy-i-sooruzheniy/raschet-na-oprokidyvanie-zdaniya.

Промышленный стандарт Народной Республики (JGJ 99-98): технические условия на стальные конструкции высотных зданий. URL: <https://www.abebooks.com/People-Republic-industry-standard-JGJ-99-98/8173320878/bd>.

⁴ Нагрузки на строительные конструкции. GB50009-2001. URL: <https://standardschina.com/standard/GB50009-2001>.

в 10 лет. На основании опытов со специальными отверстиями внутри высотных зданий было определено максимальное предельное ускорение a_{\max} (табл. 2)⁵.

Таблица 2

Предельные ускорения колебательного движения

Назначение	$a_{\max}, (m/s^2)$
Жилой дом	0,15
Офис, гостиница	0,25

Расчетная модель здания в ПК «Лира-САПР» представлена в следующем виде на рис. 2.

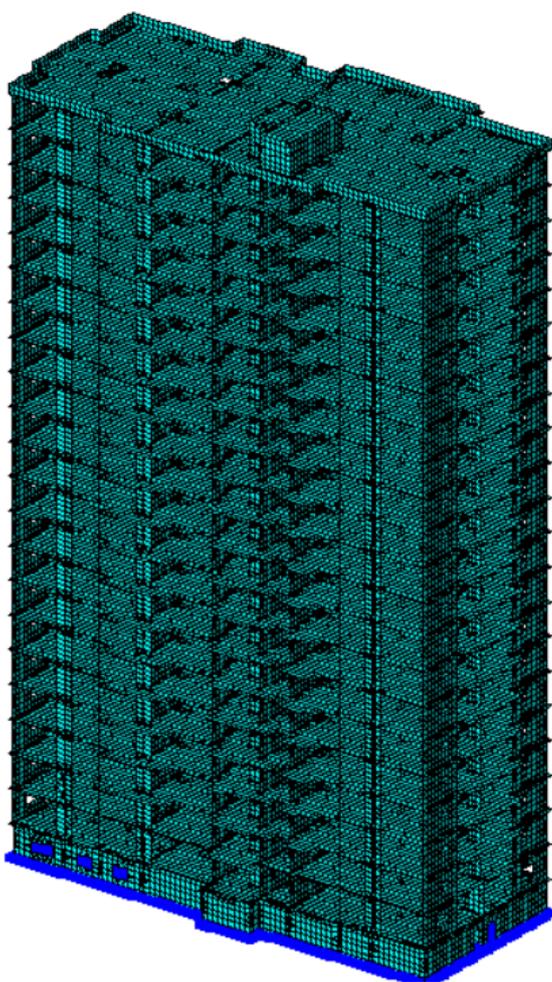


Рис. 2. Расчетная модель здания в ПК «Лира-САПР»

⁵ Жесткость многоэтажных зданий при воздействии ветровой нагрузки. URL: https://ros-pipe.ru/tekh_info/tekhnicheskie-stati/proektirovanie-zdaniy-i-sooruzheniy/zhestkost-mnogoetazhnykh-zdaniy-pri-vozdeystvii-ve.

Нормативное значение ветровой нагрузки определяем по СП 20.13330.2011 (п. 11.1.2)⁶:

$$w = w_m + w_g, \quad (2)$$

где w_m — нормативное значение средней составляющей основной ветровой нагрузки, в зависимости от эквивалентной высоты z_b над поверхностью земли следует определять по формуле (п. 11.1.3):⁷

$$w_m = w_0 k(z_b) c, \quad (3)$$

где w_0 — нормативное значение ветрового давления (п. 11.1.4); $k(z_b)$ — коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления для высоты z_b (пп. 11.1.5, 11.1.6), принимаем по таблице 11.2; c — аэродинамический коэффициент (п. 11.1.7)⁸.

Нормативное значение ветрового давления w_0 принимается в зависимости от ветрового района по таблице 11.1. Для Волгограда, согласно карте 2 приложения Е, находящегося в ветровом районе III, $w_0 = 0,38$ кПа⁹.

