Влияние точечного высотного строительства на аэродинамические характеристики существующей застройки

О.И. Поддаева, О.О. Егорычев, Ж.И. Нагорнова

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26*

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрена методика экспериментального моделирования ветровых воздействий на здания и сооружения, расположенные в плотной городской застройке. Актуальность темы исследования объясняется увеличением плотности городской застройки крупных городов, а также тенденцией к точечному строительству высотных зданий в районах с существующей невысокой исторической застройкой.

Материалы и методы. Метод исследования — экспериментальное моделирование в аэродинамической трубе. Изучена уменьшенная геометрически подобная модель объекта. Использована система, базирующаяся на дифференциальных тензометрических датчиках давления. Данные экспериментов приведены в виде безразмерных аэродинамических коэффициентов давления. Рассмотрена застройка, состоящая из трех существующих невысоких и одного проектируемого высотного зданий. С целью оценки влияния проектируемого здания на ветровую нагрузку существующих строительных конструкций проанализированы три различные схемы их расположения.

Результаты. Определены параметры ветровой нагрузки (аэродинамические коэффициенты) на существующие строительные конструкции и построены показательные графики зависимости средних значений аэродинамических коэффициентов от расположения высотного строения и угла атаки набегающего воздушного потока.

Выводы. Результаты проведенных исследований позволяют говорить о значительном падении средних показателей ветровой нагрузки на здания существующей застройки при расположении высотного строения вблизи нее, что свидетельствует о благотворном влиянии подобного расположения зданий на аэродинамическую ситуацию района с точки зрения ветровой нагрузки на сами здания. Рекомендовано проведение комплексных исследований на этапе разработки проектной документации для каждого подобного объекта и, помимо ветровой нагрузки, следует оценивать влияние проектируемых сооружений на аэрацию и биоклиматическую комфортность района застройки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: аэродинамика, физический эксперимент, воздействие ветра, аэродинамическая нагрузка, высотное строительство, строительная аэродинамика, аэродинамическая труба, аэрация, биоклиматическая комфортность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Поддаева О.И., Егорычев О.О., Нагорнова Ж.И. Влияние точечного высотного строительства на аэродинамические характеристики существующей застройки // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 1. Ст. 2. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.1.2

Influence of point height construction on aerodynamic characteristics of existing buildings

Olga I. Poddaeva, Oleg O. Egorychev, Zhanna I. Nagornova

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),
26 Yaroslavl'skoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The article is devoted to the description of the method of experimental modeling of wind effects on buildings and structures located in dense urban areas. The relevance of the research topic is explained by the increase in the density of urban development in large cities, as well as the tendency to the point construction of high-rise buildings in areas with existing low-rise, historical buildings.

Materials and methods. Experimental modeling in a wind tunnel is considered as a research method. Studies were conducted on a reduced geometrically similar model of the real object. As measuring equipment was used the research system, which based on differential strain-gauge pressure sensors. The results of experimental studies are presented in the form of dimensionless aerodynamic pressure coefficients. The object under study is a building consisting of three non-high-rise and one designed high-rise buildings. In order to assess the impact of the designed building on the wind load on the existing building structures, three different schemes of their location were considered.

Results. Parameters of wind load (aerodynamic coefficients) on existing building structures were determined and exponential graphs of the dependence of the average values of the aerodynamic coefficients on the location of the height structure and the angle of attack of the incident air flow were constructed.

Conclusions. The results of the research suggest a significant decrease in the average wind load on the buildings of the existing building when the high-rise building is located near it, which indicates the beneficial effect of this arrangement of buildings on the aerodynamic situation of the area in terms of wind load on the buildings themselves. Nevertheless, at the stage of development of project documentation for each such facility, it is recommended to conduct comprehensive studies, where, in addition to the wind load, the impact of the designed structures on the aeration and bioclimatic comfort of the development area will be assessed.

