

АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНАЯ АЭРОДИНАМИКА

О.И. Поддаева, И.В. Дуничкин

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

АННОТАЦИЯ. Дана краткая историческая справка о формировании архитектурно-строительной аэродинамики как отдельной отрасли строительной науки. Перечислены основные методы и подходы к решению задач архитектурно-строительной аэродинамики, а также выполнена классификация задач аэродинамики строительных конструкций по исследуемым объектам и кратко указаны основные особенности исследований по выбранным направлениям.

Целью работы является систематизация существующих подходов к оценке ветрового воздействия на строительные конструкции с учетом современных международных требований, а также выбор оптимального метода решения данной проблемы применительно к различным строительным конструкциям.

Описано, что в настоящее время исследование ветрового воздействия особенно актуально для высотных зданий и сооружений, строительных конструкций, восприимчивых к динамическим нагрузкам (большепролетные мостовые конструкции, мачты, тонкостенные трубы и др.), а также для жилых микрорайонов с плотной городской застройкой. Для вышеперечисленных объектов проведение аэродинамических исследований на этапе проектирования является необходимым и напрямую связанным с вопросами надежности и безопасности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: аэродинамика строительных конструкций, аэродинамические трубы, моделирование ветровых воздействий, пограничный слой, аэродинамические коэффициенты, ветровая нагрузка

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Поддаева О.И., Дуничкин И.В. Архитектурно-строительная аэродинамика // Вестник МГСУ. 2017. Вып. 12. № 6 (105). С. 602–609. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.6.602-609

ARCHITECTURAL-BUILDING AERODYNAMICS

O.I. Poddaeva, I.V. Dunichkin

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

ABSTRACT. This article gives a brief historical digression about the formation of architectural and building aerodynamics as a separate branch of the construction science. The main methods and approaches to the solution of problems of architectural and building aerodynamics are listed; the classification of problems of aerodynamics of structural steel according to the studied objects is given; main peculiarities of the research in selected areas are briefly indicated.

The aim of the work is to systematize existing approaches to assessing wind impact on structural steel taking into account some modern international requirements, as well as to choose the optimal method for solving this problem in relation to various structural steel.

It is established that, currently, the study about wind impact is especially important for high-rise buildings, structures, and structural steel nonresistant to dynamic loads (long span bridge conduits, gins polarized, thin-shell tubes, etc.), as well as for residential estates with restrained urban conditions. It is necessary to carry-out these aerodynamic studies at the designing stage for the above objects because it is directly related to the issues of reliability and safety.

KEY WORDS: aerodynamics of structural steel, wind tunnels, wind exposure simulation, boundary layer, aerodynamic coefficients, gust load.

FOR CITATION: Poddaeva O.I., Dunichkin I.V. Arkhitekturno-stroitel'naya aerodinamika [Architectural-Building Aerodynamics]. Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 6 (105), pp. 602–609. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.6.602-609

Архитектурно-строительная аэродинамика — раздел аэродинамики в котором изучаются законы движения воздуха и силы, возникающие на поверхности строительных конструкций, относительно которых происходит его движение. В настоящее время вопросы архитектурно-строительной динамики, а именно расчета ветровой нагрузки на здания и сооружения, являются одними из наиболее актуальных для строителей и проектировщиков по

всему миру. Это связано в первую очередь с переходом от строительства типовых объектов к уникальным и высотным зданиям и сооружениям со сложными искривленными пространственными конфигурациями, а также использованием современных конструкционных материалов, конструкции из которых являются особо восприимчивыми к динамическому, в т.ч. ветровому, воздействию (рис. 1, 2). Кроме того, за последние десятилетия из-

менился сам подход к проектированию: если ранее проектировщики ориентировались на повышенный запас прочности конструкции, то в настоящее время современные технологии позволяют с достаточной долей точности и достоверности моделировать ветровое воздействие и рассчитывать необходимое значение ветровой нагрузки.

