



КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ОБТЕКАНИЯ И ОЦЕНКА ПЕШЕХОДНОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ КОМФОРТНОСТИ КОМПЛЕКСА ЗДАНИЙ

Приводятся и анализируются результаты компьютерного моделирования распределения ветровых потоков вблизи разноплановых объектов — большепролетного и высотного зданий. Анализ пешеходной аэродинамической комфортности проводился для вертикального объекта (высотное здание) отдельно и в комплексе с горизонтальным (большепролетное). Были получены поля распределения ветровых потоков. Результаты эксперимента показывают, что комплексная застройка влияет на их распределение. Изменяется вектор равнодействующей ветровой нагрузки. Меняется скорость и направление распределения ветровых потоков. Близкорасположенные здания либо создают «заслон», снижая скорость ветра, либо способны отражать потоки воздуха, создавая завихрения вблизи объектов.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, ветровая нагрузка, пешеходная комфортность, аэродинамическая комфортность, аэродинамические испытания, комплексная застройка, ветровое давление, воздушный поток.

Введение. Аэродинамика зданий и сооружений представляет собой отдельное направление научных и практических изысканий, нацеленных как на получение надежных данных при выполнении проектных работ, так и на оптимизацию методик расчета конструкций зданий и сооружений. Ветровые воздействия оказывают непосредственное влияние на прочностные свойства несущих конструкций, приводя к их деформации и накоплению повреждений. Они вызывают колебания, которые могут привести к резонансным эффектам и возникновению динамической неустойчивости. Учет этих факторов критически важен при расчете объектов по предельным состояниям, чтобы гарантировать их безопасность и долговечность.

Задачи, связанные с аэродинамическим обтеканием твердых тел и систем твердых тел неразрывно связаны с развитием авиации и баллистики [1, 2]. Именно в процессе изучения механики летательных аппаратов перед учеными впервые встал вопрос о характере распределения давлений, скоростей воздушных потоков, их направлении, а также характере обтекания [3]. Известно, что, в зависимости от плавности кривых и поверхностей, находящихся в зоне контакта с воздушными потоками, взаимодействие может происходить в одном из двух режимов — ламинарном, при котором линии тока и элементарные струйки не перемещаются и их линии распространения не пересекаются, и турбулентном, при котором в потоке возни-

кают различные завихрения и прочие возмущения, а процесс разложения потоков на дифференцированные течения становится невозможным.

При работе с ветровыми потоками основное внимание уделяется расчету ветровой нагрузки на несущие конструкции [4–6]. Также важным расчетом является влияние ветровых потоков на конструкции вспомогательного назначения [7, 8], находящиеся вокруг зданий. Отдельного внимания заслуживают вопросы, связанные с обеспечением пешеходной аэродинамической комфортности на прилегающих к зданию территориях. В первую очередь это связано с необходимостью расчета скоростей и предсказания направлений перемещения воздушных масс, а также с определением режимов течения воздушных потоков. При турбулентном режиме, как правило, возникают непредсказуемые воздушные потоки, завихрения, которые оказывают негативное влияние на пешеходов, особенно в условиях дождей, снегопадов и пр. Пешеходная комфортность является одним из немаловажных факторов при выборе места жительства. Взаимное расположение различных природных или техногенных объектов может приводить как к снижению силы ветра, так и к её увеличению в их окружении, что, в свою очередь, будет влиять на комфорт передвижения людей, их времяпрепровождение на дворовых территориях или на работу уличных служб. Изучение данного вопроса является актуальным при строительстве современных многоквар-

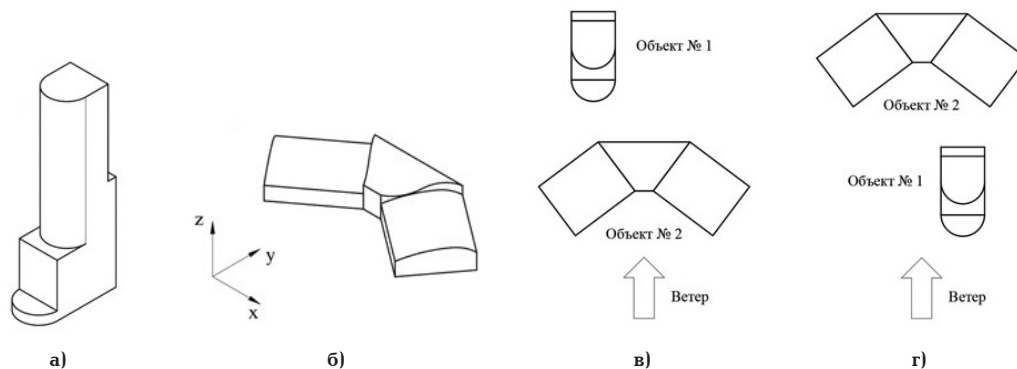


Рис. 1. Геометрическая форма объектов исследования: а) объект № 1; б) объект № 2 и схемы расположения объектов относительно друг друга, принятые для исследования: в) положение № 1; г) положение № 2

