

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

УДК 69.036:533.6.07+536.24

DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-5-138-150

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

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет,

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

ДИНАМИЧЕСКАЯ И ТЕПЛОВАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ В СИСТЕМЕ ИЗ ДВУХ МОДЕЛЕЙ ЗДАНИЙ*

Рассмотрены явления тепловой и динамической интерференции, возникающей при обтекании потоком воздуха двух моделей зданий в виде квадратных призм, расположенных на малом удалении друг от друга. Выделены общие особенности, установлены зависимости из изменений взаимного расположения, отмечены характерные явления, вызванные взаимодействием потоков.

Цель данных исследований заключается в экспериментальном изучении динамической и тепловой интерференции тандема из двух моделей зданий в виде квадратных призм в зависимости от их взаимного расположения.

За последние годы мировой наукой накоплена обширная база знаний о воздействиях ветра на объекты различной формы, такие как призмы, пирамиды, цилиндры и т. п. В каждом из этих случаев движение воздуха имело уникальные отличительные особенности. Аналогичным образом выполнялись исследования и для группы объектов на предмет их взаимного влияния на изменение как ветровых нагрузок, так и теплообмена. Рассматривалось их взаимное влияние на движение воздуха и его турбулизацию.

Можно выделить два основных направления в исследовании ветрового воздействия. Первое – это воздействие ветра как силовая нагрузка на здание, второе – движение ветра является источником конвективного теплообмена здания.

Предметом исследования являются параметры интерференции, позволяющие оценить степень влияния на поле давления и теплоотдачи возмущений, вносимых впереди расположенными преградами.

На первом этапе были изготовлены физические модели для исследования полей давления на различных гранях и коэффициентов локального и среднего теплообмена в условиях вынужденной конвекции. Следующим шагом стало совместное рассмотрение ветровой (динамической) нагрузки и тепловых потоков, попытки обнаружить общие черты в изменениях в зависимости от взаимного расположения моделей. Все эксперименты были выполнены на аэродинамическом стенде кафедры «Технология строительного производства» ТГАСУ.

В результате проведенных исследований показано, что коэффициенты динамической и тепловой интерференции при обтекании двух призм в следе друг за другом сильно различаются между собой. При этом тепловая интерференция оказывается весьма консервативной по сравнению с динамической. С использованием параметров интерференции можно легко проанализировать значения экстремальных давлений и тепловых по-

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

токов на поверхности моделей в зависимости от большого числа факторов, в том числе и их взаимного расположения.

Ключевые слова: динамическая и тепловая интерференция; физическое моделирование; модели зданий.

Для цитирования: Коробков С.В., Гныря А.И., Терехов В.И. Динамическая и тепловая интерференция в системе из двух моделей зданий // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 5. С. 138–150.

DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-5-138-150

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

¹Tomsk State University of Architecture and Building,

²Kutateladze Institute of Thermal Physics SB RAS

DYNAMIC AND THERMAL INTERFERENCE EFFECTS ON TWO NEIGHBOURING BUILDING MODELS

The paper considers the dynamic and thermal interference effects on two neighbouring building models in the form of square prisms arranged at a short distance from each other. It is shown how relative positions of the models affect the specific phenomena caused by the air-flow interactions.

The aim of this paper is to experimentally study the dynamic and thermal interference of a tandem of two building models in the form of square prisms depending on their relative position.

The phenomenon of wind loads on buildings and structures has always attracted great interest among engineers and researchers. With the accumulation of knowledge and technical capabilities, the potential for likely ways to study wind flows and their impact on different objects increased. In recent years, the world science has accumulated an extensive knowledge base on wind impacts on objects of various shapes, such as prisms, pyramids, cylinders, etc. Studies are carried out for their mutual impact of several objects on changes in both the wind load and heat exchange. Their mutual effect on the air motion and turbulence is considered.

There are two main areas in the field of the wind impact. The first impact is the force load on building, the second is the wind as a source of convective heat exchange. The object of this study is the interference parameters allowing to assess the influence on the field of pressure and heat recoil of disturbances evoked in front of the barriers.

At the first stage, physical models help to study the pressure field on different facets and ratios of the local and medium heat exchange under the forced convection conditions. The next step is to jointly consider the wind (dynamic) load and heat flows, attempting to detect the total contribution to changes depending on the reciprocal model arrangement. All experiments are performed in the aerodynamic tube, at the TSUAB department. It is shown that the dynamic and thermal interference ratios vary greatly in two building models. At the same time, the thermal interference is very conservative compared to the dynamic. Using the interference parameters, it is easy to analyze the extreme pressure and the heat flow on the model surface depending on a large number of factors, including their arrangement.

Keywords: dynamic and thermal interference; physical modeling; building model.

For citation: Korobkov S.V., Gnyrya A.I., Terekhov V.I. Dinamicheskaya i teplovaya interferentsiya v sisteme iz dvukh modelei zdanii [Dynamic and thermal interference effects on two neighbouring building models]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2019. V. 21. No. 5. Pp. 138–150.

DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-5-138-150

Введение

В России все большее внимание уделяется строительству высотных зданий и зданий повышенной этажности. Преимущество этих зданий заключается в большом количестве полезной площади, приходящейся на квадратный метр участка застройки. Таким образом удается наиболее компактно расположить жилые и рабочие площади в городской черте. Здание – это сложный организм, где должны быть взаимоувязаны все проектные и конструктивные решения. В России пока недостаточно опыта проектирования и длительной эксплуатации высотных зданий и зданий повышенной этажности. В связи с этим открывается широкий горизонт новых исследований, посвященных строительству подобных сооружений с учетом характерных для России природно-климатических условий.

Одним из наиболее успешных методов исследования параметров зданий является метод физического моделирования. Экспериментальный способ зарекомендовал себя как наиболее достоверный, т. к. по сравнению с численными измерениями полностью исключается человеческий фактор, влияющий на точность заданных параметров. Существенным недостатком является необходимость создания точных и нередко сложных по конструкции моделей и наличия крупного и дорогостоящего оборудования.

При проектировании здания необходимо учитывать множество факторов. Одним из наиболее важных факторов является воздействие ветра.

Явление ветровых нагрузок на здания и сооружения всегда вызывало большой интерес у инженеров и исследователей. С накоплением знаний и технических возможностей возрастал потенциал вероятных способов изучения ветровых потоков и их влияния на различные объекты. За последние годы мировой наукой накоплена обширная база знаний о воздействиях ветра на объекты различной формы, такие как призмы, пирамиды, цилиндры и т. п. В каждом из этих случаев движение воздуха имело уникальные отличительные особенности. Аналогичным образом выполнялись исследования и для группы объектов на предмет их взаимного влияния на изменение как ветровых нагрузок, так и теплообмена. Рассматривалось их взаимное влияние на движение воздуха и его турбулизацию.

Можно выделить два основных направления в исследовании ветрового воздействия. Первое – это воздействие ветра как силовой нагрузки на здание. Ветровая нагрузка представляет собой комплексное воздействие, вызывающее множество явлений, таких как статическая нагрузка, которая делится на давление и разрежение, динамическая нагрузка, включающая в себя пульсации потока, приводящие к колебательным движениям исследуемого предмета, и многие другие. Второе – движение ветра является источником конвективного теплообмена здания. Здесь также существует множество направлений исследования, среди которых можно выделить тепловые потери объектов и тепловой обмен между несколькими объектами.

Явление интерференции отрывных потоков как показатель наиболее полно характеризует изменения динамического воздействия воздушного потока и интенсивности теплопередачи при расположении изучаемой модели

в следе за возмущающей преградой. Параметр интерференции позволяет оценить степень влияния на поле давления и теплоотдачи возмущений, вносимых впереди расположенными преградами.

Экспериментальным изучением явления интерференции при обтекании воздушным потоком ансамбля из двух и более моделей высотных зданий занимаются как зарубежные [1–16], так и российские [17–20] ученые. В последнее время появилось много работ, посвященных численному моделированию эффекта интерференции [21–29]. Работы [30–32] направлены на численное и экспериментальное моделирование явления интерференции отрывных потоков.

Многочисленные результаты экспериментов, накопленные в последние годы, а также сравнение с результатами других авторов позволили выделить общие тенденции поведения коэффициентов интерференции.

Установлено, что интерференция воздушных потоков, формирующихся вблизи группы зданий, оказывает значительное влияние как на теплопотери, так и на ветровые нагрузки, которые, в свою очередь, влияют на внутренний микроклимат в здании, на его эксплуатационные характеристики, а также на безопасность его строительства.

Установление прямой зависимости теплопотерь от ветрового давления остается сложной и многофакторной задачей, одним из решений которой является анализ и сравнение динамической и тепловой интерференций, рассчитанных на основании систематических экспериментальных исследований.

Цель данных исследований заключается в экспериментальном изучении динамической и тепловой интерференции тандема из двух квадратных призм в зависимости от их взаимного расположения.

Постановка задачи, опытная установка и методика эксперимента

Задачи исследования были сформулированы на основе накопленных материалов исследования ветровых нагрузок и конвективного теплообмена.

На первом этапе были изготовлены модели для исследования полей давления на различных гранях и коэффициентов локального и среднего теплообмена в условиях вынужденной конвекции. Следующим шагом стало совместное рассмотрение ветровой (динамической) нагрузки и тепловых потоков, попытки обнаружить общие черты в изменениях в зависимости от взаимного расположения моделей. Ввиду большого объема данных экспериментов [33–36] в настоящей статье приводятся результаты экспериментов при следующих условиях:

1. Модели квадратных призм с относительной высотой к поперечному размеру $H/a = 6$, где $a = 50$ мм – размер поперечного сечения квадратной призмы.

2. Призмы расположены на одной оси по отношению к набегающему потоку воздуха (рис. 1).

3. Диапазон продольных расстояний (калибр) принимал значения $L1/a = 0,5; 1; 1,5; 3; 4,5$ и 6.