Термин *аэродинамика* в первую очередь ассоциируется с проблемами аэрокосмической и военной промышленности. Не случайно первые экспериментальные установки, аэродинамические трубы для моделирования ветрового воздействия, предназначались именно для исследования самолетов и артиллерийских снарядов. Исследования в области аэродинамики летательных аппаратов проводятся с конца XIX века. Аэродинамикой строительных конструкций ученые начали заниматься лишь с середины XX века, в 1934 и 1935 гг. Уоттерс Пагон опубликовал первые работы, в которых проанализировал и систематизировал имеющиеся знания по аэродинамике гражданских зданий и сооружений [1]. В 1950 году Теодор фон Карман провел лекцию о приложениях и аспектах аэродинамики в инженерном секторе [2]. В 1961 году Американское общество гражданских инженеров собрало шесть статей, предлагающих первое внедренное впоследствии в практику описание воздействий ветровых нагрузок на здания [3]. В том же году Алан Давенпорт опубликовал работу, в которой приводились

основы метеорологии, микрометеорологии, климатологии, аэродинамики, строительной механики и теории вероятности, где впервые была собрана однородная модель поведения здания под действием ветровых нагрузок [4].

В МГСУ еще в 60-х годах была основана отечественная научная школа архитектурно-строительной аэродинамики. Основные труды в ее основе были выполнены в это и последующее время профессором Эгоном Ивановичем Реттером [5–6]. Он работал на кафедре архитектуры гражданских и промышленных зданий и сформировал несколько направлений исследовательской работы как в области физических экспериментов, так и в сфере создания и развития эмпирических методов расчета аэродинамики зданий и сооружений. На основании обобщения результатов многочисленных испытаний, проведенных как в аэродинамической трубе, так и на натуре, Реттером был предложен алгоритм расчета ветрового режима в застройке. Его методика была проверена на расчетах аэрационного режима разных микрорайонов Н.В. Тимофеевым при выполнении исследовательской работы в МГСУ (бывшем МИСИ). Эти расчеты позволили уточнить ряд коэффициентов, входящих в расчетные формулы, и установить границы ее применения. Таким образом в МГСУ была сформирована крупнейшая отечественная научная школа архитектурно-строительной аэродинамики [7].



Рис. 1. Будущий вращающийся небоскреб в Дубае



Рис. 2. Комплекс Ванцин Сохо, Пекин

Существуют три основных метода расчета ветровой нагрузки на строительные конструкции:

- аналитический метод;
- экспериментальное моделирование;
- численное моделирование.

Аналитический метод предполагает использование расчетных методик, приведенных в профильных нормативных документах, а также справочных данных по значениям различных коэффициентов¹. Данный метод используется для зданий и сооружений типовой формы, аэродинамические коэффициенты для таких конструкций известны и проведения дополнительных исследований для их уточнения не требуется.

Для уникальных строительных конструкций, форма которых значительно отличается от примитивов, рассматриваемых в нормативных документах, норматив регламентирует проведение экспериментальных исследований в специализированных аэродинамических трубах.

Создание потока, обтекающего модель здания или сооружения в аэродинамической трубе, где исследуется обтекание газом неподвижно закрепленных моделей, — основной и наиболее распространенный метод аэродинамического экспериментального исследования. Одно из его достоинств — возможность испытания моделей сложной формы, устанавливаемых под любым углом к на-

правлению скорости потока. Кроме того, в аэродинамической трубе можно получить большую продолжительность установившегося режима обтекания модели, что дает возможность использовать разнообразные методы измерения и выполнять всесторонние исследования. Моделирование турбулентной структуры реальных ветровых режимов, включая вертикальный градиент средней скорости ветра и энергетический спектр ее пульсационной составляющей, как правило, может быть выполнено только в специализированных аэродинамических трубах архитектурно-строительного типа с длинной рабочей частью (не менее 15 м). Здесь структура потока соответствует так называемой пристеночной турбулентности и формируется за счет тех же механизмов, что и в натуральных условиях, т.е. в результате взаимодействия с подстилающей поверхностью (полем) трубы и за счет обтекания, расположенных на ней элементов шероховатости (рис. 3). Меняя их размеры и взаимное расположение, можно получать различные градиентные потоки, в т.ч. и соответствующие местностям типов А, В и С (по классификации вышеупомянутого стандарта). Кроме того, при проведении экспериментального моделирования ветрового воздействия для уникальных зданий со сложной пространственной формой кровельного покрытия дополнительно проводится моделирование процессов снегопереноса и снегоотложений.