тирных жилых кварталов, а также при возведении зданий внутри существующих городских застроек [9, 10]. В настоящее время нормативные методики [4] не затрагивают вышеописанные проблемы даже в случаях, когда очертание объекта полностью совпадает с предлагаемыми упрощенными схемами.

На сегодняшний день уникальные объекты сложной геометрической формы, как правило, не проектируются изолированными, а возводятся в комплексе, при этом каждое отдельное здание может считаться элементом общей системы. Геометрия системы объектов в таком случае начинает играть не менее важную роль, чем геометрические особенности форм каждого объекта в отдельности. При этом в сравнении с изолированным положением изменяется характер обтекания каждого элемента системы, что приводит к изменению статического состояния — смещение точек приложения равнодействующих, изменение опрокидывающих моментов и пр. Например, для системы, приведенной на (рис. 1), влияние взаимного расположения и внутренней геометрической ориентации объектов сложной геометрической формы, расположенных в непосредственной близости по отношению друг к другу, оказывается весьма существенным, что приводит к необходимости использования новых современных методов расчета при проектировании комплексов зданий и сооружений.

Таким образом, выполнение компьютерного моделирования и экспериментального исследования является не только необходимым при проектировании конкретных объектов, но также может привести к уточнению существующих и разработке новых методов расчета характеристических составляющих ветрового давления [11–14] и предсказания аэродинамических явлений в пространствах, окружающих объекты сложной геометрической формы [15]. Целью настоящего исследования является количественная и качественная оценка взаимного влияния зданий комплекса на общий аэродинамический портрет системы при взаимодействии с ветровыми потоками.

В статье рассматривается вопрос распределения ветрового потока на здания, расположенные в непосредственной близости друг от друга. Задачей исследования является изучение влияния, оказываемого ветровыми потоками при взаимодействии со зданиями, на окружающую обстановку: комфортность пешеходных зон, возможность работы обслуживающего персонала при необходимости использования средств индивидуального крепления при

обслуживании ограждающих конструкций здания снаружи, а также возможность безопасного выхода технического персонала на кровлю.

Методика компьютерного моделирования. Компьютерное моделирование имеет целый ряд преимуществ перед экспериментальным исследованием. В первую очередь это касается трудоемкости и материально-технической базы. Аэродинамические установки являются весьма сложными инженерными объектами, требующими больших площадей для создания весьма малых рабочих пространств. Подготовка моделей для проведения таких экспериментов является трудоемкой задачей, при этом не всегда может быть достигнуто аэродинамическое подобие. Таким образом, второй главный недостаток экспериментального исследования аэродинамических особенностей зданий — это масштабный фактор. Необходимо разрабатывать методики, позволяющие осуществить корректный переход от модели объекта к реальному сооружению, масштаб при этом составляет 100–1000 единиц. С практической точки зрения, экспериментальные исследования являются, как правило, менее наглядными; измеряемые величины определяются для ограниченного числа наперед заданных точек; затрудняется визуализация линий тока; измерение скоростей и варьирование режимов турбулентности крайне осложнены.

Тем не менее эксперимент остается неотъемлемой частью научных исследований, в первую очередь это связано с возможностью выполнения независимого контроля результатов решения с помощью компьютерного моделирования.

В качестве исследования было выбрано два объекта соизмеримых размеров, расположенные в непосредственной близости друг от друга (рис. 1). Первый объект представляет собой аналог высотного здания, вертикальный размер которого преобладает над горизонтальным. Второй объект — большепролетное здание с достаточно небольшой высотой по сравнению с горизонтальными размерами. Оба объекта имеют уникальную форму с изогнутыми поверхностями, что также способствует проведению эксперимента для определения более точных результатов, чем расчеты типовых форм.

