

В.С. КУЗНЕЦОВ¹, Е.А. ЕГОРОВ¹, В.А. ЕКИМОВСКАЯ¹¹Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ ОСНОВНОЙ И ПУЛЬСАЦИОННОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВЕТРА НА ЗДАНИЯ ПРИЗМАТИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Аннотация. Анализируются существующие методики определения коэффициентов ветровой нагрузки, с целью выявления особенностей влияния вида распределения на усилия от воздействия ветра на конструкции зданий и сооружений призматического типа с различными пропорциями фронтальной поверхности. Рассматривались железобетонные здания с первой частотой собственных колебаний больше предельного значения. Исследование выполнено на основе изучения и анализа основных положений нормативных документов, регулирующих проектно-конструкторскую деятельность в РФ, а также актуальных трудов отечественных и зарубежных ученых, соответствующих исследованиям данного направления. Метод исследования структурно-аналитический анализ с использованием корреляционных зависимостей исследуемых факторов. Приводятся аналитические зависимости для определения усилий от ветра при различных способах назначения коэффициента пульсационной ветровой нагрузки по высоте здания, с учетом формы и пропорций ветровой поверхности, а также их графическая интерпретация. Работа основана на положениях отечественных строительных норм и правил и соответствующих сведений, содержащихся в иных отечественных и зарубежных источниках и нормах. Установлено, что в зданиях призматической формы наблюдаются отдельные участки, где усилия от составляющих ветровой нагрузки, существенно зависят не только от пропорций фронтальных поверхностей, но и методов, примененных для установления закона распределения коэффициентов. Проведенное исследование свидетельствует о неоднозначности получаемых результатов, допускающих возможность превышения или недогруженности конструкций или отдельных элементов. Результаты работы позволяют корректировать расчеты по установлению величин ветровых нагрузок для рассмотренных типов зданий и диапазонов высот и прогнозировать для других объектов с иными параметрами.

Ключевые слова: железобетон, фронтальная поверхность, коэффициент пульсации, ветровая нагрузка, анализ, усилия, ветер.

V.S. KUZNETSOV¹, E.A. EGOROV¹, V.A. EKIMOVSKAYA¹¹Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

INFLUENCE OF THE MAIN AND PULSATING COMPONENTS OF THE WIND ON BUILDINGS OF A PRISMATIC FORM

Abstract. The existing methods for determining the wind load coefficients are analyzed in order to identify the features of the influence of the type of distribution on the forces from the impact of the wind on the structures of buildings and structures of a prismatic type with different proportions of the frontal surface. Reinforced concrete buildings with the first frequency of natural vibrations greater than the limit value were considered. The study was carried out on the basis of the study and analysis of the main provisions of regulatory documents regulating design and development activities in the Russian Federation, as well as relevant works of domestic and foreign scientists relevant to research in this area. The research method is structural-analytical analysis using the correlation dependences of the studied factors. Analytical dependences are given to determine the forces from the wind with various methods of assigning the coefficient of the pulsating wind load along the height of the building, taking into account the shape and proportions of the wind surface, as well as their graphical interpretation. The work is based on the provisions of domestic building codes and regulations and relevant information contained in other domestic and foreign sources and standards. It has been established that in buildings of a prismatic shape there are separate sections where the forces from the

components of the wind load significantly depend not only on the proportions of the frontal surfaces, but also on the methods used to establish the distribution law of the coefficients. The conducted research indicates the ambiguity of the results obtained, allowing the possibility of exceeding or underloading structures or individual elements. The results of the work make it possible to correct calculations for establishing the values of wind loads for the considered types of buildings and height ranges and to predict for other objects with different parameters.

Keywords: reinforced concrete, frontal surface, pulsation coefficient, wind load, analysis, forces, wind.

Введение

Обеспечение прочности, долговечности и сохранения эксплуатационных свойств здания или сооружения невозможно без постоянного совершенствования методов расчета строительных конструкций, уточнения расчетных схем и действующих нагрузок. По мере накопления новых экспериментальных данных, выявления нестыковок или противоречий, положения норм уточняются и закрепляются законодательно. В полной мере это относится к ветровым нагрузкам и воздействиям [1,2]. Так, например, совокупность воздействия окружающей среды и желание максимально удешевить сооружение привели к чрезмерным колебаниям моста (танцующий мост) в Волгограде в 2010 году [3,4]. Хрестоматийным примером являются обрушение в 1879 году Тейского моста в Англии. Основная причина катастрофы - прямой недоучет ветровой нагрузки: проектное давление ветра принято 47 кг/м^2 , а в момент разрушения достигло 188 кг/м^2 [5,6]. Изменение климата, влияние ландшафта, окружающей застройки и других факторов неизбежно влияет на распределение и величины ветровых нагрузок [7,8]. Очевидно, что неточная оценка ветровой нагрузки и применение ее в проектной практике может привести или к перегрузке отдельных элементов здания, провоцирующих аварийную ситуацию или к созданию необоснованных запасов прочности, что увеличивает расход материалов и стоимость объекта в целом [9,10,11].