¹ СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*.

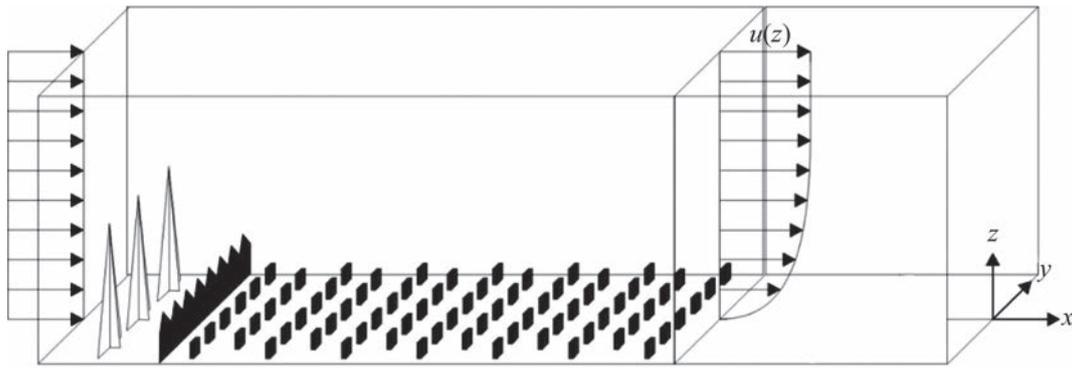


Рис. 3. Формирование потока в рабочей зоне аэродинамической трубы

Численное моделирование аэродинамики — наиболее молодой и активно развивающийся в настоящее время метод (рис. 4). Это связано прежде всего с бурным ростом возможностей вычислительной техники, позволяющим реализовывать на практике математические модели, адекватно отражающие сложные физические процессы обтекания различных элементов строительных конструкций. Данный метод позволяет существенно дополнить и расширить результаты экспериментального моделирования, а в некоторых ситуациях — даже частично его заменить. Тем не менее, проведение исследований исключительно методом численного моделирования на данном этапе его развития может лишь сопровождать эксперимент в аэродинамических трубах, поскольку принимаемая расчетная модель в каждом конкретном случае нуждается в верификации с экспериментом. Однако применение численного моделирования совместно с физическим может значительно уменьшить трудоемкость работы².



Рис. 4. Численное моделирование ветрового воздействия в программном комплексе ANSYS

² ГОСТ Р 56728-2015. Здания и сооружения. Методика определения ветровых нагрузок на ограждающие конструкции.

Учитывая недостатки методик численного моделирования, а также высокую трудоемкость, продолжительные сроки и высокую стоимость проведения экспериментального моделирования, наиболее оптимальным в настоящее время является комбинированный метод оценки ветрового воздействия на уникальные строительные конструкции. Применение данного метода позволяет наиболее эффективно использовать преимущества указанных методов и получать наиболее полные и достоверные результаты.

Современная архитектурно-строительная аэродинамика решает широкий ряд задач, основными из которых являются:

- расчетно-экспериментальные исследования влияния ветровой и снеговой нагрузки на высотные и уникальные сооружения;
- расчетно-экспериментальные исследования влияния ветровой нагрузки на большепролетные мостовые сооружения;
- расчетно-экспериментальные исследования биоклиматической комфортности городской застройки и аэрации объектов промышленного и специального назначения.

Расчетные значения метеорологических воздействий на здания и сооружения принимаются в РФ в соответствии с нормативом³. Для зданий и сооружений учитываются следующие воздействия ветра: основной тип ветровой нагрузки; пиковые значения ветровой нагрузки, действующие на конструктивные элементы ограждения и элементы их крепления.

