

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК 69.036:533.6.07+536.24

DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-4-65-73

А.И. ГНЫРЯ¹, С.В. КОРОБКОВ¹, А.А. КОШИН¹, В.И. ТЕРЕХОВ²,

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет,

²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК ПРИ ОБТЕКАНИИ ВОЗДУШНЫМ ПОТОКОМ СИСТЕМЫ МОДЕЛЕЙ ЗДАНИЙ ПРИ ВАРИАЦИИ ИХ РАСПОЛОЖЕНИЯ*

Целью исследования является изучение изменения коэффициентов давления на поверхностях граней модели высотного здания под воздействием вихревых потоков, создаваемых препятствием с аналогичными геометрическими параметрами при его поперечном смещении от продольной оси канала.

Взаимодействие нескольких зданий и влияние их местоположения на интерференцию воздушных потоков остается малоизученным. Сложный трехмерный характер отрывных потоков, и особенно процесс их интерференции при обтекании системы преград, существенно снижают возможности методов численного моделирования аэродинамики. Основным инструментом изучения аэродинамических характеристик при обтекании воздушным потоком группы высотных и повышенной этажности зданий является экспериментальное исследование на установках, моделирующих реальные условия ветрового воздействия на здания.

Здания и сооружения представляют собой плохообтекаемые тела, имеют разные формы и, как правило, встречаются в виде квадратных призм. В связи с этим были выбраны модели зданий с соотношением сторон $H/a = 3$ и 6 . Размер поперечного сечения призм был неизменным и равным $a = 50$ мм. Выбор формы сечения и определяющего размера моделей позволяет распространить экспериментальные данные по давлению на широкий круг не только зданий, но и на многие другие конструкции подобной формы.

В основе экспериментов заложено физическое моделирование системы исследуемых моделей зданий на основе теории подобия. Основным предметом исследования является установление зависимости изменения коэффициентов давления при поперечном смещении моделей относительно продольной оси канала рабочей камеры, принятое с шагом 25 мм и обозначенное отношением $L2/a$. Принятый диапазон смещений $L2/a = 0,5; 1; 1,5; 2$.

Система моделей зданий состоит из двух квадратных призм (модель + препятствие) с геометрическими размерами $50 \times 50 \times 150$ мм и $50 \times 50 \times 300$ мм ($H/a = 3$ и 6 соответственно). Принятый скоростной режим воздушного потока соответствует числу Рейнольдса $Re = 4,25 \cdot 10^4$. Угол атаки воздушного потока – 0° . Расстояния между моделями в следе соответствуют принятому диапазону продольного перемещения $L1/a = 1,5; 3$ и 6 .

* Исследования, выполненные в ИТ СО РАН, поддерживались за счет средств РНФ (грант № 18-19-00161), а работы сотрудников ТГАСУ – РФФИ (грант № 18-08-01025).

Результаты исследований, экспериментальные данные:

1. Установлен характер взаимодействия системы моделей зданий в потоке воздуха.
2. Определена зона наименьшей ветровой нагрузки на позадистоящую (подветренную) модель № 2.
3. Описано влияние первичного и вторичного отрывов воздушного потока на степень разрежения по боковым граням модели № 2 в зависимости от начального расстояния между моделями.
4. Установлено, что при выходе подветренной модели № 2 из следа впередистоящей призмы происходит рост коэффициента лобового сопротивления.
5. Установлено, что при продольном удалении моделей $L1/a = 6$ выход подветренной модели № 2 из следа впередистоящей модели № 1 приводит к появлению дополнительных продольных и поперечных усилий. Таким образом, изменение направления ветра в значительной мере оказывает раскачивающее действия на подветренную модель № 2.
6. При большом поперечном смещении $L2/a > 2,0$ картина обтекания второй призмы приближается к картине обтекания впередистоящей призмы или одиночной призмы. При этом отчетливо обнаруживаются те же режимы течения, что и при обтекании потоком воздуха одиночно стоящей призмы.