KEYWORDS: aerodynamics, physical experiment, wind effect, aerodynamic load, high-rise construction, construction aerodynamics, wind tunnel, aeration, bioclimatic comfort

FOR CITATION: Poddaeva O.I., Egorychev O.O., Nagornova Z.I. Influence of point height construction on aerodynamic characteristics of existing buildings. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2019, vol. 9, issue 1, paper 2. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.1.2 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

На этапе проектирования любого строительного объекта, помимо вопросов, связанных с конструкцией и архитектурой необходимо оценить его влияние на окружающую среду, причем это касается как оценки влияния на экологию района застройки, так и оценки влияния на существующие строительные конструкции, расположенные в непосредственной близости от площадки застройки [1, 2]. Габариты проектируемого строения при этом играют одну из важнейших ролей [3]. Действительно, чем крупнее новое здание, тем большее влияние оно окажет на такие характеристики как инсоляция и распределение ветровых потоков на территории рассматриваемой застройки [4–6].

Ветер является одним из решающих факторов при проектировании нового здания^{1, 2}. Пренебрежение исследованиями ветрового воздействия может вызвать многие негативные последствия [7, 8], включая разрушение строения в целом или отдельных его частей [9]. При существенных изменениях в окружающей среде, в которой находится здание (точечная застройка, снос существующих объектов и т.д.), влияние ветра на него также изменяется [10], и результаты определения ветровой нагрузки, выполненные на этапе его проектирования, потеряют актуальность. Это обстоятельство свидетельствует о необходимости изучения изменений в распределении ветровых потоков на территории существующих районов городской застройки при точечном строительстве в них высотных зданий [11, 12].

Учебно-научно-производственная лаборатория по аэродинамическим и аэроакустическим испытаниям строительных конструкций Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ) входит в тройку российских исследовательских центров, обладающих аэродинамическими трубами, специализирующимися на испытаниях строительных конструкций [13–15].

¹ СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*.

² МДС 20-1.2006. Временные рекомендации по назначению нагрузок и воздействий, действующих на multifunctional высотные здания и комплексы в Москве. М. : ФГУП «НИЦ «Строительство», 2006. 27 с.

Аэродинамические исследования в строительной отрасли не ограничиваются определением параметров ветровой нагрузки на конкретный проектируемый объект, они также позволяют в динамике оценить воздействие ветрового потока на существующую застройку при строительстве и(или) сносе отдельных объектов на ее территории [16]. Современные специализированные аэродинамические трубы воспроизводят естественный воздушный поток [17, 18], чтобы изучить его влияние на модели строительных конструкций, созданные согласно методам теории подобия физических явлений, таких как — аэродинамическое сопротивление здания; давление на здание, вызванное потоком воздуха; комфортность человека около исследуемого здания [19, 20] и т.д.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Ситуация, которая была взята для изучения указанной проблемы, представляет собой классическую задачу с группой домов различной формы [21], осложненную наличием дополнительного высотного строения (рис. 1). Исследуемая застройка расположена в форме круга.

Рис. 1. Проект жилого комплекса

Модели исследуемых зданий и высотного здания сделаны из фанеры (рис. 2). Этот выбор может быть оправдан простотой и удобством при создании модели [22, 23]. Также выбранный материал обеспечивает необходимую жесткость конструкции модели в целом.

Рис. 2. Модели зданий окружающей застройки

Рис. 3. Схемы расположения застройки и высотного здания

При проведении испытаний исследовались несколько схем расположения существующей застройки относительно проектируемого высотного здания:

1. В первом случае была исследована застройка без влияния высотного здания (ситуация 1, рис. 3, *a*).

2. Во втором высотное здание размещено в центре застройки (ситуация 2, рис. 3, *b*).

3. В третьем высотное здание находилось вблизи застройки, но не входило внутрь круга, образованного ею (ситуация 3, рис. 3, *c*).

Для проведения эксперимента использовалась аэродинамическая труба МАДТ НИУ МГСУ. Модель закреплена в рабочей зоне МАДТ на специализированном поворотном основании (рис. 4).

Внутри моделей размещены 20 дифференциальных датчиков давления. Для этого в контрольных точках на поверхности модели сделаны отверстия, датчики жестко закреплены около каждого из них с внутренней стороны. Датчики подключены к компьютеру через аналого-цифровой преобразователь с частотой опроса системы 1000 Гц.

Скорость ветрового потока при проведении экспериментальных исследований составила 15 м/с. Подобная скорость позволяет говорить о достижении критических скоростей в числах Рейнольдса [24] и, соответственно, подобии потока воздуха по теории автомодельности по Рейнольдсу [25–27]. Испытания проведены для восьми углов атаки ветрового потока (с шагом 45°).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

После проведения экспериментальных исследований и анализа полученных данных результаты

были сведены в таблицу и нанесены на график для удобства анализа и формулировки выводов.