Способ конечной обработки и анализа результатов был избран исходя из необходимости сравнения величин, идентичных по своим характеристикам. Исходный вид показателей давления-разрежения (C_p) и теплоотдачи (Nu)

не позволял объективно сравнивать зависимости изменения этих показателей по причине отличия единиц измерения. На этом основании было принято решение использовать показатель интерференции динамических и тепловых взаимодействий моделей (IF):

$$IF(Cp) = \frac{Cp}{Cp_0} \quad IF(Nu) = \frac{Nu}{Nu_0}, \quad (1)$$

где Cp и Nu – среднее значение коэффициента давления и числа Нуссельта на одной из граней подветренной модели (2), Cp_0 и Nu_0 – среднее значение коэффициента давления и числа Нуссельта на всей поверхности впереди стоящей модели (1).

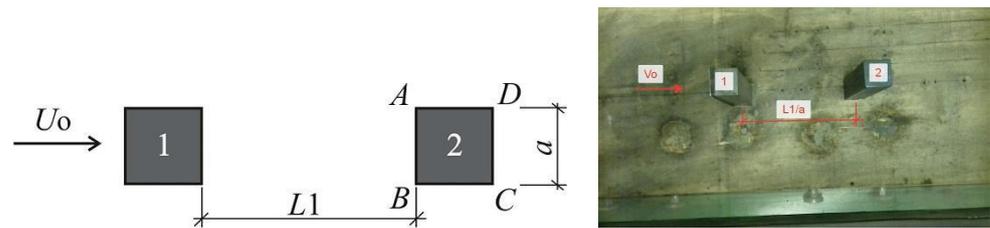


Рис. 1. Общий вид моделей в плане при расположении на одной оси в рабочей камере аэродинамической трубы:

1 – модель-препятствие; 2 – исследуемая модель; $a = 50$ мм; U_0 – скорость воздушного потока; $L1$ – продольное смещение



Рис. 2. Общий вид конструкции исследуемых моделей:

a – модель для измерения давления; *б* – модель для измерения коэффициентов теплоотдачи

Эксперименты проводились с двумя отличающимися по конструкции моделями призматической формы. На одной из граней модели для измерения давления были выполнены каналы, по которым ветровой поток регистрировался посредством многоканального дифференциального микроманометра. Модель для измерения коэффициента теплоотдачи обладала гранью с системой термопар, расположенных в аналогичных точках (рис. 2).

Измерения полей статического давления и коэффициентов теплоотдачи, а также исследование структуры движения воздушного потока производились в специальном аэродинамическом стенде. Стенд состоит из следующих узлов: аэродинамической трубы; дифференциального многоканального микроманометра, созданного для регистрации изменения коэффициента по образующей модели; исследуемых моделей.

Аэродинамическая труба описываемого стенда представляет собой трубу разомкнутого типа, работающую на

всасывание (рис. 3). Диапазон скоростей в рабочей камере составляет 1–30 м/с с интенсивностью турбулентного потока $Tu = 0,5\%$.

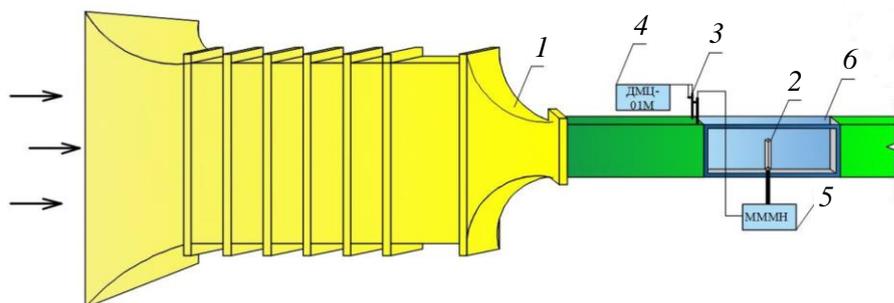


Рис. 3. Общий вид конструкции аэродинамического стенда:

1 – аэродинамическая труба; 2 – измерительная модель; 3 – трубка Пито; 4 – дифференциальный манометр цифровой ДМЦ-01М; 5 – многоканальный микроманометр наклонный МММН; 6 – рабочая камера трубы

Рабочая камера аэродинамической трубы представляет собой канал длиной 1200 мм и сечением $400 \times 400 \text{ мм}^2$. На одной из боковых стенок предусмотрены два окна, выполненные из органического стекла, одно располагается на одной из боковых стенок для монтажа моделей, второе, расположенное непосредственно над моделью, предназначено для визуального наблюдения. Корпус камеры стальной.

Измерительные приборы вводятся в рабочую камеру через проем, расположенный в нижней стенке канала. Проем, в свою очередь, уплотняется с помощью фторопластовой ленты. Отводные трубы соединены с осевым шахтным вентилятором марки ВО-5У2 мощностью 7,5 кВт. Изменение скорости потока воздуха осуществлялось системой регулирования оборотов при помощи частотного преобразователя. Профиль скорости в ядре потока был равномерным, а толщина пограничного слоя к месту установки моделей составляла $\sim 20 \text{ мм}$.