Результаты исследований могут быть использованы при определении динамических нагрузок на поверхностях зданий и сооружений, при проектировании естественной и искусственной вентиляции зданий, навесных фасадов, светопрозрачных конструкций большой протяженности, а также для обеспечения безопасной работы в процессе возведения высотных зданий.

Полученные результаты являются наиболее важными с точки зрения получения новых знаний об аэродинамике высотных зданий в условиях городской застройки и совершенствования методов и подходов к расчету несущих и ограждающих конструкций зданий, находящихся в сложных аэродинамических условиях.

Ключевые слова: строительная аэродинамика; физическое моделирование; поля статического давления; коэффициент давления; модели зданий.

Для цитирования: Гныря А.И., Коробков С.В., Кошин А.А., Терехов В.И. Моделирование ветровых нагрузок при обтекании воздушным потоком системы моделей зданий при вариации их расположения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 4. С. 65–73.

A.I. GNYRYA¹, S.V. KOROBKOV¹, A.A. KOSHIN¹, V.I. TEREKHOV²,

¹Tomsk State University of Architecture and Building,

²Kutateladze Institute of Thermal Physics SB RAS

SIMULATION OF WIND-INDUCED AIRFLOW ROUND BUILDING MODELS WITH DIFFERENT ARRANGEMENT

Purpose: The aim of this work is to study the variation in the pressure coefficients on the surface of the high-rise building model caused by turbulent currents created by the barrier with the similar geometrical parameters at longitudinal displacement. **Methodology/approach:** Aerodynamic parameters are experimentally investigated in specific conditions which simulate the real wind pressure applied to building models. Square prisms with the relative heights of 3 and 6 are selected for the models. Experiments are based on physical modeling of buildings using the dimensional analysis. Research focuses on the determination of dependence between the pressure coefficients at a lateral displacement of models relative to the longitudinal axis of the wind tunnel. **Research findings:** The following characteristics and processes are identified: the interaction between building models within the airflow; the area of the lowest wind pressure on the downwind model; the effect from the first and second airflow separations on air rarefaction along the model sides depending on the initial distance between models; the in-

crease in the drag coefficient when the downstream model is left by the vortices formed by the front model; additional longitudinal and transverse forces when the downstream model is left by the vortices formed by the front model due to their longitudinal displacement; almost similar airflows round the second and the first models at a large transverse displacement. **Practical implications:** Research results can be readily used in calculations of dynamic loads on the building surfaces, engineering of natural and artificial ventilation systems, suspended facades, extensive translucent structures, and also for safe operation of high-rise buildings. The choice of the form of section and size of models allows using the obtained data on pressure not only in building construction, but also in other structures of the similar shape. **Value:** The obtained results represent new knowledge about aerodynamics of high-rise buildings and improving methods of and approaches to the structural analysis of building walls under complicated aerodynamic conditions.

Keywords: aerodynamics; physical modeling; static pressure field; pressure coefficient; building model.

For citation: Gnyrya A.I., Korobkov S.V., Koshin A.A., Terekhov V.I. Modelirovanie vetrovykh nagruzok pri obtekanii vozdushnym potokom sistemy modelei zdanii pri variatsii ikh raspolozheniya [Simulation of wind-induced airflow round building models with different arrangement]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2018. V. 20. No. 4. Pp. 65–73. (rus)

Введение

Актуальность темы исследования обусловлена увеличением темпов строительства в России зданий повышенной этажности. Одновременно с этим плотность застройки городских кварталов увеличивается. Современные методы расчета в полной мере позволяют определить воздействия ветра на несущие и ограждающие конструкции, однако особенности аэродинамики и теплообмена зданий, находящихся в условиях плотной городской застройки, исследованы недостаточно. Наиболее качественным показателем в данном вопросе послужила степень интерференции воздушных потоков, вызывающих ветровые нагрузки. В рамках настоящей работы рассматривался тандем из двух моделей квадратных призм при исследовании динамической интерференции при различных взаимных их расположениях в потоке воздуха.