Давление, полученное с датчиков, пересчитывается в безразмерные значения аэродинамического коэффициента по формуле [28–30]:

$$C_p = \frac{p}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2}, \quad (1)$$

где C_p — коэффициент аэродинамического давления; p — давление в точке на модели, Па; v — скорость потока, м/с; ρ — плотность воздуха, кг/м³.

В следующей таблице (табл. 1) приведены экспериментальные данные для некоторых датчиков для всех углов атаки воздушного потока (были приняты во внимание только данные конкретных датчиков, их номера указаны в таблице, и отмечены зеленым цветом на рис. 3, *a*). Датчики 1, 3 и 11 выбраны для анализа ситуации, когда датчик находится за пределами застройки, в ее центре и на крыше одного из зданий. В табл. 1 показан максимум аэродинамического коэффициента в соответствующей точке.

Данные результаты подтверждают небольшую разницу значений на датчике № 1, который находится за пределами застройки (рис. 5).

В то же время, на датчике № 3 (рис. 6) можно видеть большую разницу значений аэродинамического коэффициента, составляющую почти 300 % между сит. 1 и сит. 3 и более 400 % между сит. 1 и сит. 2 (рис. 6).

На датчике № 11 (рис. 7) заметна разница аэродинамического коэффициента между сит. 1 и сит. 3 под углом 225° и 0°, а также между сит. 1 и сит. 2 под углом 225° и 315°.

Рис. 4. Крепление модели в рабочей зоне аэродинамической трубы МАДТ

Табл. 1. Максимальное значение аэродинамического коэффициента

Угол	Датчик № 1			Датчик № 3			Датчик № 11		
	Сит. 1	Сит. 2	Сит. 3	Сит. 1	Сит. 2	Сит. 3	Сит. 1	Сит. 2	Сит. 3
0	–0,262	–0,147	–0,310	0,261	0,074	1,396	–0,325	0,122	0,087
45	0,085	0,126	0,076	0,280	0,185	1,512	–0,131	–0,056	–0,097
90	0,457	0,526	0,469	0,331	0,179	1,871	–0,349	–0,300	–0,292
135	0,095	0,531	0,566	0,525	0,404	2,149	–0,252	–0,248	–0,162
180	0,086	0,062	0,116	0,769	1,558	2,074	–0,141	–0,095	–0,134
225	–0,328	–0,420	–0,331	0,544	0,164	1,634	–0,141	–0,250	–0,125
270	–0,083	–0,079	–0,098	0,543	0,188	1,584	–0,215	–0,226	–0,181
315	–0,117	–0,056	–0,355	0,356	0,021	1,071	–0,083	–0,083	–0,307

Рис. 5. Зависимость максимального значения аэродинамического коэффициента нагрузки от угла атаки потока (датчик № 1): сит. 1 — зеленая линия; сит. 2 — красная линия; сит. 3 — синяя линия

Рис. 6. Зависимость максимального значения аэродинамического коэффициента нагрузки от угла атаки потока (датчик № 3): сит. 1 — зеленая линия; сит. 2 — красная линия; сит. 3 — синяя линия

Рис. 7. Зависимость максимального значения аэродинамического коэффициента нагрузки от угла атаки потока (датчик № 11): сит. 1 — зеленая линия; сит. 2 — красная линия; сит. 3 — синяя линия

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Строительство в плотной городской среде — обычное явление в современном мире, причем, как правило, объектом такого строительства являются уникальные высотные здания. Один из наиболее важных критериев для разработки проекта высотного здания — оценка ветровой нагрузки и воздействия как на него, так и на окружающую его застройку.

Как видно из результатов эксперимента, для угла атаки потока ветра 0° на датчике № 3, который расположен вблизи центра застройки, наблюдается увеличение аэродинамического коэффициента на 300 % между первой и третьей ситуациями (рис. 3, а, с) и на 400 % между первой и второй

ситуациями (рис. 3, а, b). Если датчик расположен на крыше модели, разница в значении аэродинамического коэффициента менее заметна (около 30 % между первой и второй ситуациями). В случае расположения датчика вне застройки различия будут незначительными (2 % между первой и второй, и 10 % между первой и третьей ситуациями).