Модели и методы

В качестве объекта (модели) исследования рассмотрены здания, призматического очертания с размерами фронтальной ветровой поверхности $h \times d = (80 \times 80 \text{ м})$, $(80 \times 40 \text{ м})$ и $(80 \times 20 \text{ м})$, нагруженные нормальной к поверхности ветровой нагрузкой, различной конфигурации. При выборе материалов и методов исследования учитывался опыт зарубежных ученых [12-16].

Согласно СП 20.13330.2016 нормативное значение ветровой нагрузки определяется как сумма средней W_m и пульсационной W_g составляющих, формула (1)

$$W = W_m + W_g \quad (1)$$

Средняя составляющая ветровой нагрузки W_m (подробное исследование W_m для зданий аналогичного класса, выполненное авторами, изложено в [17]) определяется по формуле (2), где W_0 – нормативное значение ветрового давления, $k(z_e)$ – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления для высоты z , c – аэродинамический коэффициент.

$$W_m = W_0 k(z_e) c \quad (2)$$

Для конкретного типа местности, фронтальное давление ветра W_0 и аэродинамический коэффициент «с» являются константами, не влияющими на результат исследования и исключены из протокола. Коэффициенты ветрового давления $k(z)$, установлены для различных типов местности и высотных отметок, на основе многолетних наблюдений и затабулированы в СП 20. На рисунке 1 представлена графическая интерпретация изменений коэффициента основного напора ветра $k(z)$ и коэффициента пульсации ветрового давления $\zeta(z)$ в диапазоне высот от 0 до +80 м, что соответствует большинству объектов жилищного и гражданского строительства. В дальнейших исследованиях рассматривалось распределение «k» для местности типа «В». Вычисление значений коэффициентов ветрового давления, согласно СП 20 допускается производить по формуле (3).

$$k_{ze} = k_{10} (z_e/10)^{2\alpha} \quad (3)$$

где k_{10} -коэффициент ветрового давления, соответствующий высоте 10 м над уровнем земли (для местности типа «В» $k_{10}=0,65$); α -эмпирический коэффициент (для местности типа «В» $\alpha=0,2$).

Аналитическая зависимость (3), полученная в результате многолетних наблюдений, устанавливает среднестатистическое значение коэффициента k_{ze} на любой высоте.

W_p — пульсационная составляющая ветровой нагрузки определяется в зависимости от частоты собственных колебаний сооружения. Так, если первая частота собственных колебаний f_1 больше предельного значения f_1 , что соответствует большинству железобетонных зданий, [18,19], пульсационная составляющая W_p (подробное исследование W_m для зданий аналогичного класса, выполненное авторами, изложено в [20]) определяется формулой (4).

$$W_g = W_m \xi(z_e) v, \quad (4)$$

где $\xi(z_e)$ - коэффициент пульсации давления ветра, z_e - эквивалентная высота,

v - коэффициент пространственной корреляции пульсаций давления ветра (5)

$$\zeta(z_e) = \zeta_{10} \left(\frac{z_e}{10} \right)^{-\alpha}. \quad (5)$$

Здесь ζ_{10} -коэффициент пульсационного ветрового давления, соответствующий высоте 10 м над уровнем земли. Для местности типа «В» $\zeta_{10}=1,06$; α -эмпирический коэффициент $\alpha=0,2$.

При совместном учете основной и пульсационной составляющей выражение для определения ветровой нагрузки принимает вид (6)

$$W = W_m + W_g = W_0 k(z_e) c + W_0 k(z_e) c \xi(z_e) v \quad (6)$$

или (7)

$$W = W_0 c k(z_e) [1 + \zeta(z_e) v] \quad (7)$$

Для конкретного типа местности, фронтальное давление ветра W_0 и аэродинамический коэффициент «с» являются константами, не влияющими на результат и значения коэффициента k , определяется по формуле (8).

$$k = k(z_e) [1 + \zeta(z_e) v] \quad (8)$$

Так как расчетная поверхность близка к прямоугольнику и ориентирована параллельно одной из осей коэффициент v зависит от пропорций поверхности и при 80×80 м $v=0,56$; 80×40 ; $v=0,63$; 40×40 м $v=0,68$.