Моделирование заключается в решении систем дифференциальных уравнений Навье — Стокса, позволяющих описывать обтекание твердых объектов потоками жидкости или газа. При этом выполняется совместное использование уравнений движения [14, 16, 17]:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \end{cases} \quad (1)$$

и уравнения неразрывности (2):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

где u, v, w (м/с) — проекции скоростей движения частиц в элементарных потоках на оси принятой глобальной системы координат XYZ ; t — время (с); ρ — плотность аэродинамической среды (кг/м³), в условиях решаемой задачи принимается плотность атмосферы; p — давление в изучаемой точке пространства (Па); μ/ρ — коэффициент кинематической вязкости среды (м²/с), где μ — соответственно, коэффициент динамической вязкости (кг/(м·с)) [16, 17].

При этом система уравнений (1) может быть представлена в матричном виде (3):

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = -(\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} + \frac{\mu}{\rho} \Delta \mathbf{V} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{f}, \quad (3)$$

где ∇ — оператор набла; Δ — векторный оператор Лапласа; \mathbf{V} — поле векторов скоростей; \mathbf{f} — поле векторов массовых сил.

Следует отметить, что система уравнений (1) в общем случае заметно усложняется, если учитывать сжимаемость среды ($\rho \neq \text{const}$), но данный эффект проявляется при значительно больших скоростях [1, 2].

В условиях аэродинамического взаимодействия статичных объектов с ветровыми потоками эффектом сжимаемости можно пренебречь.

В настоящее время не удалось получить плавного аналитического решения уравнения (1). Это диктует необходимость использования численных методов, при которых расчетная область представляется в виде совокупности большого числа объемов малого размера, законы распределения искомых величин внутри которых (давлений, скоростей и пр.) считаются известными (например, изменяющимися по линейному закону). Тогда системы дифференциальных уравнений могут быть заменены на системы большого количества алгебраических уравнений. При этом точность полученных результатов будет тем выше, чем больше конечных объемов содержит система. Трудоемкие для ручного счета системы могут быть решены с помощью специализированных программно-вычислительных комплексов.

Компьютерное моделирование ветрового потока выполняется в программно-вычислительном комплексе Ansys CFX, модуль Fluent. Объекты были подвержены ветровой атаке по направлению оси Y (рис. 1а, б), являющейся для них осью симметрии. Для моделирования были созданы геометрические схемы как самих зданий, так и окружающего их пространства, после чего для системы задавались граничные условия. В первую очередь это условие «wall» для поверхностей, образующих изучаемые объекты и поверхность земли. Данное условие гарантирует отсутствие скоростей, направленных по нормали к поверхностям (также носит название «непротекание») и обеспечивает свободное проскальзывание воздушных потоков вдоль поверхности. На входе в рабочую область применяется условие «normal speed», фиксирующее скорость ветровых потоков на входе (в исследовании принималась скорость 12 м/с). С целью получения достоверной информации размеры рабочей области назначаются таким образом, чтобы после взаимодействия с объектами аэродинамические потоки возвращались к исходному невозмущенному состоянию, что обеспечит отсутствие влияния границ на результаты моделирования. С той же целью на выходе из расчетной области назначается граничное условие «static pressure» со значением 0 Кпа, что говорит об отсутствии избыточного давления в зонах, достаточно удаленных от изучаемых объектов. Для контроля правильности решения на остальных поверхностях задается условие симметрии свойств.

При дискретизации пространства и построении сетки конечных объемов с целью уменьшения

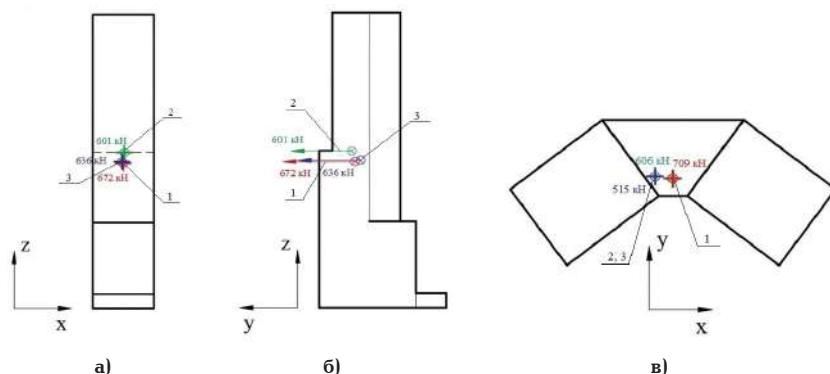


Рис. 2. Равнодействующие сил ветрового давления: вектор 1 при одиночном расположении объектов, вектор 2 — положение № 1 объектов, вектор 3 — положение № 2; а) для объекта № 1 (проекция XOZ); б) для объекта № 1 (проекция YOZ); в) для объекта № 2