На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что изучение последствий строительства нового здания на аэрацию территории городской застройки является актуальной проблемой, особенно в случае точечного строительства высотных зданий. Результатами подобных исследований, применительно к конкретным случаям, должны быть выводы о необходимости внесения корректировок в существующую городскую застройку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения / пер. с англ. Б.Е. Маслова, А.В. Швецов. М. : Стройиздат, 1984. 360 с.
2. Петтер Э.И. Архитектурно-строительная аэродинамика. М. : Стройиздат, 1984. 294 с.
3. Yi Lia, Li Q.-S., Fubin Chen. Wind tunnel study of wind-induced torques on L-shaped tall buildings // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2017. Vol. 167. Pp. 41–50. DOI: 10.1016/j.jweia.2017.04.013
4. Соловьев С.Ю. Аэродинамическая устойчивость большепролетных мостов // Транспорт Российской Федерации. 2016. № 5. С. 47–50.
5. Луговцов А.Н., Фомин Г.М. Опыт моделирования в аэродинамических трубах автоколебаний высоких сооружений // Ученые записки ЦАГИ. 1973. № 3. С. 151–159.
6. Pan H., Xie Z., Xu A., Zhang L. Wind effects on Shenzhen Zhuoyue Century Center: Field measurement

and wind tunnel test // The Structural Design of Tall and Special Buildings. 2017. Vol. 26. Issue 13. P. e1376. DOI: 10.1002/tal.1376

7. Sicot C., Deliancourt F., Boree J., Aguinaga S., Bouchet J.-P. Representativeness of geometrical details during wind tunnel tests. Application to train aerodynamics in crosswind conditions // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2018. Vol. 177. Pp. 186–196. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.01.040

8. Snaebjornsson J.T. Full- and model scale study of wind effects on a medium-rise building in a built up area. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (Norway), ProQuest Dissertations Publishing. 2002. P. 812073.

9. Поддаева О.И., Кубенин А.С., Чуринов П.С. Архитектурно-строительная аэродинамика. М. : НИУ МГСУ, 2015. 88 с.

10. Поддаева О.И., Дуничкин И.В. Архитектурно-строительная аэродинамика // Вестник

МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 6 (105). С. 602–609. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.6.602-609

11. Ntinis G.K., Dados I.N., Shen X., Malamataris N.A., Fragos V.P., Zhang G. Characteristics of unsteady flow around two successive rectangular ribs on floor of a wind tunnel // *European Journal of Mechanics — B/Fluids*. 2017. Vol. 65. Pp. 450–458. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2017.01.018

12. Гувернюк С.В., Егорычев О.О., Исаев С.А., Корнев Н.В., Поддаева О.И. Численное и физическое моделирование ветрового воздействия на группу высотных зданий // *Вестник МГСУ*. 2011. № 3. С. 185–191.

13. Федосова А.Н., Чуринов П.С., Помелов В.Ю. Методика проведения аэродинамических экспериментальных исследований протяженных конструкций // *Национальная ассоциация ученых*. 2015. № 15–1 (15). С. 116–119.

14. Чуринов П.С., Поддаева О.И., Егорычев О.О. Проектирование макетов уникальных зданий и сооружений в экспериментальной аэродинамике // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2014. № 5. С. 332–335.

15. Егорычев О.О., Чуринов П.С., Поддаева О.И. Экспериментальное исследование сило-моментных ветровых нагрузок на высотные здания // *Промышленное и гражданское строительство*. 2014. № 9. С. 28–30.

16. Agerneh Dagnew. Computational evaluation of wind loads on low- and high-rise buildings // *Florida International University, ProQuest Dissertations Publishing*. 2012. DOI: 10.25148/etd.fi12111904

17. Горлин С.М. Экспериментальная аэромеханика. М. : Высшая школа, 1970. 423 с.

18. Barlow J., Rae W., Pope A. Low-speed wind tunnel testing. 3 ed. Wiley-Interscience, 1999. 728 p.

19. Tse K.T., Weerasuriya A.U., Kwok K.C.S. Simulation of twisted wind flows in a boundary layer wind tunnel for pedestrian-level wind tunnel tests // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2016. Vol. 159. Pp. 99–109. DOI: 10.1016/j.jweia.2016.10.010

20. Rotruck S.N. Design, construction, and qualification of the West Virginia university environmental wind tunnel. West Virginia University, ProQuest Dissertations Publishing. 2016. P. 10146644.