Компонентами ветровой нагрузки являются:

- нормальное давление w_p , приложенное к внешней поверхности сооружения или элемента;
- силы трения w_f , направленные по касательной к внешней поверхности и отнесенные к площади ее горизонтальной или вертикальной проекции;
- нормальное давление w_i , приложенное к внутренним поверхностям сооружений с проницаемыми ограждениями с открывающимися или постоянно открытыми проемами;

³ СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия.

• проекции w_x и w_y внешних сил в направлении осей x и y , обусловленных общим сопротивлением сооружения;

- крутящий момент m_z относительно оси z ;
- опрокидывающие моменты m_x , m_y относительно осей x и y .

Соответственно можно выделить основные задачи модельных исследований зданий и сооружений в аэродинамических трубах:

- определение распределения аэродинамического коэффициента внешнего давления c_p по поверхности исследуемого объекта;
- определение интегральных аэродинамических коэффициентов лобового сопротивления c_x , поперечной силы c_y и крутящего момента m_z .

Основой любых исследований ветрового воздействия является климатический анализ. На данном этапе исследований проводится оценка ветрового режима пограничного слоя атмосферы в районе застройки (изменение скорости ветра с высотой над поверхностью земли, масштаб и энергетический спектр турбулентности, экстремальные значения скорости ветра и его порывов) и получается та априорная информация, которую необходимо задавать при моделировании ветровых нагрузок на высотное здание в аэродинамической трубе или программном пакете.

Физический эксперимент на стадии подготовки предполагает проектирование и создание модели исследуемого объекта. При проведении классического аэродинамического эксперимента основным параметром моделирования является геометрическое подобие модели натурному объекту. При проектировании макета необходимо предусматривать

возможность воспроизведения отдельных архитектурных элементов в масштабе, выбранном в зависимости от размеров рабочей зоны используемой аэродинамической установки, а также размещение измерительного оборудования. Классическим в данном случае является эксперимент без определения деформационных параметров объекта, в котором макеты могут быть использованы с целью определения давления на поверхности здания, интегрального распределения ветровых нагрузок на здание, а также снеговых нагрузок. В случае же, если исследуются гибкие (аэроупругие) конструкции, помимо геометрического подобия моделируются и массово-инерционные и частотные характеристики реального объекта и при проведении экспериментальных исследований, помимо указанных выше аэродинамических коэффициентов, характеризующих ветровую нагрузку на объект, исследуется возможность возникновения эффектов аэродинамической неустойчивости, таких как вихревой резонанс, галопирование, флаттер и др. Проведение исследований ветрового воздействия в данном случае представляется особо актуальным, так как известны случаи потери устойчивости гибких сооружений и даже их разрушения в результате ветрового воздействия (рис. 5).

Отдельным рядом задач архитектурно-строительной аэродинамики являются исследования биоклиматической комфортности городской застройки и аэрации объектов промышленного и специального назначения. Вопросы, связанные с определением комфортности пешеходных зон, не имеют подробного описания ни в технической литературе, ни в нормативной документации как на территории РФ,