Воздух в аэродинамическую трубу подавался из окружающей среды через лабораторные помещения, поэтому температура его в процессе эксперимента была достаточно стабильной и составляла $\sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Для изменения перепада давления был изготовлен дифференциальный многоканальный микроманометр с ценой деления 1 мм водяного столба. Показания с многоканального микроманометра снимались с помощью цифрового фотоаппарата, далее показания с фотографий оцифровывались по специальной программе Get Data Graph Digitizer. В качестве опорной величины было взято статическое давление в канале для невозмущенного течения.

Нагрев поверхности в тепловой модели осуществлялся нихромовой спиралью, через которую пропускался электрический ток. На одной из граней, покрытой пластиной из нержавеющей стали толщиной 1,0 мм, были зачеканены термпары. Тепловое граничное условие на ней соответствовало режиму постоянства теплового потока $q = \text{const}$. Для уменьшения перетечек тепла

вдоль модели был сделан ряд прорезей, как это показано на рис. 2, б. Для измерения теплоотдачи на других гранях модель последовательно поворачивалась на требуемые углы.

В результате измерений были получены распределения коэффициентов давления и коэффициентов теплопередачи (на основании которых были рассчитаны числа Нуссельта). Динамическая составляющая ветрового потока, помимо средних значений, позволила установить максимальные и минимальные значения результирующих показателей. Таким образом, величины интерференции были рассчитаны не только исходя из средних значений C_p и Nu , но и из предельных максимальных и минимальных величин.

Обсуждение результатов исследований

В первую очередь для эффективного анализа следовало сгруппировать графики по граням и типам измерений (динамические и тепловые). Вторым этапом шел индивидуальный анализ средних, максимальных и минимальных значений. Третьим шагом стал взаимный анализ динамической и тепловой интерференции и влияние на нее параметров расстояния ($L1/a$) и угла атаки. Рассмотрим полученные результаты.

По лобовой грани $A-B$ модели 2, как это следует из рис. 4, коэффициент динамической интерференции (рис. 4, а) сильно зависит от взаимного положения моделей. Для минимальных значений коэффициента давления (C_p) интерференция в среднем выше, чем их средняя (интегральная) или максимальная величина. Объясняется это, прежде всего, интенсивностью воздействия зоны разряжения, сформированной впереди стоящей моделью. Наибольшее значение интерференции наблюдается при относительном расстоянии $L1/a = 4,5$, где измерительная модель находится под действием замыкающегося подковообразного вихря [13].

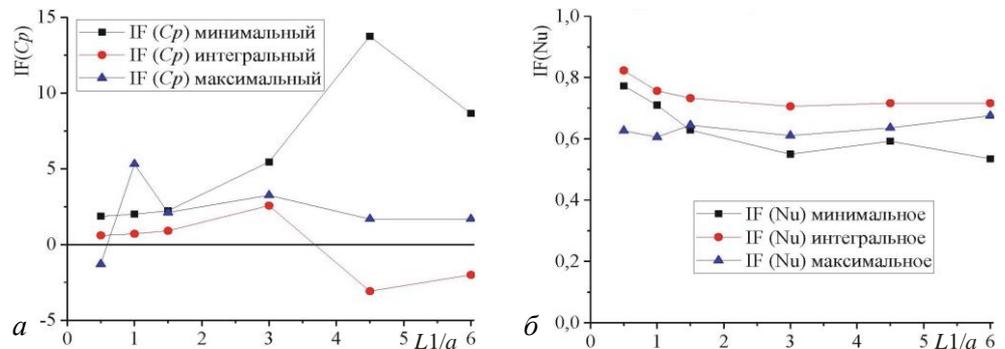


Рис. 4. Распределение коэффициентов динамической (а) и тепловой (б) интерференции по лобовой грани $A-B$ модели 2

Тепловая интерференция (рис. 4, б) в отличие от динамической в меньшей степени зависит от расстояния между моделями $L1/a$. Причем их средние, максимальные и минимальные значения не столь сильно различаются между собой. Наибольшие величины $IF(Nu)$ достигаются для интегрального значения параметра интерференции.

Динамическая интерференция по боковым граням $B-C$ и $D-A$ (рис. 5, a) модели 2 обладает большей интенсивностью при $L1/a = 0,5 \dots 3$. Вызвано это действием ускоренного потока вдоль граней модели. При $L1/a = 3 \dots \infty$ действие потока снижено.

Тепловая интерференция (рис. 5, b) сохраняет постоянные значения при всех наблюдаемых $L1/a$. Максимальные значения $IF(Nu)$ в большинстве случаев совпадают с интегральными.

По кормовой грани $C-D$ (рис. 6) модели 2 интерференция в меньшей степени зависит от $L1/a$ и практически не претерпевает каких-либо изменений. Следует отметить лишь скачок динамической интерференции (рис. 6, a) при $L1/a = 1,5$, когда на грань непосредственно действует вихревая зона, формируемая впереди стоящей моделью, усиливаемая отрывными течениями от ребер B и A .