21. Khalid M., Juhany K.A., Hafez S. Computational modeling of the flow in a wind tunnel // *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 2018. Vol. 90. Issue 1. Pp. 175–185. DOI: 10.1108/aeat-05-2016-0072

22. Харитонов А.М. Техника и методы аэрофизического эксперимента. Ч. 1. Аэродинамические трубы и газодинамические установки. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2005. 220 с.

23. Харитонов А.М. Техника и методы аэрофизического эксперимента. Ч. 2. Методы и средства аэрофизических измерений. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2007. 456 с.

24. Warsido W.P. Reducing uncertainties in estimation of wind effects on tall buildings using aerodynamic wind tunnel tests // *Florida International University, ProQuest Dissertations Publishing*. 2013. DOI: 10.25148/etd.fi13080914

25. Бабич Е.М., Ревинкель Й.П., Филипчук С.В. Экспериментальное определение ветровой нагрузки на покрытие стадиона в г. Магдебурге // *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2014. № 1 (42). С. 126–135.

26. Amoroso S., Hebert K., Levitan M. Wind tunnel tests for mean wind loads on partially clad structures // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2010. Vol. 98. Issue 12. Pp. 689–700. DOI: 10.1016/j.jweia.2009.08.009

27. Yan Li, Zhengliang Li, Bowen Yan, Zhitao Yan. Wind forces on circular steel tubular lattice structures with inclined leg Members // *Engineering Structures*. 2017. Vol. 153. Pp. 254–263. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.10.032

28. Бедржицкий Е.Л., Дубов Б.С., Радциг А.Н. Теория и практика аэродинамического эксперимента. М. : Изд-во МАИ, 1990. 216 с.

29. Simiu E., Pintar A.L., Duthinh D., Yeo D. Wind load factors for use in the wind tunnel procedure // *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*. 2017. Vol. 3. Issue 4. P. 04017007. DOI: 10.1061/ajrua6.0000910

30. Huang P., Peng X., Gu M. Wind tunnel study on effects of various parapets on wind load of a flat-roofed low-rise building // *Advances in Structural Engineering*. 2017. Vol. 20. Issue 12. Pp. 1907–1919. DOI: 10.1177/1369433217700425

Поступила в редакцию 10 ноября 2018 г.

Принята в доработанном виде 1 декабря 2018 г.

Одобрена для публикации 28 декабря 2018 г.

О Б А В Т О Р А Х : Поддаева Ольга Игоревна — кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой физики и строительной аэродинамики, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, PoddaevaOI@gmail.com;

Егорычев Олег Олегович — научный сотрудник учебно-научно-производственной лаборатории аэродинамических и аэроакустических испытаний строительных конструкций, **Национальный исследовательский**

Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, EgorichevOleg@mgsu.ru;

Нагорнова Жанна Ивановна — студентка, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, nagornova_zhanna10@mail.ru.

INTRODUCTION

At the design stage of any construction object, in addition to issues related to the construction and architecture, it is necessary to assess its impact on the environment, and this applies to both the environmental impact assessment of the development area and the impact assessment on the existing building structures located in the immediate vicinity of the development site [1, 2]. Dimensions of the designed structure play one of the most important roles [3]. Indeed, the larger the new building, the greater the impact it will have on such characteristics as insolation and the distribution of wind flows in the territory of the considered buildings [4–6].

Wind is one of the deciding factors when designing a new building^{3, 4}. Neglect of studies of wind exposure can cause many negative consequences [7, 8], including the destruction of the structure as a whole, or its individual parts [9]. If there are significant changes in the environment in which the building is located (spot building, demolition of existing objects, etc.), the influence of wind also changes on it [10], and the results of determining wind load made at the design stage will lose their relevance. This circumstance speaks of the need to study changes in the distribution of wind flows in the territory of existing urban areas in the dotted construction of high-rise buildings in them [11, 12].

The educational, research and production laboratory for aerodynamic and aeroacoustic testing of building structures of the Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU) is one of the three Russian research centers with wind tunnels specializing in testing building structures [13–15].

Aerodynamic studies in the construction industry are not limited to determining the parameters of the wind load on a specific designed object, it also allows to evaluate the dynamics of the impact of wind flow on existing buildings during construction and demolition of individual objects in its territory [16]. Modern specialized wind tunnels reproduce the natural air flow [17, 18], in order to study its effect on building models created according to the methods of the theory of similarity of physical phenomena, such as the aerody-

namic resistance of a building, the pressure on a building caused by air flow, the comfort of a person near the building under study [19, 20], etc.