Анализ литературных источников свидетельствует о значительном прогрессе в данной области, достигнутом большим числом научных школ как у нас в стране, так и за рубежом [1–11].

Изложенные в настоящей публикации результаты являются продолжением комплексных экспериментальных исследований аэродинамики моделей системы зданий при вариации их формы и расположения.

Целью исследования является изучение изменения коэффициентов давления на поверхностях граней модели здания под воздействием вихревых потоков, создаваемых препятствием с аналогичными геометрическими параметрами при его поперечном смещении от продольной оси канала [12–15].

Постановка задачи, опытная установка и методика эксперимента

Экспериментальные модели для изучения ветрового давления представляли собой квадратные призмы со стороной $a = 50$ мм и относительной высотой $H/a = 3$ и 6 (рис. 1).

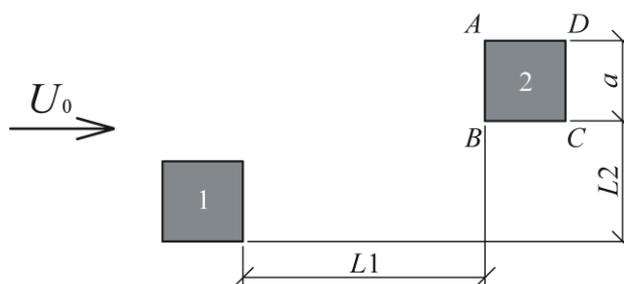


Рис. 1. Схема расположения системы моделей зданий:

U_0 – направление и скорость воздушного потока; 1 – впередистоящее препятствие; 2 – исследуемая модель

Для измерения коэффициентов давления при вариации взаимного расположения призм в тандеме в рабочую камеру аэродинамической трубы устанавливались две модели: первая – впередистоящая (препятствие) и вторая – измерительная. Расстояние между моделями изменялось в двух направлениях: продольном – ($L1/a = 1,5; 3$ и 6) и поперечном ($L2/a =$ от 0 до $3,0$ с интервалом $0,5$).

Скорость воздушного потока соответствует числу Рейнольдса $Re = 4,25 \cdot 10^4$. Угол атаки воздушного потока – 0° .

Опыты были проведены в аэродинамической трубе открытого типа, работающей на всасывание (рис. 2). Описание экспериментальной установки, конструкция моделей и методика проведения экспериментов приведены в работе [15].



Рис. 2. Общий вид аэродинамического стенда

Схема расположения горизонтальных и вертикальных сечений исследуемой модели № 2 с относительной высотой $H/a = 3$ и 6 представлена на рис. 3.

Коэффициент давления рассчитывался по формуле

$$C_p = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2}(\rho U_0^2)}, \quad (1)$$

где p и p_0 – статическое давление в рассматриваемой точке поверхности и окружающей среды (на стенке аэродинамической трубы в месте установки модели) соответственно, Па; ρ – плотность набегающего потока, кг/м³; U_0 – скорость набегающего потока, м/с.

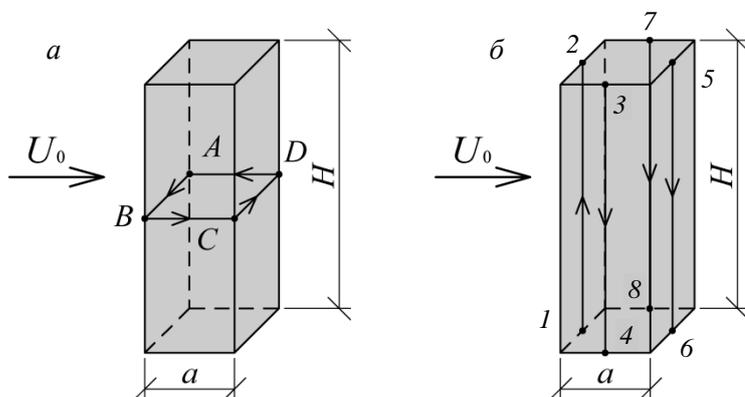


Рис. 3. Схема горизонтальных и вертикальных сечений исследуемой модели № 2 с относительной высотой $H/a = 3$ и б:
 а – по ширине модели (ABCD); б – по высоте модели (1–8)