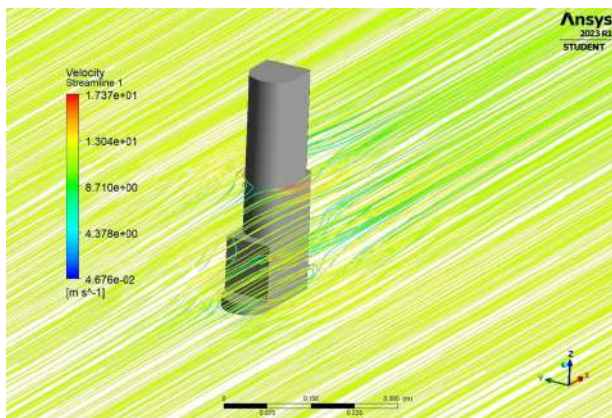


Рис. 3. Объект № 1. Распределение ветровых потоков

затрат оперативной памяти принималась гипотеза отсутствия возмущений в точках, удаленных от концентраторов, которыми в данном случае являются непосредственно изучаемые объекты. Данное допущение является расширением известного в сопротивлении материалов и теории упругости принципа Сен-Венана. Согласно принятым допущениям, сгущение сетки конечных объёмов необходимо выполнять лишь в окрестностях здания, а в удаленных точках разбивка принимается более грубой.

Результаты компьютерного моделирования.

По результатам исследования распределения ветрового давления было определено, что положение равнодействующей сил ветровой нагрузки, приложенных к статичному объекту, меняется, если рассматривать этот объект в комплексе с другими, схожими по габаритам (рис. 2). Наличие или отсутствие рядом с рассматриваемым объектом других объектов, объединенных одной аэродинамической средой, изменяет также значение модуля равнодействующей. Изучение влияния взаимного расположения объектов будет неокончательным, если не оценить пешеходную аэродинамическую комфортность вблизи рассматриваемых зданий.

Для анализа аэродинамической пешеходной комфортности рассматриваются те же два объекта

исследования (рис. 1) в комплексе и для сравнения вертикальный объект отдельно.

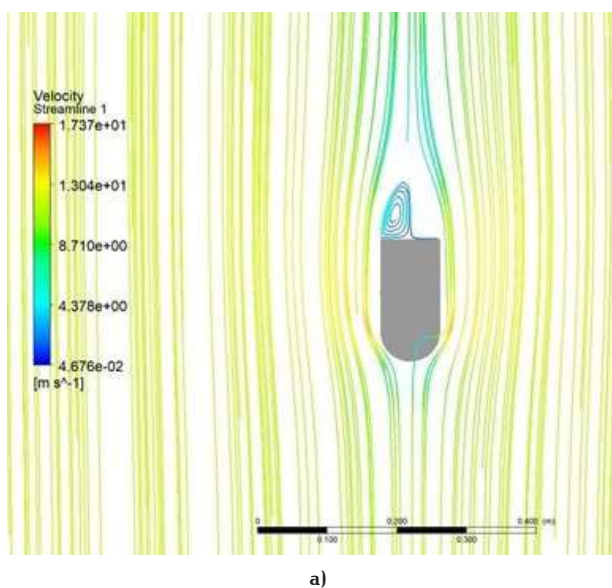
В качестве результатов эксперимента получаем поля распределения ветрового потока вокруг объектов при их взаимных положениях 1 и 2 (рис. 1в, г) и для отдельно расположенного объекта № 1.

Для отдельно рассматриваемого объекта № 1 при заданной скорости ветра 12 м/с наблюдается существенное снижение скорости ветра с наветренной стороны (в 3 раза) и увеличение в 1,4 раза с боковых. С подветренной стороны скорость ветра также снижается в несколько раз, но при этом наблюдается резкая смена её направления и образование вихревых потоков (рис. 3, 4).