MATERIALS AND METHODS

The situation, which was taken to study this problem, is a classic task with a group of houses of various shapes [21], complicated by the presence of an additional high-rise structure (fig. 1). The investigated building is in the form of a circle.

Fig. 1. Project of a residential complex

Models of the investigated buildings and high-rise buildings were made of wood (fig. 2). This choice can be justified by simplicity and convenience when creating a model [22, 23]. Also, the selected material provides the necessary rigidity to the model as a whole.

During the tests, several situations were investigated:

1. In the first case, the original building situation was investigated, without the influence of a high-rise building (situation 1, fig. 3, *a*).
2. In the second case, the high-rise building was placed in the building center (situation 2, fig. 3, *b*).
3. In the third, the high-rise building was located near the building, but did not go inside the circle formed by it (situation 3, fig. 3, *c*).

For the experiment, the MADT wind tunnel was used at NRU MGSU. The model is fixed in the working area of the MADT on a specialized rotary base (fig. 4).

Inside the models were placed 20 pressure sensors. To do this, holes were made in certain places, and the sensors were rigidly fixed near each of them, on the inside of the models. The sensors were connected

³ SP 20.13330.2016. Load and impact. Updated version of SNiP 2.01.07-85*.

⁴ MDS 20-1.2006. Temporary recommendations on the appointment of loads and impacts acting on multifunctional high-rise buildings and complexes in Moscow. Moscow, FSUE "SIC" Construction Publ., 2006; 27.

Fig. 2. Models of surrounding buildings

Fig. 3. The layout of the building and high-rise building

Fig. 4. Fastening the model in the working area of the wind tunnel

to a computer using plastic cables, with a polling frequency of 1000 Hz.

The speed of the wind flow during the experiments is 15 m/s. This speed allows us to talk about the achievement of critical speeds in Reynolds numbers [24] and, accordingly, the similarity of air flow according to the theory of self-similarity according to Reynolds [25–27]. The tests were carried out for 8 angles of attack of the stream (in 45° steps).

RESULTS

After the experiment and data analysis, the results were tabulated and plotted for ease of analysis and drawing conclusions. The pressure obtained from the sensors is converted to the dimensionless values of the aerodynamic coefficient by the formula [28–30]:

$$C_p = \frac{p}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2}, \quad (1)$$

where C_p — aerodynamic pressure coefficient; p — pressure at the point on the model, Pa; v — flow rate, m/s; ρ — air density, kg/m³.

The following table shows the experimental data for some sensors for all angles of attack of the air flow (only the data of specific sensors were taken into account, their numbers are shown in the tables, and marked in green in fig. 3, a). Sensors 1, 3 and 11 were chosen to analyze the situation when the sensor is outside the building, in its center and on the roof of one of the buildings. Table 1 shows the maximum aerodynamic coefficient at the corresponding point.

These results confirm a small difference in the values on sensor 1, which is located outside the building (fig. 5).

At the same time, on sensor number 3 (fig. 6) can be seen a large difference in the aerodynamic coefficient, which is almost 300 %, between the sit. 1 and sit. 3 and more than 400 % between sit. 1 and sit. 2.

Table 1. The maximum value of the aerodynamic coefficient

Angle	Sensor No. 1			Sensor No. 3			Sensor No. 11		
	Sit. 1	Sit. 2	Sit. 3	Sit. 1	Sit. 2	Sit. 3	Sit. 1	Sit. 2	Sit. 3
0	-0.262	-0.147	-0.310	0.261	0.074	1.396	-0.325	0.122	0.087
45	0.085	0.126	0.076	0.280	0.185	1.512	-0.131	-0.056	-0.097
90	0.457	0.526	0.469	0.331	0.179	1.871	-0.349	-0.300	-0.292
135	0.095	0.531	0.566	0.525	0.404	2.149	-0.252	-0.248	-0.162
180	0.086	0.062	0.116	0.769	1.558	2.074	-0.141	-0.095	-0.134
225	-0.328	-0.420	-0.331	0.544	0.164	1.634	-0.141	-0.250	-0.125
270	-0.083	-0.079	-0.098	0.543	0.188	1.584	-0.215	-0.226	-0.181
315	-0.117	-0.056	-0.355	0.356	0.021	1.071	-0.083	-0.083	-0.307