Регистрация распределения перепада давления производилась на групповом многоканальном наклонном микроманометре с 28 трубками, показания которых фиксировались на фотокамеру с дальнейшей обработкой на компьютере. Максимальная неопределенность измерения не превышала 5 Па.

Обсуждение результатов исследований

Аэродинамика тандема двух квадратных призм при наличии поперечного смещения $L2/a$ имеет ряд особенностей, не характерных при их осевом расположении. При малом смещении $L2/a = 0,5$ (рис. 4, а) изменение потока наблюдается непосредственно за моделью № 1 в виде отклонения зоны вторичного отрыва перед моделью № 2 и вихревой дорожки за ней. Грань (D–A) попадает в след модели № 1, в то время как грань (B–C) оказывается под воздействием вторичного отрыва, сформированного ребром B.

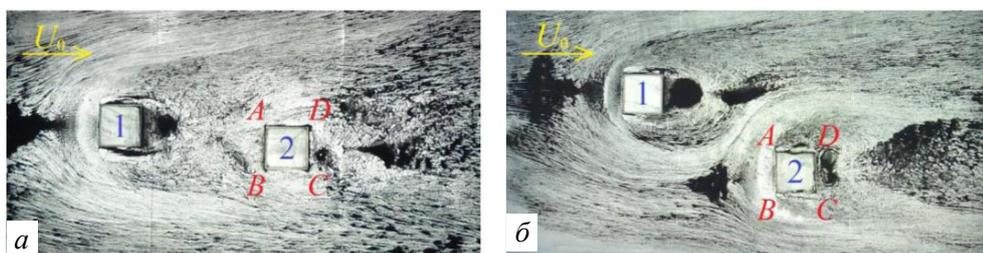


Рис. 4. Картина обтекания двух призм, смещенных в поперечном направлении: $L1/a = 3$, $\varphi = 0^\circ$, $Re = 4,25 \cdot 10^4$:
 а – $L2/a = 0,5$; б – $L2/a = 2,0$

По мере увеличения смещения $L2/a > 2,0$ (рис. 4, б) модель № 2 гранью ($A-B$) входит в зону действия первичного отрыва, и разделение потока становится более явным. Вихревая дорожка в следе модели № 2 отклоняется в сторону ребра D , и здесь формируется мощная струя газа.

При большом смещении $L2/a > 2,0$ картина обтекания второй призмы приближается к картине обтекания впередистоящей призмы или одиночной призмы. При этом отчетливо обнаруживаются те же режимы течения, что и при обтекании потоком воздуха одиночно стоящей призмы.

Влияние поперечного смещения призмы в следе демонстрируется на рис. 5 для трех расстояний $L2/a$ между моделями.

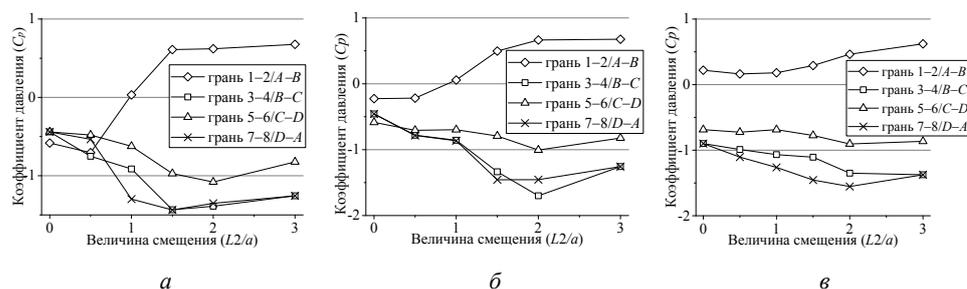


Рис. 5. Интегральный коэффициент давления по граням призмы № 2 в зависимости от ее поперечного смещения $L2/a$:
 $a - L1/a = 1,5$; $б - L1/a = 3,0$; $в - L1/a = 6,0$