В работе рассматривалось распределение « k » для местности типа «В», однако, метод исследования применим и для других типов.

Результаты исследования и их анализ

На рисунке 1 представлена графическая интерпретация классического распределения коэффициентов основного, пульсационного и суммарного значений в соответствии с формулой (3), в диапазоне высот от 0 до +80 м, что соответствует большинству объектов жилищного и гражданского строительства.

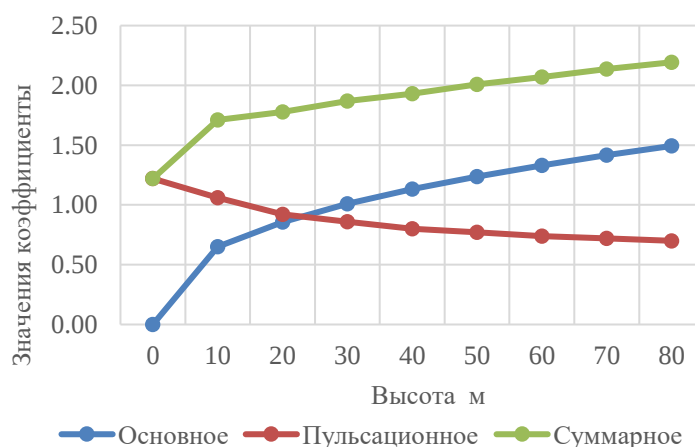


Рисунок 1- Распределение коэффициентов пульсации и основного давления ветра, без учета пропорций напорной поверхности.

В дальнейшем классическое распределение в нормах было заменено дискретным, упрощающим вычислительный процесс, но допускающим разночтения в определении ветровых нагрузок. Вычисленные в соответствии с формулами (2) и (3) значения коэффициентов основного давления ветра и коэффициента пульсации для фронтальной поверхности трех типов зданий представлены графиками на рисунках 1,2,3,4.

Естественно, лучшим критерием установления истинного распределения, является эксперимент, как правило, заключающийся в продувке макетов здания или сооружения в аэродинамической трубе, хотя любой опыт требует тщательности проведения, строгого соблюдения геометрических и физических критериев подобия, и др. Однако, в массовом строительстве экспериментальное сопровождение не предусмотрено и рекомендовано лишь при проектировании высотных и уникальных зданий или сооружений.

Применение ступенчатого распределения коэффициентов для зданий с размерами фронтальной поверхности 80х80 метров, в соответствии с рекомендациями СП 20, плавные кривые заменяются постоянными значениями, соответствующими эквивалентной высоте (см. рисунок 2).

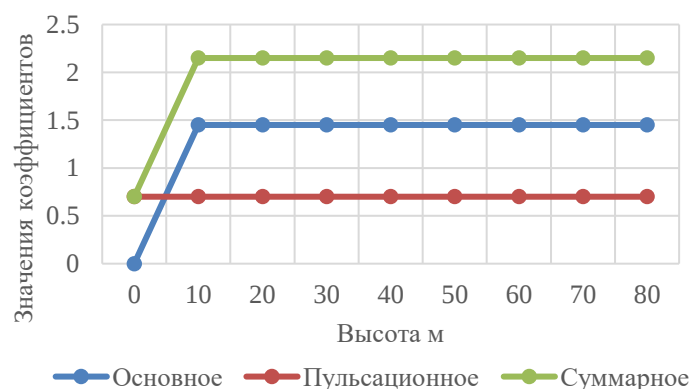


Рисунок 2- Распределение коэффициентов пульсации, основного и суммарного давления ветра для зданий 80х80 м.

Для зданий данной конфигурации такое представление упрощает процесс определения и приложения ветровых нагрузок, однако, допускает неоднозначность распределения усилий по высоте. Так на участке с координатами 10-70 м наблюдается превышение суммарных значений давления ветра (с учетом основной и пульсационной составляющей), по сравнению с классическим.

Для зданий с фронтальной поверхностью 40х80 метров, в соответствии с рекомендациями [1], кривые распределения коэффициентов заменяются постоянными значениями, соответствующими двум отметкам эквивалентной высоты (см. рисунок 3).