Fig. 5. The dependence of the maximum value of the aerodynamic pressure coefficient on the angle of the flow (sensor number 1): sit. 1 — green line; sit. 2 — red line; sit. 3 — blue line

Fig. 6. The dependence of the maximum value of the aerodynamic pressure coefficient on the angle of the flow (sensor number 3): sit. 1 — green line; sit. 2 — red line; sit. 3 — blue line

Fig. 7. The dependence of the maximum value of the aerodynamic pressure coefficient on the angle of the flow (sensor number 11): sit. 1 — green line; sit. 2 — red line; sit. 3 — blue line

On the sensor number 11 (fig. 7) noticeable difference in aerodynamic coefficient between the sit. 1 and sit. 3 at an angle of 225° and 0°, and between the sit. 1 and sit. 2 at an angle of 225° and 315°.

CONCLUSIONS

Building in a dense urban environment is a common phenomenon in the modern world. The influence

of the surrounding space on the construction preparation is taken into account at the object design stage. One of the most important criteria for the design of a high-rise building is the assessment of the wind load and the impact of both it and the surrounding buildings.

As can be seen from the results of the experiment, for the angle of attack of a wind flow of 0° on sensor No. 3, which is located near the building center, an increase in the aerodynamic coefficient is observed by 300 % between the first and third situations (fig. 3, a, c) and 400 % between and the second situations (fig. 3, a, b). If the sensor is located on the roof of the model, the difference in the value of the aerodynamic

coefficient is less noticeable (about 30 % between the first and second situations). If the sensor is located outside the building, the differences will be insignificant (2 % between the first and second, and 10 % of the first and third situations).

Based on the results obtained, it can be concluded that the study of the consequences of the construction of a new building on the aeration of the urban development area should always be carried out in the case of high-rise buildings. The results of such studies, in relation to specific cases, should also be conclusions about the desirability of making adjustments to existing urban development.

REFERENCES

1. Simiu E., Scanlan R.H. *Wind effects on structures: an introduction to wind engineering*. Wiley, 1978; 458.
2. Retter E.I. *Architectural and building aerodynamics*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984; 294. (rus.).
3. Yi Lia, Li Q.S., Fubin Chen. Wind tunnel study of wind-induced torques on L-shaped tall buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2017; 167:41-50. DOI: 10.1016/j.jweia.2017.04.013
4. Solovov S.Yu. Aerodynamic Stability of the Long-Span Bridges. *Transport of the Russian Federation*. 2016; 5:47-50. (rus.).
5. Lugovcov A.N., Fomin G.M. Experience in modeling in self-oscillating wind tunnels of high structures. *TsAGI Science Journal*. 1973; 3:151-159.
6. Pan H., Xie Z., Xu A., Zhang L. Wind effects on Shenzhen Zhuoyue Century Center: Field measurement and wind tunnel test. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2017; 26(13):e1376. DOI: 10.1002/tal.1376
7. Sicot C., Deliancourt F., Boree J., Aguinaga S., Bouchet J.-P. Representativeness of geometrical details during wind tunnel tests. Application to train aerodynamics in crosswind conditions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2018; 177:186-196. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.01.040
8. Snaebjornsson J.T. Full- and model scale study of wind effects on a medium-rise building in a built up area. *Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (Norway), ProQuest Dissertations Publishing*. 2002; 812073.
9. Poddaeva O.I., Kubenin A.S., Churin P.S. *Architectural and building aerodynamics: a tutorial*. Moscow, MGSU Publ., 2017; 86. (rus.).
10. Poddaeva O.I., Dunichkin I.V. Architectural-building aerodynamics. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2017; 12:6(105):602-609. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.6.602-609 (rus.).
11. Ntinis G.K., Dados I.N., Shen X., Malamataris N.A., Fragos V.P., Zhang G. Characteristics of unsteady flow around two successive rectangular ribs on floor of a wind tunnel. *European Journal of Mechanics — B/Fluids*. 2017; 65:450-458. DOI: 10.1016/j.euro-mechflu.2017.01.018
12. Guvernyuk S.V., Egorychev O.O., Isaev S.A., Kornev N.V., Poddaeva O.I. Numerical and physical simulation of wind influence on group of high-altitude buildings. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2011; 3:185-191. (rus.).
13. Fedosova A.N., Churin P.S., Pomelov V.Yu. Experimental research method of extended structures aerodynamics. *The national association of scholars*. 2015; 15:1(15):116-119. (rus.).
14. Churin P.S., Poddaeva O.I., Egorychev O.O. Designing mock-ups of unique buildings and structures in experimental aerodynamics. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2014; 5:332-335. (rus.).
15. Egorychev O.O., Churin P.S., Poddaeva O.I. Experimental study of ForceMoment wind loads on high-rise buildings. *Industrial and Civil Construction*. 2014; 9:28-30. (rus.).
16. Agerneh Dagnew. Computational evaluation of wind loads on low- and high- rise buildings. *Florida International University, ProQuest Dissertations Publishing*. 2012. DOI: 10.25148/etd.fi12111904
17. Gorlin S.M. *Experimental aeromechanics*. Moscow, High school Publ., 1970; 423. (rus.).
18. Barlow J., Rae W., Pope A. *Low-Speed wind tunnel testing*. 3 ed. Wiley-Interscience, 1999; 728.
19. Tse K.T., Weerasuriya A.U., Kwok K.C.S. Simulation of twisted wind flows in a boundary layer wind tunnel for pedestrian-level wind tunnel tests. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2016; 159:99-109. DOI: 10.1016/j.jweia.2016.10.010
20. Rotruck S.N. Design, construction, and qualification of the West Virginia university environmental