Проведем расчет ветровой нагрузки (рис. 3—7). Исходные данные для расчета:

$$b = 17,54 \text{ м};$$

$$d = 39,21 \text{ м};$$

$$2h = 2 \cdot 63,72 = 127,44 \text{ м}.$$

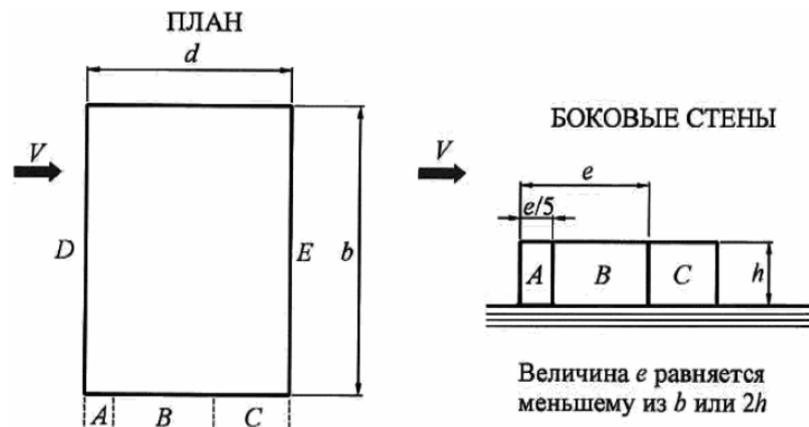


Рис. 3. Схема участков для расчета ветровой нагрузки

⁶ СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. М.: Министерство регионального развития РФ, 2011. 76 с.

⁷ Там же.

⁸ Там же.

⁹ Там же.

Соответственно: $e = b = 17,54$ м;

$$A = \frac{e}{5} = \frac{17,54}{5} = 3,508 \text{ м};$$

$$B = e - \frac{e}{5} = 17,54 - \frac{17,54}{5} = 14,032 \text{ м};$$

$$C = d - e = 39,21 - 17,54 = 21,67 \text{ м};$$

$$D, E = b = 17,54 \text{ м};$$

$$w_0 = 0,38 \text{ кПа};$$

$$k(5) = 0,4;$$

$$k(10) = 0,4;$$

$$k(20) = 0,55;$$

$$k(40) = 0,8;$$

$$k(60) = 1;$$

$$k(63, 72) = 1,028.$$

Участок А:

$$w_m(5) = 0,38 \cdot 0,4 \cdot (-1) = -0,152 \text{ кПа};$$

$$w_m(10) = 0,38 \cdot 0,4 \cdot (-1) = -0,152 \text{ кПа};$$

$$w_m(20) = 0,38 \cdot 0,55 \cdot (-1) = -0,209 \text{ кПа};$$

$$w_m(40) = 0,38 \cdot 0,8 \cdot (-1) = -0,304 \text{ кПа};$$

$$w_m(60) = 0,38 \cdot 1 \cdot (-1) = -0,38 \text{ кПа};$$

$$w_m(63, 72) = 0,38 \cdot 1,028 \cdot (-1) = -0,391 \text{ кПа}.$$

Участок В:

$$w_m(5) = 0,38 \cdot 0,4 \cdot (-0,8) = -0,122 \text{ кПа};$$

$$w_m(10) = 0,38 \cdot 0,4 \cdot (-0,8) = -0,122 \text{ кПа};$$

$$w_m(20) = 0,38 \cdot 0,55 \cdot (-0,8) = -0,167 \text{ кПа};$$

$$w_m(40) = 0,38 \cdot 0,8 \cdot (-0,8) = -0,243 \text{ кПа};$$

$$w_m(60) = 0,38 \cdot 1 \cdot (-0,8) = -0,304 \text{ кПа};$$

$$w_m(63, 72) = 0,38 \cdot 1,028 \cdot (-0,8) = -0,313 \text{ кПа}.$$

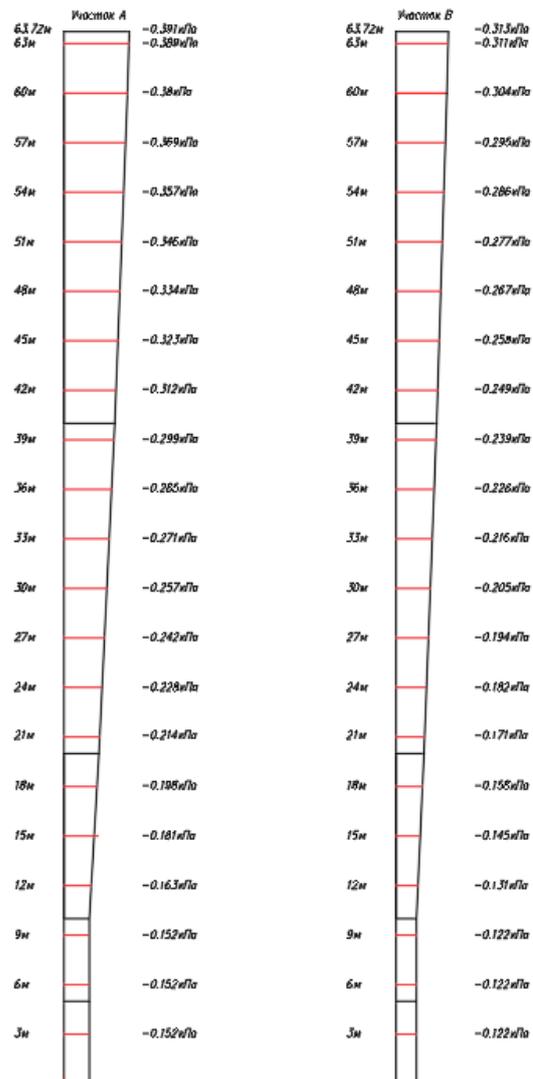


Рис. 4. Участки А, В

Участки С, Е:

$$w_m(5) = 0,38 \cdot 0,4 \cdot (-0,5) = -0,076 \text{ кПа};$$

$$w_m(10) = 0,38 \cdot 0,4 \cdot (-0,5) = -0,076 \text{ кПа};$$

$$w_m(20) = 0,38 \cdot 0,55 \cdot (-0,5) = -0,104 \text{ кПа};$$

$$w_m(40) = 0,38 \cdot 0,8 \cdot (-0,5) = -0,152 \text{ кПа};$$

$$w_m(60) = 0,38 \cdot 1 \cdot (-0,5) = -0,19 \text{ кПа};$$

$$w_m(63,72) = 0,38 \cdot 1,028 \cdot (-0,5) = -0,195 \text{ кПа}.$$

Участок D:

$$w_m(5) = 0,38 \cdot 0,4 \cdot (0,8) = 0,122 \text{ кПа};$$

$$w_m(10) = 0,38 \cdot 0,4 \cdot (0,8) = 0,122 \text{ кПа};$$

$$w_m(20) = 0,38 \cdot 0,55 \cdot (0,8) = 0,167 \text{ кПа};$$

$$w_m(40) = 0,38 \cdot 0,8 \cdot (0,8) = 0,243 \text{ кПа};$$

$$w_m(60) = 0,38 \cdot 1 \cdot (0,8) = 0,304 \text{ кПа};$$

$$w_m(63,72) = 0,38 \cdot 1,028 \cdot (0,8) = 0,313 \text{ кПа}.$$

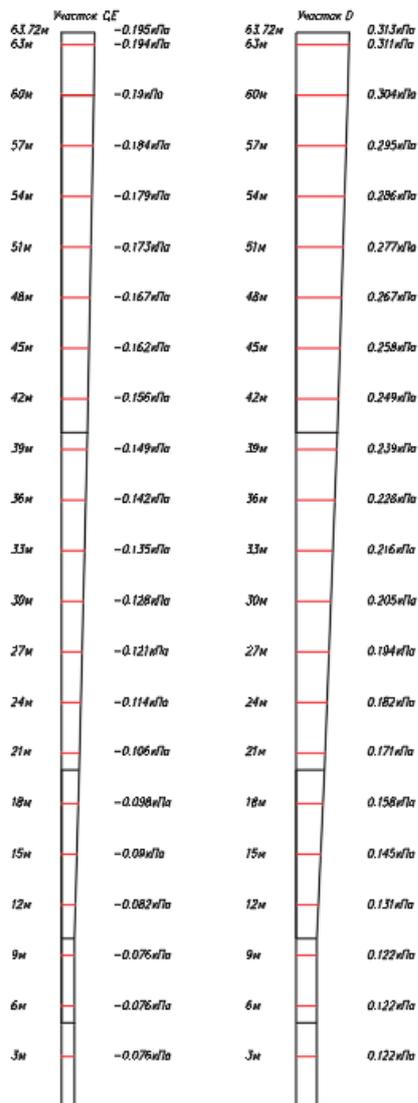


Рис. 5. Участки C, E, D

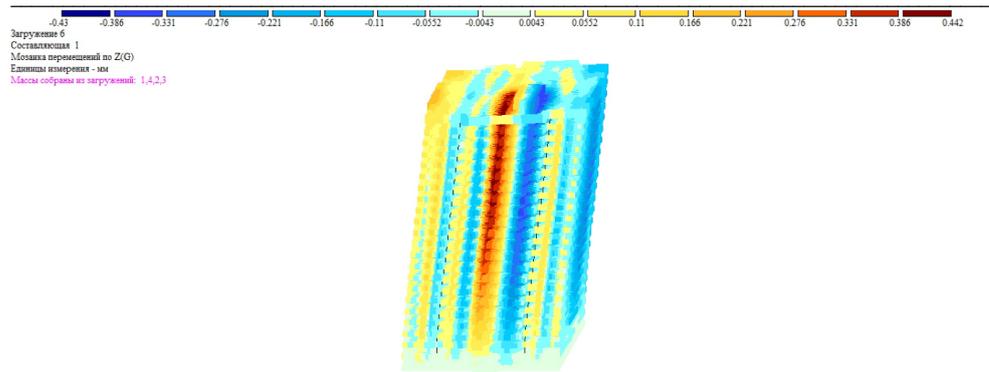


Рис. 6. Перемещения по оси Z (6-е загрузеие)