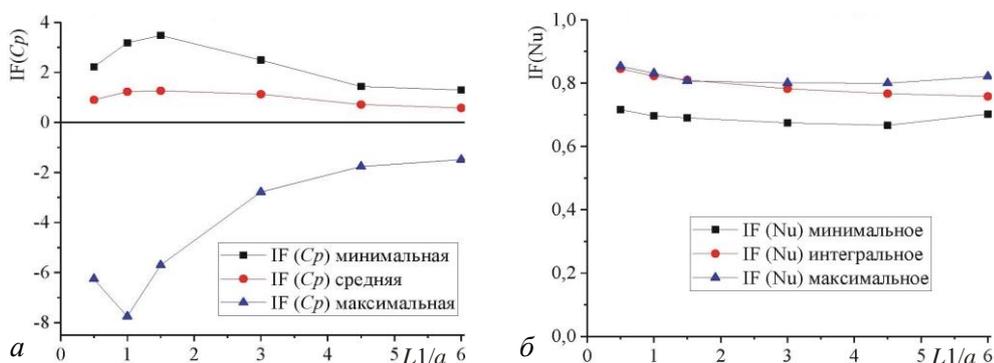


Рис. 5. Распределение коэффициентов динамической (a) и тепловой (b) интерференции по боковым граням $B-C/D-A$ модели 2

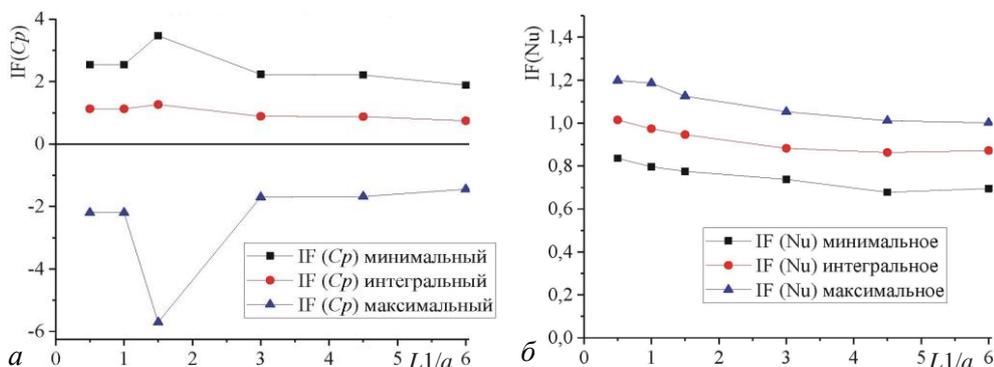


Рис. 6. Распределение коэффициентов динамической (a) и тепловой (b) интерференции по кормовой грани $C-D$ модели 2

Заключение

В результате проведенных исследований показано, что коэффициенты динамической и тепловой интерференции при обтекании двух призм в следе

друг за другом сильно различаются между собой. При этом тепловая интерференция оказывается весьма консервативной по сравнению с динамической. Наибольшие значения теплового параметра интерференции наблюдаются по кормовой грани $C-D$ в зоне вихреобразования за моделью.

Что касается особенностей динамической и тепловой интерференции, описанных выше, можно сделать вывод, что динамическая более подвержена изменениям в зависимости от расстояния. По грани $A-B$ – при $Ll/a > 3$, по прочим граням – при $Ll/a < 3$.

С использованием параметров интерференции можно легко проанализировать значения экстремальных давлений и тепловых потоков на поверхности моделей в зависимости от большого числа факторов, в том числе и их взаимного расположения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kim W., Tamura Y., Yoshida A. Interference effects on local peak pressures between two buildings // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2015. V. 147. P. 186–201.
2. Yu X.F., Xie Z.N., Zhu J.B., Gu M. Interference effects on wind pressure distribution between two high-rise buildings // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2015. V. 142. P. 188–197.
3. Yu X.F., Xie Z.N., Wang X., Ca B. Interference effects between two high-rise buildings on wind-induced torsion // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2016. V. 159. P. 123–133.
4. Yu X., Xie Z., Gu M. Interference effects between two tall buildings with different section sizes on wind-induced acceleration // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2018. V. 182. P. 16–26.
5. Hui Y., Yoshida A., Tamura Y. Interference effects between two rectangular-section high-rise buildings on local peak pressure coefficients // Journal of Fluids and Structures. 2013. V. 37. P. 120–133.
6. Hui Y., Tamura Y., Yang Q.S. Analysis of interference effects on torsional moment between two high-rise buildings based on pressure and flow field measurement // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2017. V. 164. P. 54–68.
7. Amin J.A., Ahuja A. Wind-induced mean interference effects between two closed spaced buildings // Journal of Civil Engineering. 2012. V. 16 (1). P. 119–131.
8. Gu M., Xie Z.-N. Interference effects of two and three super-tall buildings under wind action // Journal Acta Mechanica Sinica. 2011. V. 27(5). P. 687–696.
9. Lam K.M., Zhao J.G., Leung M.Y.H. Wind-induced loading and dynamic responses of a row of tall buildings under strong interference // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2011. V. 99. P. 573–583.
10. Zu G.B., Lam K.M. Across-wind excitation mechanism for interference of twin tall buildings in staggered arrangement // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2018. V. 177. P. 167–185.
11. Huang D., Zhu L., Ding Q., Zhu X., Chen W. Aeroelastic and aerodynamic interference effects on a high-rise building // Journal of Fluids and Structures. 2017. V. 69. P. 355–381.
12. Mara T.G., Terry B.K., Ho T.C.E., Isyumov N. Aerodynamic and peak response interference factors for an upstream square building of identical height // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2014. V. 133. P. 200–210.
13. Wonsul, K., Yukio, T., Akihito, Y. Interference effects on aerodynamic wind forces between two buildings // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2015. V. 147. P. 186–201.
14. Flaga A., Koco A., Klaput R., Bosak G. The environmental effects of aerodynamic interference between two closely positioned irregular high buildings // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2018. V. 180. P. 276–287.