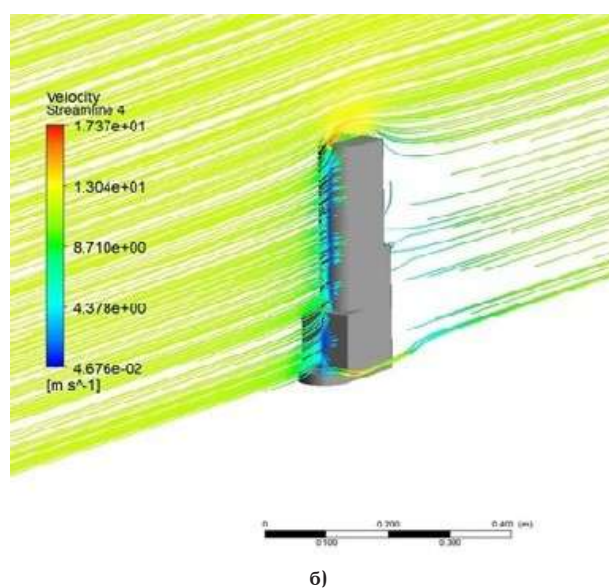
Для более точной оценки аэродинамической пешеходной комфортности в условиях застройки, приближенной к реальной, необходимо рассмотреть этот объект в комплексе со вторым.

Положение объектов № 1. Горизонтальный объект (низкое большепролетное здание) располагается впереди вертикального (высотное здание). Наблюдается небольшое снижение максимального значения модуля скорости ветра (менее чем на 0,4 м/с), при этом меняется характер распределения направления ветровых потоков (рис. 5). Горизонтальный объект № 2 осуществляет роль «заграждения» и ветровые потоки у основания объекта № 1 более «спокойные», отсутствуют резкие смены направлений и вихревые потоки за ним (рис. 6а). При этом с подветренной стороны вблизи низкого объекта образуются значительные завихрения со снижением скорости почти в 10 раз. Увеличение скорости в 1,4 раза наблюдается на горизонтальных участках объекта № 2. Влияние рассматриваемого положения объектов не вносит существенного влияния на распределение ветровых потоков по высоте объекта № 1 по сравнению с его одиночным расположением (рис. 6б).

Положение объектов № 2 вносит существенные изменения в характер распределения ветровых потоков (рис. 7). Значительные завихрения с падением скорости ветра наблюдаются с подветренной стороны обоих объектов. Скорость на горизонтальных участках объекта № 2, расположенного сзади, снизилась в 1,5 раза по сравнению с положением



а)



б)

Рис. 4. Объект № 1. Распределение ветровых потоков в плоскостях:
а) в уровне 1,5 метра от земли; б) профиль воздушных потоков