Отметим общие тенденции поведения среднего давления каждой грани. На фронтальной грани ($A-B$) вследствие выхода модели № 2 из аэродинамической тени давление возрастает по мере увеличения смещения $L2/a$. Темп его нарастания определяется расстоянием $L1/a$ между призмами. На двух боковых ($B-C$) и ($D-A$), а также на кормовой ($C-D$) грани, наоборот, давление понижается по мере смещения призм относительно друг друга, и большая часть их поверхности находится под разрежением. Отмеченные особенности являются важными при оценке ветровых нагрузок на тандем призм с различным их расположением на поверхности.

Заключение

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Впервые изучена структура течения и распределение коэффициентов давления при обтекании тандема квадратных призм при расположении их со смещением в поперечном направлении.

2. Установлено существенное различие в характере обтекания и распределении коэффициентов давления наружной поверхности тандема квадратных призм при изменении расстояния между ними $L1/a = 1,5-6$ и $L1/a = 0-3,0$.

3. Определена зона наименьшей ветровой нагрузки на позади стоящую (подветренную) модель № 2. Для двух призм, расположенных в тандеме, ми-

нимальная ветровая нагрузка достигается в диапазоне $L1/a = 1,5-2$ при их осном расположении и $L2/a \sim 1$ в поперечно смещенном тандеме.

4. Установлено, что при выходе модели № 2 из следа впередстоящей модели № 1 наблюдается возрастание коэффициента лобового сопротивления.

5. При поперечном смещении $L2/a > 2,0$ картина обтекания модели № 2 приближается к картине обтекания впередстоящей модели № 1 или одиночной призмы. При этом отчетливо обнаруживаются те же режимы течения, что и при обтекании потоком воздуха одиночно стоящей модели.

Полученные результаты являются наиболее важными с точки зрения получения новых знаний об аэродинамике зданий повышенной этажности в условиях городской застройки и совершенствования методов и подходов к расчету несущих и ограждающих конструкций зданий, находящихся в сложных аэродинамических условиях.

Результаты исследований могут быть использованы при определении динамических нагрузок на поверхностях зданий и сооружений, при проектировании естественной и искусственной вентиляции зданий, навесных фасадов, светопрозрачных конструкций большой протяженности, а также для обеспечения безопасной работы в процессе возведения высотных зданий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Симу Э., Скэнлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения. М.: Стройиздат, 1984. 360 с.
2. Лозинский Э.А. Ветровой подпор от высотного здания в условиях уплотнения существующей жилой застройки // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). 2011. № 2 (30). С. 129–137.
3. Леденев П.В., Синявин А.А. Экспериментальное исследование ветрового давления при обтекании тандема двух зданий // Вестник МГСУ. 2011. Т. 1. № 3. С. 377–382.
4. 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. Т. 1. № 3. С. 185–191.
5. Табунчиков Ю.А., Ефремов М.Н. Аэродинамика застройки и зданий // АВОК. 2015. № 4. С. 48–55.
6. Савицкий Г.А. Ветровая нагрузка на сооружения. М.: Изд-во литературы по строительству, 1972. 110 с.
7. Дубинский С.И. Численное моделирование ветровых воздействий на высотные здания и комплексы: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МГСУ, 2010. 23 с.
8. Гувернюк С.В., Исаев С.А., Егорычев О.О., Поддаева О.И., Корнев Н.В., Усачев А.Е. Вычислительная аэродинамика строительных сооружений. Задачи и методы // Вестник МГСУ. 2011. Т. 2. № 2. С. 113–119.
9. Гагарин В.Г., Гувернюк С.В., Леденев П.В. Аэродинамические характеристики здания для расчета ветрового воздействия на ограждающие конструкции // Жилищное строительство. 2010. № 1. С. 7–10.
10. Дорошенко С.А., Дорошенко А.В., Орехов Г.В. Определение ветровой нагрузки на трехмерные конструкции с помощью моделирования в аэродинамической трубе // Вестник МГСУ. 2012. № 7. С. 69–74.
11. Igarashi T. Characteristics of the flow around a square prism // Bulletin of JSME. 1984. V. 27. № 231. P. 1858–1865.
12. Кошин А.А. Анализ динамического воздействия воздушного потока на тандем моделей высотных зданий // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 2. С. 134–141.