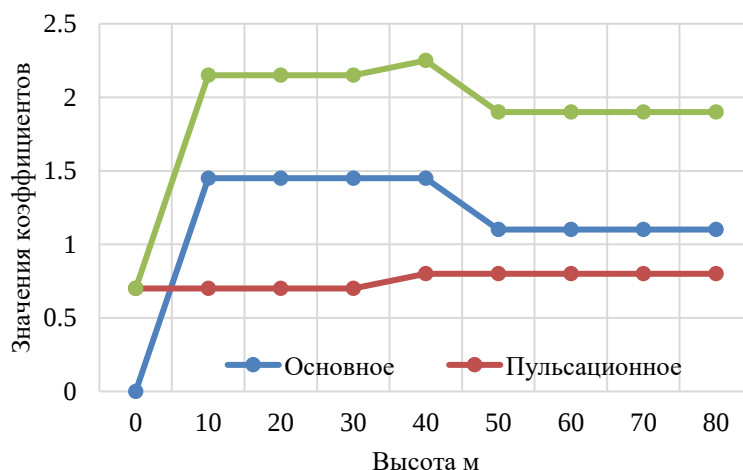


Рисунок 3- Распределение коэффициентов пульсации, основного и суммарного давления ветра для зданий 40х80 м.

Такое распределение также упрощает процесс определения и приложения ветровых нагрузок, однако, сохраняет некоторую неопределенность распределения усилий по высоте здания. Так на участке с высотными координатами 10-40 м наблюдается превышение суммарных значений давления ветра (с учетом основной и пульсационной составляющей), по сравнению с классическим.

Для зданий с поверхностью фасада 20х80 метров, в соответствии с рекомендациями СП 20, кривые распределения коэффициентов заменяются постоянными значениями, соответствующими трем отметкам эквивалентной высоты (см. рисунок 4).

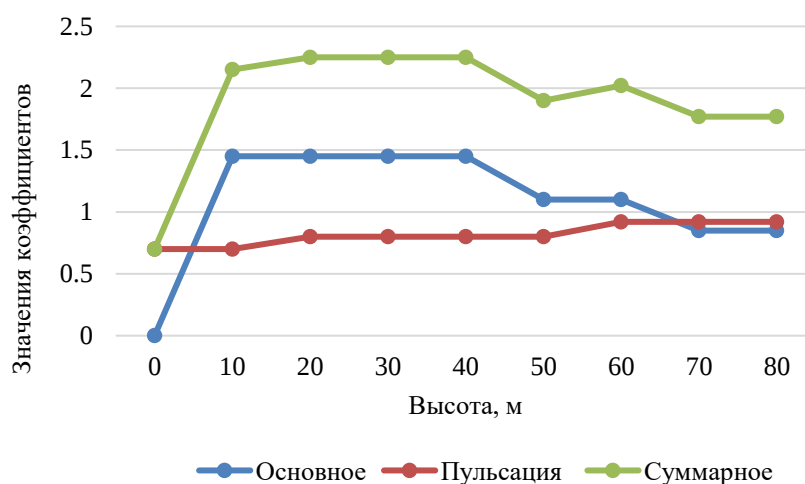


Рисунок 4- Распределение коэффициентов пульсации, основного и суммарного давления ветра для зданий 20х80 м.

Такое распределение наилучшим образом совпадает с классическим, однако, на участке с высотными координатами 50-80 м отмечается уменьшение суммарных значений давления ветра (с учетом основной и пульсационной составляющей). Раздельное влияние коэффициентов основного и пульсационного давлений ветра для таких зданий представлено в работах [17,20].

Выводы

1. Проведенное исследование выявило некоторое несоответствие в рекомендованных нормами способах определения коэффициентов распределения основной и пульсационной ветровой нагрузок для зданий с различными пропорциями напорной ветровой поверхности. Так применение дискретных форм распределения ветровых нагрузок изменяет картину напряженно деформированного состояния в элементах здания, по сравнению с классической формой распределения коэффициентов ветровых нагрузок.