15. *Pundhir R., Barde N.* Study of wind pressure on tall building due to change in relative position of interfering building // *International Journal of Civil Engineering Research*. 2016. V. 7. № 2. P. 105–115.
16. *Lau S.C., Cervantes J., Han J.C., Rudolph R.J., Flannery K.* Measurements of wall heat (mass) transfer for flow through blockages with round and square holes in a wide rectangular channel // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2003. V. 46. P. 3991–4001.
17. *Саленко С.Д., Обуховский А.Д., Гостеев Ю.А., Телкова Ю.В.* Исследование структуры течения в окрестности двух балок квадратного поперечного сечения в условиях интерференции // *Теплофизика и аэромеханика*. 2010. Т. 17. № 2. С. 313–323.
18. *Саленко С.Д., Однопал В.П., Обуховский А.Д., Гостеев Ю.А., Телкова Ю.В.* Аэродинамические исследования комплекса высотных зданий // *АВОК*. 2010. № 5. С. 62–66.
19. *Гузев А.С., Корнилов Д.В., Короткин А.И., Соловьев С.Ю.* Аэродинамические испытания высотных зданий и сооружений // *Высотные здания: журнал высотных технологий*. 2015. № 1. С. 102.
20. *Гузев А.С., Короткин А.И., Лебедев А.О., Роговой Ю.А.* Анализ некоторых результатов по определению аэродинамических характеристик высотных зданий // *Инженерно-строительный журнал*. 2009. № 3 (5). С. 50–52.
21. *Bairagi A.K., Dalui S.K.* Optimization of interference effects on high-rise buildings for different wind angle using CFD simulation // *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2014. V. 14. P. 39–49.
22. *Lankadasu A., Vengadesan S.* Interference effect of two equal-sized square cylinders in tandem arrangement: With planar shear flow // *International journal for numerical methods in fluids*. 2008. V. 57. P. 1005–1021.
23. *Yongfeng Qu, Maya Milliez, Luc Musson-Genon, Bertrand Carissimo.* Numerical study of the thermal effects of buildings on low-speed airflow taking into account 3D atmospheric radiation in urban canopy // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2012. V. 104–106. P. 474–483.
24. *Martinuzzi R., AbuOmar M., Savory E.* Scaling of the wall pressure field around surface-mounted pyramids and other bluff bodies // *Journal of Fluids Engineering*. 2007. V. 129. P. 1147–1156.
25. *Вальгер С.А., Фёдоров А.В., Фёдорова Н.Н.* Моделирование несжимаемых турбулентных течений в окрестности плохообтекаемых тел с использованием ПК ANSYS Fluent // *Вычислительные технологии*. 2013. Т. 18. № 5. С. 27–40.
26. *Исаев С.А., Баранов П.А., Жукова Ю.В., Терешкин А.А., Усачов А.Е.* Моделирование ветрового воздействия на ансамбль высотных зданий с помощью многоблочных вычислительных технологий // *Инженерно-физический журнал*. 2014. Т. 87. № 1. С. 107–118.
27. *Isaev S.A., Vatin N.I., Lebiga V.A., Zinoviev V.N., Chang K.-C., Miao J.-J.* Problems and methods of numerical and experimental investigation of high rise constructions' aerodynamics in the coastal region «sea-land» // *Magazine of Civil Engineering*. 2013. № 2. P. 54–61.
28. *Белостоцкий А.М., Дубинский С.И., Афанасьева И.Н.* Численное моделирование задач строительной аэродинамики. Разработка методик и исследования реальных объектов // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2010. Т. 6. № 1–2. С. 67–69.
29. *Гувернюк С.В., Синявин А.А., Гагарин В.Г.* Метод экспресс-оценки интегральных ветровых нагрузок на высотное здание // *Жилищное строительство*. 2019. № 6. С. 43–48.
30. *Covak L., Öztürk E., Balci M.N., Körpe S.B.* Numerical and experimental analysis of wind loads on cladding of tall buildings // *Proceedings of the 7th International conference of Heat transfer, Fluid mechanics and Thermodynamics*. 19–21 July 2010. Antalya. Turkey. P. 1709–1714.
31. *Pillai S.S., Yoshie R.* Experimental and numerical studies on convective heat transfer from various urban canopy configurations // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2012. V. 104–106. P. 447–454.
32. *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. №. 3–1. С. 185–191.