13. Кошин А.А., Коробков С.В., Гныря А.И., Терехов В.И. Моделирование вихревой структуры и ветровых нагрузок при нелинейном расположении двух квадратных призм // XXXI Сибирский теплофизический семинар, посвященный 100-летию со дня рождения академика С.С. Катугеладзе: сб. докл. Всеросс. конф., Новосибирск, 17–19 ноября 2014 г. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2014. С. 78–84.
14. Гныря А.И., Коробков С.В., Мокшин Д.И., Кошин А.А., Терехов В.И. Ветровое давление в тандеме моделей зданий при их нелинейном расположении // Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий: мат. научн. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 24–26 марта 2015 г. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2015. С. 71–74.
15. Gnyrya A.I., Korobkov S.V., Koshin A.A., Terekhov V.I. Physical simulation of wind pressure on building models at various arrangement and airflow conditions // Proceedings of the IV International research conference «Information technologies in Science, Management, Social sphere and Medicine» (ITSMSSM 2017). Published by Atlantis Press, 2017. V. 72. P. 389–392.

REFERENCES

1. Simiu E., Scanlan R. Vozdeistvie vetra na zdaniya i sooruzheniya [Wind loading on structures]. Moscow: Stroyizdat, 1984. 360 p. (rus)
2. Lozinskiy E.A. Vetrovoi podpor ot vysotnogo zdaniya v usloviyakh uplotneniya sushchestvuyushchei zhiloi zastroiki [Wind support for high-rise building in restrained urban conditions]. *Zhurnal naukovikh prats' (galuzeve mashinobudovannyya, budivnitstvo)*. 2011. No. 2 (30). Pp. 129–137. (rus)
3. Ledenev P.V., Sinyavin A.A. Eksperimental'noe issledovanie vetrovogo davleniya pri obtekanii tandema dvukh zdanii [Experimental study of wind pressure on building tandem in airflow conditions]. *Vestnik MGSU*. 2011. V. 1. No. 3. Pp. 377–382. (rus)
4. Guvernyuk S.V., Egorychev O.O., Isaev S.A., Kornev N.V., Poddaeva O.I. Chislennoe i fizicheskoe modelirovanie vetrovogo vozdeistviya na gruppu vysotnykh zdanii [Numerical and physical modeling of wind effects on high-rise buildings]. *Vestnik MGSU*. 2011. V. 1. No. 3. Pp. 185–191. (rus)
5. Tabunshchikov Yu.A., Efremov M.N. Aerodinamika zastroiki i zdanii [Aerodynamics of housing and buildings]. *Heating, Ventilation, Air Conditioning, District Heating, Building Physics Journal*. 2015. No. 4. Pp.48–55. (rus)
6. Savitskii G.A. Vetrovaya nagruzka na sooruzheniya [Wind loads on structures]. Moscow: Stroyizdat, 1972. 110 p. (rus)
7. Dubinskiy S.I. Chislennoe modelirovanie vetrovykh vozdeistvii na vysotnye zdaniya i kompleksy: avtoref. dis. ... kand. tekhn. Nauk [Numerical simulation of wind pressure on high-rise buildings and building systems complex. PhD Abstract]. Moscow: MGSU, 2010. 23 p. (rus)
8. Guvernyuk S.V., Isaev S.A., Egorychev O.O., Poddaeva O.I., Kornev N.V., Usachev A.E. Vychislitel'naya aerodinamika stroitel'nykh sooruzhenii. Zadachi i metody [Computational aerodynamics of buildings. Objectives and methods]. *Vestnik MGSU*. 2011. V. 2. No. 2. Pp. 113–119. (rus)
9. Gagarin V.G., Guvernyuk S.V., Ledenev P.V. Aerodinamicheskie kharakteristiki zdaniya dlya rascheta vetrovogo vozdeistviya na ograzhdayushchie konstruktsii [Aerodynamic characteristics of building for calculating wind effect on wall structures]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2010. No. 1. Pp. 7–10. (rus)
10. Doroshenko S.A., Doroshenko A.V., Orekhov G.V. Opredelenie vetrovoi nagruzki na trekhmernye konstruktsii s pomoshch'yu modelirovaniya v aerodinamicheskoi trube [Simulation of wind load on three-dimensional structures in wind tunnel]. *Vestnik MGSU*. 2012. No. 7. Pp. 69–74. (rus)
11. Igarashi T. Characteristics of the flow around a square prism. *Bulletin of JSME*. 1984. V. 27. No. 231 Pp. 1858–1865.
12. Koshin A.A. Analiz dinamicheskogo vozdeistviya vozdushnogo potoka na tandem modelei vysotnykh zdanii [Analysis of airflow dynamic impact on tandem-arranged high-rise building model]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 2. Pp. 134–141. (rus)