2. Использование коэффициентов пространственной корреляции пульсаций давления ветра «v», учитывающего пропорции фронтальной поверхности при нормальном напоре ветра, недостаточно корректирует результаты. Данное обстоятельство приводит к появлению отдельных колонн, стен или пилонов, где расчетные усилия зависят от метода определения коэффициентов и могут отличаться как в большую, так и в меньшую сторону. Установлено, что лучшее совпадение теоретического и условного распределения коэффициентов достигается для зданий башенного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Платонов А.С. Уроки аварий конструкций мостов // Транспортное строительство. 2009. № 6. С. 6–9.
2. Eurocode 1: Basis design and action on structures. Part 1: "Basis design". CEN, 232 p. British Standard, Loadings for Buildings - Part 2: Code of Practice for Wind Loads (1995).
3. Симиу Э., Сканлан Р. «Воздействие ветра на здания и сооружения»; перевод с английского под редакцией канд. техн. наук Б.Е. Маслова. Москва: Стройиздат, 1984. 271 с.
4. Иоскевич А.В. и др. Понижающий коэффициент ветрового давления и его учет при расчете решетчатых конструкций // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. №4 (31). С. 45-57.
5. Алексеева А.А., Васильев Е.В., Бухаров В.М. Прогноз сильных шквалов на Европейской территории России и их идентификация доплеровскими радиолокаторами // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2017. Вып. 363. С. 47-64.
6. Ким Д.А. Анализ ветрового воздействия на здания и сооружения // Инженерный вестник Дона. 2020. №12. С. 1-11.
7. Егоров П.И. Влияние системы аутригеров в высотных зданиях на величину горизонтальных перемещений от пульсации ветра // Ученые заметки ТОГУ. 2014. №4 (4). С. 1579-1585. EN 1991-1-4. (1994).
8. Belal A.A. Typological analysis of architectural forms of Arab cities // Sustainable development of territories: collection of dokl. II International Scientific.- practical conf. M., 2019. Pp. 108-110.
9. Могилюк Ж.Г., Подувальцев В.В. Нормативные проблемы расчета динамических параметров зданий и сооружений // Компетентность. 2020. №10. С. 22-30.
10. Hrvoje Kozmar. Wind-tunnel simulations of the suburban ABL and comparison with international standards // Wind and Structures. 2011. Vol. 14. No. 1. Pp. 15-34.
11. The Territorial Context - Les Landes Ressource//Conseil Général des Landes, 2019, rue Victor Hugo - 40 000 Mont-de-Marsan 05 58 05 40 40 URL: www.land.es.org/Espace Energy Info.
12. Boulanger R.W., Curras C.J., Kutter B.L., Wilson D.W., Abghari A. Seismic soil-pile-structure interaction: experiments and analyses // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2014. Vol. 125. Issue 9. Pp. 750-759.
13. Loytsyanskiy L.F. Building and Civil Engineering Sector Board, UK. Liquid and gas mechanics. Moscow. Drofa, 2013. 144 p.
14. Koiter W.T. The effective width of flat plates for various longitudinal edge conditions at loads far beyond the buckling load // National Luchtvaart Laboratorium (The Netherlands). 2017. Rep. No. 5287. Pp 365-374.
15. Sarawit A.T., Kim Y., Bakker M.C.M., Pekoz T. The finite element method for thin-walled members-applications // Proceedings of the 3rd ICTWS. 2010. Pp. 437-448.
16. Belal A.A. Typological analysis of architectural forms of Arab cities // Sustainable development of territories : collection of dokl. II International Scientific.- practical conf. M., 2019. Pp. 108-110.
17. Кузнецов В.С., Шурушкин А.А. Усилия в зданиях призматической формы при различном распределении ветрового воздействия // Строительство и реконструкция. 2021. № 5. С. 31-39.
18. Karman T., Sechler E.E., Donnel L.H. The strength of thin plates in compression // Trans ASME. 1932. Vol. 54. P. 53-55. Le Context Territorial.
19. Галямичев А.В. Ветровая нагрузка и её действие на фасадные конструкции // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 9. С. 44-57.
20. Кузнецов В.С., Екимовская В.А. Усилия от пульсационной составляющей ветра на здания призматической формы // Вестник научно-технического развития. 2022. № 164. С. 3-9.