33. 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.
34. Мокишин Д.И. Экспериментальное исследование конвективного теплообмена моделей одиночных и тандемно расположенных зданий : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2015. 24 с.
35. Gnyrya A., Korobkov S., Koshin A., Terekhov V. Aerodynamic and thermal interference of turbulent separated flows over building models // MATEC Web of Conferences (STS-33). 2017. V. 115 (02002). P. 1–4.
36. 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.

REFERENCES

1. Kim W., Tamura Y., Yoshida A. Interference effects on local peak pressures between two buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2015. V. 147. Pp. 186–201.
2. Yu X.F., Xie Z.N., Zhu J.B., Gu M. Interference effects on wind pressure distribution between two high-rise buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2015. V. 142. Pp. 188–197.
3. Yu X.F., Xie Z.N., Wang X., Ca B. Interference effects between two high-rise buildings on wind-induced torsion. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2016. V. 159. Pp. 123–133.
4. Yu X., Xie Z., Gu M. Interference effects between two tall buildings with different section sizes on wind-induced acceleration. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2018. V. 182. Pp. 16–26.
5. Hui Y., Yoshida A., Tamura Y. Interference effects between two rectangular-section high-rise buildings on local peak pressure coefficients. *Journal of Fluids and Structures*. 2013. V. 37. Pp. 120–133.
6. Hui Y., Tamura Y., Yang Q.S. Analysis of interference effects on torsional moment between two high-rise buildings based on pressure and flow field measurement. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2017. V. 164. Pp. 54–68.
7. Amin J.A., Ahuja A. Wind-induced mean interference effects between two closed spaced buildings. *Journal of Civil Engineering*. 2012. V. 16 (1). Pp. 119–131.
8. Gu M., Xie Z.-N. Interference effects of two and three super-tall buildings under wind action. *Journal Acta Mechanica Sinica*. 2011. V. 27 (5). Pp. 687–696.
9. Lam K.M., Zhao J.G., Leung M.Y.H. Wind-induced loading and dynamic responses of a row of tall buildings under strong interference. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2011. V. 99. Pp. 573–583.
10. Zu G.B., Lam K.M. Across-wind excitation mechanism for interference of twin tall buildings in staggered arrangement. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2018. V. 177. Pp. 167–185.
11. Huang D., Zhu L., Ding Q., Zhu X., Chen W. Aeroelastic and aerodynamic interference effects on a high-rise building. *Journal of Fluids and Structures*. 2017. V. 69. Pp. 355–381.
12. Mara T.G., Terry B.K., Ho T.C.E., Isyumov N. Aerodynamic and peak response interference factors for an upstream square building of identical height. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2014. V. 133. Pp. 200–210.
13. Wonsul K., Yukio T., Akihito Y. Interference effects on aerodynamic wind forces between two buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2015. V. 147. Pp. 186–201.
14. Flaga A., Koco A., Klaput R., Bosak G. The environmental effects of aerodynamic interference between two closely positioned irregular high buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2018. V. 180. Pp. 276–287.