wind tunnel. *West Virginia University, ProQuest Dissertations Publishing*. 2016; 10146644.

21. Khalid M., Juhany K.A., Hafez S. Computational modeling of the flow in a wind tunnel. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 2018; 90(1):175-185. DOI: 10.1108/aeat-05-2016-0072

22. Haritonov A.M. *Technique and methods of aerophysical experiment. Part 1. Aerodynamic pipes and gas dynamic installations*. Novosibirsk, NSTU Publ., 2005; 220. (rus.).

23. Haritonov A.M. *Technique and methods of aerophysical experiment. Part 2. Methods and means of aerophysical measurements*. Novosibirsk, NSTU Publ., 2007; 456. (rus.).

24. Warsido W.P. Reducing uncertainties in estimation of wind effects on tall buildings using aerodynamic wind tunnel tests. *Florida International University, ProQuest Dissertations Publishing*. 2013. DOI: 10.25148/etd.fi13080914

25. Babich E.M., Rewinkel J.-P., Filipchyk S.V. An experimental determination of the wind load acting on the roof structure of the Magdeburg stadium. *Bulletin of the Belarusian-Russian University*. 2014; 1(42):126-135. (rus.).

26. Amoroso S., Hebert K., Levitan M. Wind tunnel tests for mean wind loads on partially clad structures. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2010; 98(12):689-700. DOI: 10.1016/j.jweia.2009.08.009

27. Yan Li, Zhengliang Li, Bowen Yan, Zhi-tao Yan. Wind forces on circular steel tubular lattice structures with inclined leg Members. *Engineering Structures*. 2017; 153:254-263. DOI: 10.1016/j.eng-struct.2017.10.032

28. Bedrzhickij E.L., Dubov B.S., Radcig A.N. *Theory and practice of aerodynamic experiment*. Moscow, MAI Publ., 1990; 216. (rus.).

29. Simiu E., Pintar A.L., Duthinh D., Yeo D. Wind load factors for use in the wind tunnel procedure. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*. 2018; 3(4):04017007. DOI: 10.1061/ajrua6.0000910

30. Huang P., Peng X., Gu M. Wind tunnel study on effects of various parapets on wind load of a flat-roofed low-rise building. *Advances in Structural Engineering*. 2017; 20(12):1907-1919. DOI: 10.1177/1369433217700425

Received November 10, 2018

Adopted in a modified form on December 1, 2018

Approved for publication December 28, 2018

ABOUT THE AUTHORS: **Olga I. Poddaeva** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Physics and Building Aerodynamics, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, PoddaevaOI@gmail.com;

Oleg O. Egorychev — research fellow of the training, research and production laboratory of aerodynamic and aeroacoustic tests of building structures, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, EgorychevOleg@mgsu.ru;

Zhanna I. Nagornova — student, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, nagornova_zhanna10@mail.ru.