Рис. 5. Разрушение вантового моста в г. Такома, США

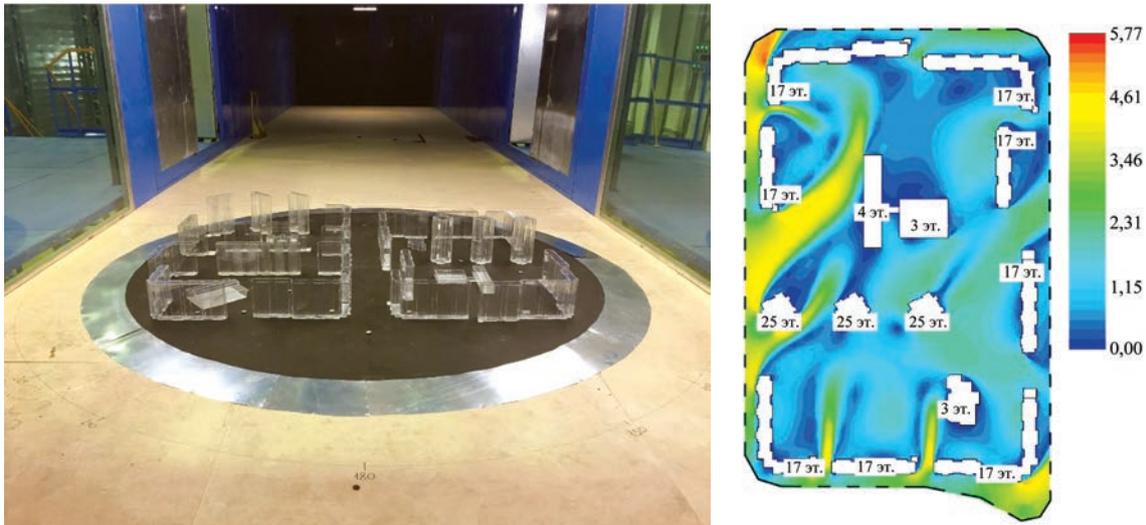


Рис. 6. Расчетно-экспериментальные исследования биоклиматической комфортности городской застройки

так и в зарубежных странах (единственным нормативным документом по ветровому комфорту является стандарт Нидерландов NEN 8100). Тем не менее, работы по данному направлению активно ведутся и становятся все более актуальными, особенно для крупных городов с плотной жилой застройкой. В процессе исследований анализируется характер распространения и скорости ветровых потоков на территории исследуемого участка застройки, выявляются дискомфортные зоны с повышенными скоростями ветра, а также застойные зоны, где возможны повышенные концентрации вредных веществ в виде газов и химически-активной пыли. По результатам проведения исследований можно сделать выводы о качестве предлагаемого проектного решения и, в случае необходимости, о проведении мероприятий по его оптимизации путем проектирования соответствующего размещения зеленых насаждений или/и ветрозащитных конструкции [8, 9].

В настоящее время проблемой моделирования ветровых воздействий на территории РФ занимаются организации и лаборатории, оснащенные аэродинамическими трубами: Лаборатория по аэродинамическим и аэроакустическим испытаниям строительных конструкций (УНПЛ ААИСК) НИУ МГСУ, г. Москва; Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского (ЦАГИ), г. Жуковский Московской области; УНИКОН, г. Новосибирск; ЦНИИ им. А.Н. Крылова, г. Санкт-Петербург; МГУ им. Ломоносова, г. Москва. УНПЛ ААИСК оснащена уникальной

аэродинамической трубой архитектурно-строительной типа с рабочей зоной более 15 м (18,9 м). Несмотря на недолгое время существования лаборатории, за 6 лет с момента создания в УНПЛ ААИСК накоплен достаточно большой опыт в области исследования аэродинамики строительных конструкций. Ведутся исследования по разработкам и совершенствованию методов проведения экспериментальных исследований в аэродинамической трубе архитектурно-строительного типа, включающей проектирование и строительство макетов уникальных зданий и сооружений [10], а также мостовых конструкций [11], и методику экспериментального моделирования ветровых воздействий [12, 13]. Выполняются исследования по вопросам разработки методов численного [14, 15] и расчетно-экспериментального моделирования ветровых и снеговых воздействий на здания и сооружения [16].

В целом развитие архитектурно-строительной аэродинамики является одним из приоритетных направлений современной строительной науки. Комплексное внедрение существующих методик исследования, а также их совершенствование, позволяет оптимизировать затраты при проектировании, строительстве и эксплуатации уникальных сооружений, а также способствует повышению надежности конструкций, их долговечности, улучшению их эксплуатационных качеств, уменьшению риска причинения вреда персоналу, имуществу физических или юридических лиц и окружающей природной среде.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pagan W.W. What aerodynamics can teach the civil engineer // Engineering News Record. 1934. Vol. 113. No. 18. Pp. 565.
2. Von Karman T., Duwez P. The propagation of plastic deformation in solids // Journal of Applied Physics. 1950. Vol. 21. No. 10. Pp. 987–994.