15. Pundhir R., Barde N. Study of wind pressure on tall building due to change in relative position of interfering building. *International Journal of Civil Engineering Research*. 2016. V. 7. No. 2. Pp. 105–115.
16. Lau S.C., Cervantes J., Han J.C., Rudolph R.J., Flannery K. Measurements of wall heat (mass) transfer for flow through blockages with round and square holes in a wide rectangular channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2003. V. 46. Pp. 3991–4001.
17. Salenko S.D., Obukhovskii A.D., Gosteev Yu.A., Telkova Yu.V. Issledovanie struktury techeniya v okrestnosti dvukh balok kvadratnogo poperechnogo secheniya v usloviyakh interferentsii [Flow structure investigation around two square cross-section beams under interference conditions]. *Teplofizika i aeromekhanika*. 2010. V. 17. No. 2. Pp. 313–323. (rus)
18. Salenko S.D., Odnopal V.P., Obukhovskii A.D., Gosteev Yu.A., Telkova Yu.V. Aerodinamicheskie issledovaniya kompleksa vysotnykh zdaniy [Aerodynamic studies of high-rise building system]. *AVOK*. 2010. No. 5. Pp. 62–66. (rus)
19. Guzeev A.S., Kornilov D.V., Korotkin A.I., Solov'ev S.Yu. Aerodinamicheskie ispytaniya vysotnykh zdaniy i sooruzheniy [Aerodynamic tests of high-rise buildings]. *Vysotnye zdaniya: zhurnal vysotnykh tekhnologii*. 2015. No. 1. P. 102. (rus)
20. Guzeev A.S., Korotkin A.I., Lebedev A.O., Rogovoi Yu.A. Analiz nekotorykh rezul'tatov po opredeleniyu aerodinamicheskikh kharakteristik vysotnykh zdaniy [Analysis of results to determine aerodynamic characteristics of high-rise buildings]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2009. No. 3(5). Pp. 50–52. (rus)
21. Bairagi A.K., Dalui S.K. Optimization of interference effects on high-rise buildings for different wind angle using CFD simulation. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2014. V. 14. Pp. 39–49.
22. Lankadasu A., Vengadesan S. Interference effect of two equal-sized square cylinders in tandem arrangement: With planar shear flow. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 2008. V. 57. Pp. 1005–1021.
23. Yongfeng Qu, Maya Milliez, Luc Musson-Genon, Bertrand Carissimo. Numerical study of the thermal effects of buildings on low-speed airflow taking into account 3D atmospheric radiation in urban canopy. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2012. V. 104–106. Pp. 474–483.
24. Martinuzzi R., AbuOmar M., Savory E. Scaling of the wall pressure field around surface-mounted pyramids and other bluff bodies. *Journal of Fluids Engineering*. 2007. V. 129. Pp. 1147–1156.
25. Val'ger S.A., Fedorov A.V., Federova N.N. Modelirovanie neshhimaemykh turbulentnykh techeniy v okrestnosti plokhooobtekaemykh tel s ispol'zovaniem PK ANSYS Fluent [Simulation of incompressible turbulent flows in the vicinity of poorly streamlined bodies using ANSYS Fluent PC]. *Vychislitel'nye tekhnologii*. 2013. V. 18. No. 5. Pp. 27–40. (rus)
26. Isaev S.A., Baranov P.A., Zhukova Yu.V., Tereshkin A.A., Usachov A.E. Modelirovanie vetrovogo vozdeistviya na ansambl' vysotnykh zdaniy s pomoshch'yu mnogoblochnykh vychislitel'nykh tekhnologii [Simulation of wind effect on of high-rise building ensemble using multi-block computational technologies]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2014. V. 87. No. 1. Pp. 107–118. (rus)
27. Isaev S.A., Vatin N.I., Lebiga V.A., Zinoviev V.N., Chang K.-C., Miao J.-J. Problems and methods of numerical and experimental investigation of high rise constructions' aerodynamics in the coastal region 'sea-land'. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. No. 2. Pp. 54–61.
28. Belostotskii A.M., Dubinskii S.I., Afanas'eva I.N. Chislennoe modelirovanie zadach stroitel'noi aerodinamiki. Razrabotka metodik i issledovaniya real'nykh ob'ektov [Numerical simulation in civil aerodynamics. Development of methodology and studies of real objects]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2010. V. 6. No. 1–2. Pp. 67–69. (rus)
29. Guvern'yuk S.V., Sinyavin A.A., Gagarin V.G. Metod ekspress-otsenki integral'nykh vetrovykh nagruzok na vysotnoe zdanie [Express train-estimation of integral wind loads on high-rise building]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2019. No. 6. Pp. 43–48. (rus)
30. Covak L., Öztürk E., Balci M.N., Körpe S.B. Numerical and experimental analysis of wind loads on cladding of tall buildings. *Proc. 7th Int. Conf. of Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*. 19–21 July 2010. Antalya. Turkey. Pp. 1709–1714.

31. Pillai S.S., Yoshie R. Experimental and numerical studies on convective heat transfer from various urban canopy configurations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2012. V. 104–106. Pp. 447–454.
32. Guvernyuk S.V., Egorychev O.O., Isaev S.A., Kornev N.V., Poddaeva O.I. Chislennoe i fizicheskoe modelirovanie vetrovogo vozdeistviya na gruppu vysotnykh zdaniy [Numerical and physical simulation of wind influence on group of high-rise buildings]. *Vestnik MGSU*. 2011. No. 3-1. Pp. 185–191. (rus)
33. 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.
34. Mokshin D.I. Eksperimental'noe issledovanie konvektivnogo teploobmena modelei odnochnykh i tandemno raspolozhennykh zdaniy [Convective heat exchange of single and tandem-arranged models. PhD Thesis]. Tomsk: TSUAB, 2015. 24 p. (rus)
35. Gnyrya A., Korobkov S., Koshin A., Terekhov V. Aerodynamic and thermal interference of turbulent separated flows over building models. *MATEC Web of Conferences (STS-33)*. 2017. V. 115 (02002). Pp. 1–4.
36. Gnyrya A.I., Korobkov S.V., Koshin A.A., Terekhov V.I. Modelirovanie vetrovykh nagruzok pri obtekanii vozдушnym potokom sistemy modelei zdaniy 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)

Сведения об авторах

Коробков Сергей Викторович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, korobkov_1973@mail.ru

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

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

Authors Details

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

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

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