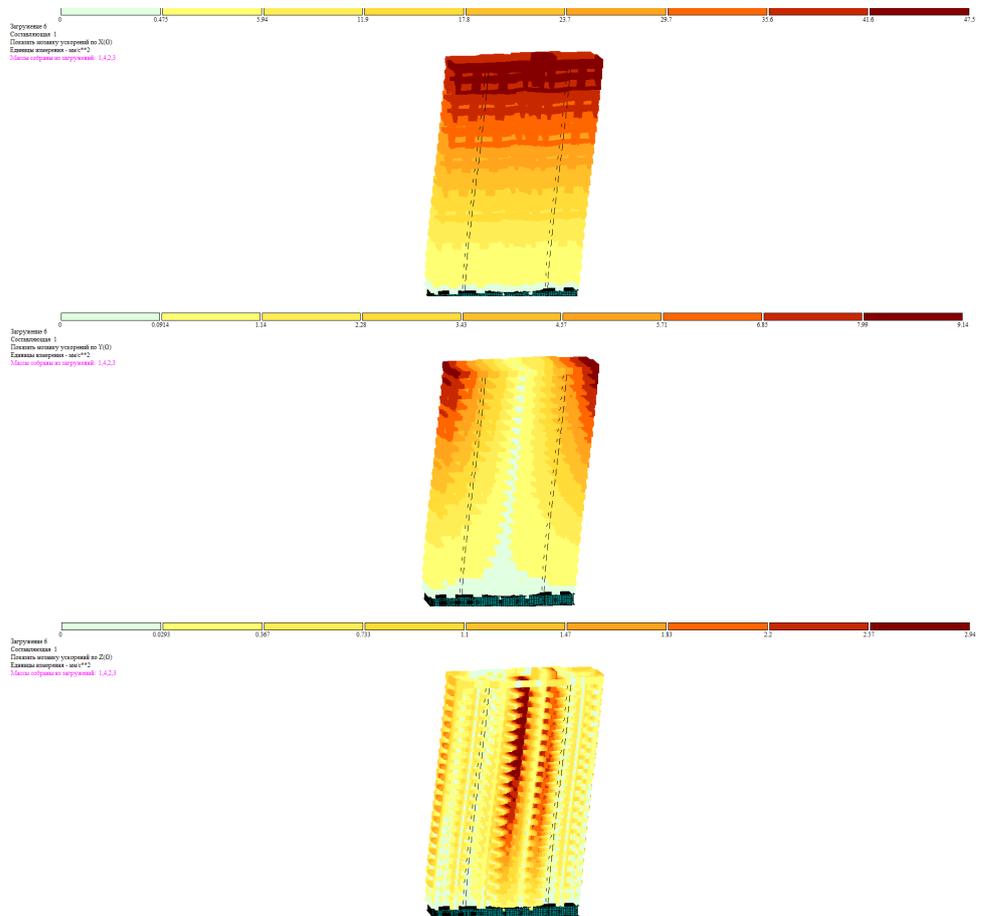


Рис. 7. Мозаика ускорений $a(x)$, $a(y)$, $a(z)$ (6-е загрузеие)

При превышении допустимой нормативной величины максимального ускорения необходимо откорректировать конструктивную схему каркаса здания.

Следует отметить, что регулирование динамических характеристик способом изменения жесткостных параметров элементов каркаса является неэф-

фактивным для зданий высотой до 75 м. В таких случаях необходимо варьировать расстановку диафрагм жесткости в соответствии с центром тяжести сооружения и использовать способ изменения расположения сосредоточенных масс [13].

Недостаток знаний о действии ветровой нагрузки на сооружение может привести к обрушению высотных зданий. Основными причинами аварийных ситуаций, связанных с ветровой нагрузкой, могут быть ошибки в назначении величины расчетной ветровой нагрузки, вибрация конструкций, а также учет аэродинамических характеристик.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ignatiev A. V.* Obtaining the dynamic frequency equation for the plate calculation by the Finite Element Method in the form of a classical mixed method // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 456. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/456/1/012110/pdf>.
2. *Игнатьев В. А., Игнатьев А. В.* Решение плоской задачи теории упругости по методу конечных элементов в форме классического смешанного метода // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2013. Вып. 31-2(50). С. 337—343.
3. Экспериментальное исследование распределения аэродинамических коэффициентов на высотное здание / А. А. Сатанов, М. Л. Поздеев, А. В. Симонов, А. П. Помазов, П. А. Хазов // Приволжский научный журнал. 2022. № 3. С. 43—51.
4. *Габова В. В., Игнатьев В. А.* Расчет стержневой системы на динамические воздействия с применением метода конечных элементов // X региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области. Волгоград, 2006. С. 11.
5. *Игнатьев В. А., Игнатьев А. В., Габова В. В.* Динамика сооружений: учеб. пособие. Волгоград; ВолгГАСУ, 2015. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008593993>.
6. *Кравченко Г. М., Труфанова Е. В., Шутенко Е. О., Хаишхожев К. Н.* Динамический расчет объекта «Спортивно-оздоровительный комплекс» // Инженерный вестник Дона. 2015. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3279.
7. *Игнатьев В. А., Игнатьев А. В.* Расчет геометрически нелинейных плоских шарнирно-стержневых систем по методу конечных элементов в форме классического смешанного метода // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2013. Вып. 34(53). С. 82—89.
8. *Vosoughi A. R.* A mixed finite element and improved genetic algorithm method for maximizing buckling load of stiffened laminated composite plates // Aerospace Science and Technology. 2017. Vol. 70. Pp. 378—387.
9. *Кадисов Г. М.* Динамика и устойчивость сооружений. М.: АСВ, 2007. 272 с.
10. *Масленников А. М.* Основы динамики и устойчивости сооружений. М.: АСВ, 2000. 201 с.
11. *Ignatiev A. V., Ignatiev V. A.* Specific features and advantages of the finite element method in the form of classical mixed method as an alternative for the traditional finite element method // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2014. Vol. 10. No. 4. Pp. 121—124.
12. *Игнатьев В. А., Игнатьев А. В.* Расчет плоских рам с большим перемещением узлов по методу конечных элементов в форме классического смешанного метода // Строительство и реконструкция. 2015. № 2(58). С. 12—19.
13. *Кравченко Г. М., Труфанова Е. В., Тронин Д. И.* Исследование динамических характеристик каркаса здания методом конечных элементов // Строительство и архитектура. 2019. № 1. С. 39—44.
14. Probabilistic method for service life estimation of reinforced concrete roof trusses of operated industrial building / V. A. Pshenichkina, K. N. Sukhina, V. V. Drozdov, V. S. Babalich, K. A. Sukhin, A. N. Zhukov // International Review of Civil Engineering. 2016. Vol. 7. No. 6. Pp. 158—163.
15. *Ignatiev A. V., Ignatiev V. A.* The mathematical modeling of the incomplete algebraic eigenvector and eigenvalue problem for obtaining the reduced frequency equation and its solution //

IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 456.
URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/456/1/012109/pdf>.

16. *Ignatiev A. V., Ignatiev V. A.* Modified Algorithm for the Analysis of Thin Plates by the Finite Element Method in the Form of the Classical Mixed Method // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. Pp. 1766—1770.

17. *Ignatiev A. V., Ignatiev V. A., Onishchenko E. V.* Analysis of Flexible Bars and Frames with Large Displacements of Nodes By Finite Element Method in the Form of Classical Mixed Method // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 262.
URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/262/1/012049>.

18. *Игнатьев А. В.* Метод конечных элементов в форме классического смешанного метода (особенности и возможности применения) // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2015. № 3(260). С. 55—60.

19. *Pshenichkina V. A., Politov S. I., Chirkov A. A.* Experimental and Theoretical Rationale for Maximum Loading with a Specified Degree of Risk when Simulating the Operation of a «Bed-Foundation-Superstructure» System // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2016. Vol. 52. Iss. 6. Pp. 311—316.

20. *Цуканова Е. С.* Совершенствование методов расчета колебаний стержневой системы на основе динамического конечного элемента: дис.... канд. техн. наук. Брянск : БГТУ, 2017. 91 с.

© *Габова В. В., Родионов А. В., Сиротенко О. О.*, 2023

*Поступила в редакцию
в сентябре 2023 г.*

Ссылка для цитирования:

Габова В. В., Родионов А. В., Сиротенко О. О. Исследование поведения конструкций высотных зданий при воздействии ветровых нагрузок // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. Серия: Строительство и архитектура. 2023. Вып. 5(93). С. 5—17.

Об авторах:

Габова Виктория Викторовна — канд. техн. наук, доц., доц. каф. строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; gabovavv@yandex.ru

Родионов Антон Вячеславович — магистрант, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; IToshka@yandex.ru

Сиротенко Олег Олегович — магистрант, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; olegsirotenko28@yandex.ru

Victoria V. Gabova, Anton V. Rodionov, Oleg O. Sirotenko

Volgograd State Technical University

INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF STRUCTURES OF HIGH-RISE BUILDINGS UNDER THE INFLUENCE OF WIND LOADS

The article discusses the types of impact of wind load on load-bearing structures. The characteristic of dynamic loads is presented. The main and additional parameters of the calculation of the pulsation component of the wind load are considered.

Key words: wind load, types of wind load, acceleration from wind load, pulsation component, normative values of the pulsation component, rigidity of the building.

For citation:

Gabova V. V., Rodionov A. V., Sirotenko O. O. [Investigation of the behavior of structures of high-rise buildings under the influence of wind loads]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2023, iss. 5, pp. 5—17.

About authors:

Victoria V. Gabova — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; gabovavv@yandex.ru

Anton V. Rodionov — Master's Degreee student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; IToshka@yandex.ru

Oleg O. Sirotenko — Master's Degreee student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; olegsirotenko28@yandex.ru