3. Wootton L.R. Wind force on structures — final report of the task committee on wind forces of the committee on loads and stresses of the structural division, ASCE // Transactions of the American Society of Civil Engineers. 1961. Vol. 126. Issue 2. Pp. 1124–1198.

4. Davenport A.G. The application of statistical concepts to the wind loading of structures // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. 1961. Vol. 19. Issue 4. Pp. 449–472.

5. Реттер Э.И., Стриженев С.И. Аэродинамика зданий. М.: Стройиздат, 1968. 240 с.

6. Реттер Э.И. Архитектурно-строительная аэродинамика. М.: Стройиздат, 1984. 294 с.

7. Поддаева О.И., Кубенин А.С., Чуринов П.С. Архитектурно-строительная аэродинамика. М.: МГСУ, 2017. 86 с.

8. Дуничкин И.В., Жуков Д.А., Золотарев А.А. Влияние аэродинамических параметров высотной застройки на микроклимат и аэрацию городской среды // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 9. С. 39–41.

9. Егорычев О.О., Дуничкин И.В. Вопросы прогнозирования микроклимата городской среды для оценки ветроэнергетического потенциала застройки // Вестник МГСУ. 2013. № 6. С. 123–131.

10. 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.

11. Егорычев О.О., Чуринов П.С., Поддаева О.И. Проектирование и изготовление аэроупругой модели моста для проведения аэродинамических экспериментов // Научное обозрение. 2015. № 9. С. 111–114.

12. 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.

13. Поддаева О.И., Буслая Ю.С., Грибач Д.С. Экспериментальное исследование ветровых нагрузок на многофункциональный высотный жилой комплекс // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2014. № 6. С. 58–62.

14. Поддаева О.И., Дубинский С.И., Федосова А.Н. Численное моделирование ветровой аэродинамики высотного здания // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 9. С. 23–27.

15. Кубенин А.С., Федосова А.Н. Численное моделирование аэродинамики жилого комплекса с прилегающей застройкой // Научное обозрение. 2015. № 8. С. 136–141.

16. Поддаева О.И., Дуничкин И.В. Расчетно-экспериментальные исследования ветровых воздействий для жилых комплексов в Москве // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 4. С. 42–45.

Поступила в редакцию в мае 2017 г.

Принята в доработанном виде в мае 2017 г.

Одобрена для публикации в июне 2017 г.

Об авторах: Поддаева Ольга Игоревна — кандидат технических наук, доцент, руководитель Учебно-научно-производственной лаборатории по аэродинамическим и аэроакустическим испытаниям строительных конструкций, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, poddaevaoi@gmail.com;

Дуничкин Илья Владимирович — кандидат технических наук, доцент, заместитель руководителя Учебно-научно-производственной лаборатории по аэродинамическим и аэроакустическим испытаниям строительных конструкций, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, ecse@bk.ru.

REFERENCES

1. Pagan W.W. What Aerodynamics Can Teach the Civil Engineer. *Engineering News Record*. 1934, vol. 113, no. 18, p. 565.

2. Von Karman T., Duwez P. The Propagation of Plastic Deformation in Solids. *Journal of Applied Physics*. 1950, vol. 21, no. 10, pp. 987–994.

3. Wootton L.R. Wind Force on Structures — Final Report of the Task Committee on Wind Forces of the Committee on Loads and Stresses of the Structural Division, ASCE. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. 1961, vol. 126, issue 2, pp. 1124–1198.

4. Davenport A.G. The Application of Statistical Concepts to the Wind Loading of Structures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 1961, vol. 19, issue 4, pp. 449–472.