REFERENCES

1. Platonov A.S. Lessons of accidents of bridge structures // Transport construction. 2009. No. 6. Pp. 6-9.
2. Eurocode 1: Basis design and action on structures. Part 1: "Basis design". CEN, 232 p. British Standard, Loadings for Buildings - Part 2: Code of Practice for Wind Loads (1995).
3. Simiu E., Scanlan R. «The impact of wind on buildings and structures»; translated from English edited by Candidate of Technical Sciences B.E. Maslov. Moscow: Sroyizdat, 1984. 271 p.
4. Ioskevich A.V. et al. Reducing wind pressure coefficient and its consideration in the calculation of lattice structures // Construction of unique buildings and structures. 2015. No.4 (31). Pp. 45-57.
5. Alekseeva A.A., Vasiliev E.V., Bukharov V.M. Forecast of strong squalls on the European territory of Russia and their identification by Doppler radars // Hydrometeorological studies and forecasts. 2017. Issue 363. Pp. 47-64.
6. Kim D.A. Analysis of wind impact on buildings and structures // Engineering Bulletin of the Don. 2020. No. 12. Pp 1-12.
7. Egorov P.I. Influence of the outrigger system in high-rise buildings on the magnitude of horizontal movements from wind pulsation // Scientific notes of TOGU. 2014. No. 4 (4). Pp. 1579-1585. EN 1991-1-4. (1994).
8. Belal A.A. Typological analysis of architectural forms of Arab cities // Sustainable development of territories : collection of dokl. II International Scientific.- practical conf. M., 2019. P. 108-110.

9. Mogilyuk Zh.G., Poduval'tsev V.V. Normative problems of calculating dynamic parameters of buildings and structures // Competence. 2020. No. 10. Pp. 22-30.
10. Hrvoje Kozmar. Wind-tunnel simulations of the suburban ABL and comparison with international standards // Wind and Structures. 2011. Vol. 14. No. 1. Pp. 15-34.
11. The Territorial Context - Les Landes Ressource//Conseil Général des Landes, 2019, rue Victor Hugo - 40 000 Mont-de-Marsan 05 58 05 40 40 URL: [www.landes.org/Espace Energy Info](http://www.landes.org/Espace_Energy_Info).
12. Boulanger R.W., Curras C.J., Kutter B.L., Wilson D.W., Abghari A. Seismic soil-pile-structure interaction: experiments and analyses // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2014. Vol. 125. Issue 9. Pp. 750-759.
13. Loytsyanskiy L.F. Building and Civil Engineering Sector Board, UK. Liquid and gas mechanics. Moscow, Drofa, 2013. 144 p.
14. Koiter W.T. The effective width of flat plates for various longitudinal edge conditions at loads far beyond the buckling load // National Luchtvaart Laboratorium (The Netherlands). 2017. Rep. No. 5287. Pp. 365-374.
15. Sarawit A.T., Kim Y., Bakker M.C.M., Pekoz T. The finite element method for thin-walled members-applications // Proceedings of the 3rd ICTWS. 2010. Pp. 437-448.
16. Belal A.A. Typological analysis of architectural forms of Arab cities // Sustainable development of territories : collection of dokl. II International Scientific.- practical conf. M., 2019. Pp. 108-110.
17. Kuznetsov V.S., Gurushkin A.A. Efforts in buildings of prismatic shape with different distribution of wind impact // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2021. № 5. Pp. 31-39.
18. Karman T., Sechler E.E., Donnel L.H. The strength of thin plates in compression // Trans ASME. 1932. Vol. 54. P. 53-55. Le Context Territorial.
19. Galyamichiev A.V. Wind load and its effect on facade structures // Construction of Unique Buildings and Structures. 2017. № 9. Pp. 44-57.
20. Kuznetsov V.S., Ekimovskaya V.A. Efforts of the pulsating wind component on prismatic buildings // Bulletin of Science and Technical Development. 2022. № 164. Pp. 3-9.

Информация об авторах:

Кузнецов Виталий Сергеевич

ФГБОУ «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
кандидат технических наук, профессор кафедры Архитектурно-строительного проектирования.
E-mail: KuznetsovVS@mgsu.ru

Егоров Евгений Александрович

ФГБОУ «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
старший преподаватель.
E-mail: EgorovEA@mgsu.ru

Екимовская Валерия Алексеевна

ФГБОУ «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
студент.
E-mail: lera.ek00@mail.ru

Information about authors:

Kuznetsov Vitaliy S.

National research Moscow state University of civil engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia,
candidate of technical sciences, associate professor of the department of Architectural design.
E-mail: KuznetsovVS@mgsu.ru

Egorov Evgeny Al.

National research Moscow state University of civil engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia,
senior lecturer.
E-mail: EgorovEA@mgsu.ru

Ekimovskaya Valeria Al.

National research Moscow state University of civil engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia,
student.
E-mail: lera.ek00@mail.ru