13. *Koshin A.A., Korobkov S.V., Gnyrya A.I., Terekhov V.I.* Modelirovanie vikhrevoi struktury i vetrovykh nagruzok pri nelineinom raspolozhenii dvukh kvadratnykh prizm [Simulation of vortex structure and wind loads on nonlinearly positioned two square prisms]. XXXI Sibirskii teplofizicheskii seminar, posvyashchennyi 100-letiyu so dnya rozhdeniya akademika S.S. Kutateladze: sbornik dokladov Vserossiiskoi konferentsii (*Proc. All-Russ. Sci. Conf.*). 2014. Pp. 78–84. (rus)
14. *Gnyrya A.I., Korobkov S.V., Mokshin D.I., Koshin A.A., Terekhov V.I.* Vetrovoe davlenie v tandeme modelei zdaniy pri ikh nelineinom raspolozhenii [Wind pressure on nonlinearly tandem-arranged building models]. *Energo- i resursoeffektivnost' maloetazhnykh zhilykh zdaniy: materialy nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem (Proc. Int. Sci. Conf. "Energy and Resource Efficiency of Low-Rise Buildings")*. 2015. Pp. 71–74. (rus)
15. *Gnyrya A.I., Korobkov S.V., Koshin A.A., Terekhov V.I.* Physical simulation of wind pressure on building models at various arrangement and airflow conditions. *Proc. 4th Int. Sci. Conf. "Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine"*. 2017. V. 72. Pp. 389–392.

Сведения об авторах

Гныря Алексей Игнатьевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, tsp_tgasu@mail.ru

Коробков Сергей Викторович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, korobkov@hotmail.ru

Кошин Антон Александрович, ст. преподаватель, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, dawghood@mail.ru

Терехов Виктор Иванович, докт. техн. наук, профессор, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, terekhov@itp.nsc.ru

Authors Details

Aleksey I. Gnyrya, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, tsp_tgasu@mail.ru

Sergey V. Korobkov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, korobkov@hotmail.ru

Anton A. Koshin, Senior Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, dawghood@mail.ru

Viktor I. Terekhov, DSc, Professor, Kutateladze Institute of Thermal Physics SB RAS, 1, Academician Lavrent'ev Str., 630090, Novosibirsk, Russia, terekhov@itp.nsc.ru