5. Retter E.I., Strizhenov S.I. *Aerodinamika zdaniy* [Buildings Aerodynamics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1968, 240 p. (In Russian)

6. Retter E.I. *Arkhitekturno-stroitel'naya aerodinamika* [Architectural and Construction Aerodynamics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984, 294 p. (In Russian)

7. Poddayeva O.I., Kubenin A.S., Churin P.S. *Arkhitekturno-stroitel'naya aerodinamika* [Architectural and Construction Aerodynamics]. Moscow, MGSU Publ., 2017, 86 p. (In Russian)

8. Dunichkin I.V., Zhukov D.A., Zolotarev A.A. Vliyaniye aerodinamicheskikh parametrov vysotnoy zastroyki na mikroklimat i aeratsiyu gorodskoy sredy [Influence of the High-rise Housing Aerodynamic Parameters on the Microclimate and Aeration of the Urban Environment]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Construction]. 2013, no. 9, pp. 39–41. (In Russian)

9. Egorychev O.O., Dunichkin I.V. Voprosy prognozirovaniya mikroklimate gorodskoy sredy dlya otsenki vetroenergeticheskogo potentsiala zastroyki [Questions of Prediction of a Urban Environment Microclimate for the Estimation of a Housing Wind Power Potential]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2013, no. 6, pp. 123–131. (In Russian)

10. Churin P.S., Poddayeva O.I., Egorychev O.O. Proektirovaniye maketov unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy v eksperimental'noy aerodinamike [Designing Mock-Ups of

Unique Buildings and Structures in Experimental Aerodynamics]. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzh'ya* [Scientific and Technical Volga Region Bulletin]. 2014, no. 5, pp. 332–335. (In Russian)

11. Egorychev O.O., Churin P.S., Poddaeva O.I. Proektirovanie i izgotovlenie aerouprugoy modeli mosta dlya provedeniya aerodinamicheskikh eksperimentov [Designing and Manufacturing of an Aeroelastic Bridge Model for Aerodynamic Experiments]. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific Review]. 2015, no. 9, pp. 111–114. (In Russian)

12. Egorychev O.O., Churin P.S., Poddaeva O.I. Eksperimental'noe issledovanie silo-momentnykh vetrovykh nagruzok na vysotnye zdaniya [Experimental Study of Force-Moment Wind Loads on High-Rise Buildings]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Construction]. 2014, no. 9, pp. 28–30. (In Russian)

13. Poddaeva O.I., Buslaeva Yu.S., Gribach D.S. Eksperimental'noe issledovanie vetrovykh nagruzok na mnogofunktional'nyy vysotnyy zhiloy kompleks [Experimental Study of Wind Loads on a Multifunctional High-Altitude Residential Estate]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*

[Bulletin of Belgorod State Technical University named after V.G. Shukhov]. 2014, no. 6, pp. 58–62. (In Russian)

14. Poddaeva O.I., Dubinskiy S.I., Fedosova A.N. Chislennoe modelirovanie vetrovoy aerodinamiki vysotnogo zdaniya [Numerical Modeling of Wind Aerodynamics of a High-rise Building]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Construction]. 2014, no. 9, pp. 23–27. (In Russian)

15. Kubenin A.S., Fedosova A.N. Chislennoe modelirovanie aerodinamiki zhilogo kompleksa s prilgayushchey zastroykoy [Numerical Modeling of the Aerodynamics for the Residential Estate with Neighboring Buildings]. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific Review]. 2015, no. 8, pp. 136–141. (In Russian)

16. Poddaeva O.I., Dunichkin I.V. Raschetno-eksperimental'nye issledovaniya vetrovykh vozdeystviy dlya zhilykh kompleksov v Moskve [Computational and Experimental Investigations of Wind Impacts for Residential Estates in Moscow]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Construction]. 2016, no. 4, pp. 42–45. (In Russian)

Received in May 2017.

Adopted in revised form in May 2017.

Approved for publication in June 2017.

About the authors: **Poddaeva Olga Igorevna** — Candidate of Technical Sciences, associate professor, head of the Educational Scientific and Production Laboratory for Aerodynamic and Aeroacoustic Testing of Building Constructions, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, poddaevaol@gmail.com;

Dunichkin Ilya Vladimirovich — Candidate of Technical Sciences, associate professor, deputy head of the Educational Scientific and Production Laboratory for Aerodynamic and Aeroacoustic Testing of Building Constructions, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, ecse@bk.ru.