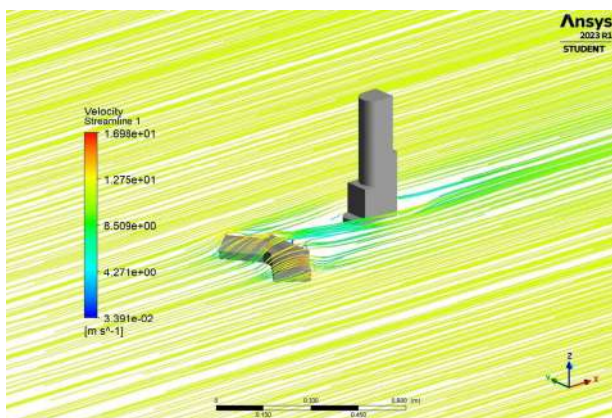


Рис. 5. Положение № 1. Распределение ветровых потоков

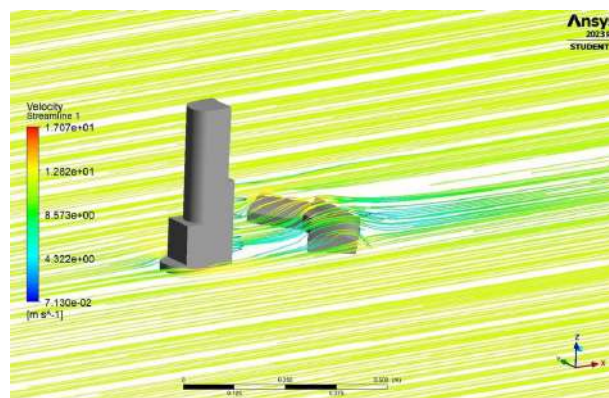
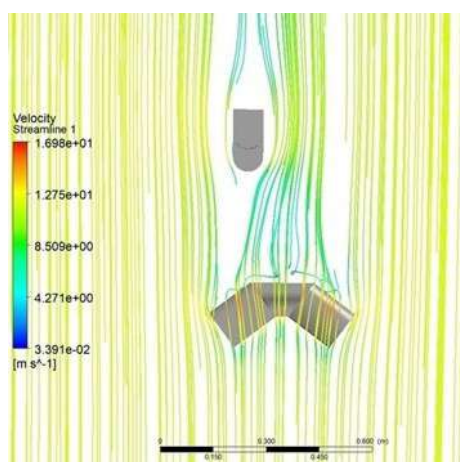
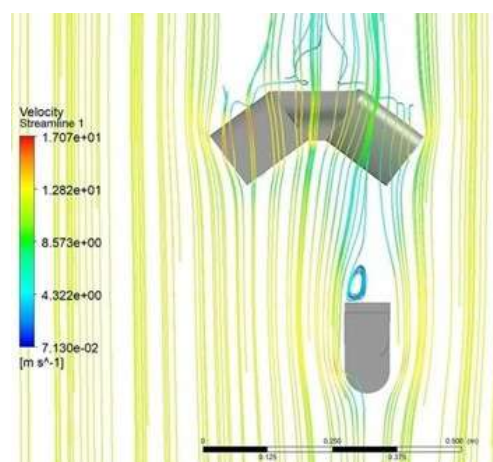


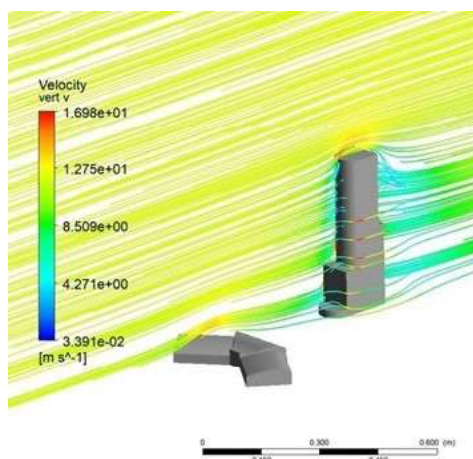
Рис. 7. Положение № 2. Распределение ветровых потоков



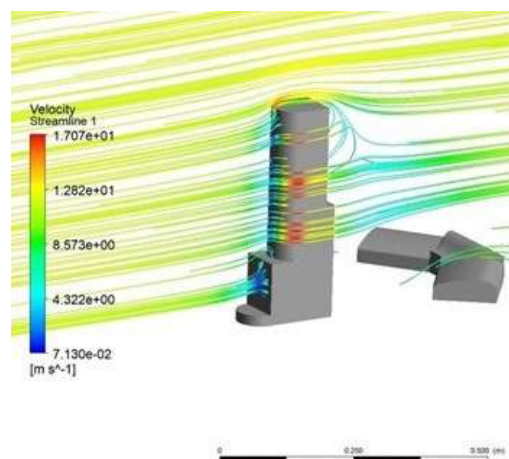
а)



а)



б)



б)

Рис. 6. Положение № 1. Распределение ветровых потоков в плоскостях:
а) в горизонтальной плоскости;
б) профиль воздушных потоков

Рис. 8. Положение № 2. Распределение ветровых потоков в плоскостях:
а) в горизонтальной плоскости;
б) профиль воздушных потоков

№ 1 в своём максимальном значении. На части горизонтального участка, закрытой от ветра высоким объектом, наблюдается снижение скорости почти в 2 раза (рис. 8а). Но при этом завихрения ветрового потока появляются по высоте вертикального объекта № 1, чего не происходило при продувании его отдельно (рис. 8б).

Обсуждение результатов моделирования. Данные, полученные в результате компьютерного мо-

делирования, позволяют заключить, что рассматриваемые объекты обладают достаточно хорошими аэродинамическими характеристиками, существенно не увеличивающими скорость ветра в их окружении. Пребывание и передвижение людей вблизи данных объектов остается достаточно комфортным, прослеживается падение скорости ветра в 2 раза. Вблизи земли наблюдаются резкие смены направления потоков ветра, но при значительном сниже-

нии их скоростей. Более комфортной оказалось взаимное положение объектов № 1 с меньшей интенсивностью завихрений с подветренной стороны объектов.

Осуществление технических и эксплуатационных работ на фасадах и кровле большепролетного здания является более комфортным при взаимном положении объектов 2, так как наличие впереди стоящего вертикального объекта в несколько раз снижает скорость ветрового потока, приходящегося на горизонтальный.

Наиболее комфортным для обслуживания ограждающих конструкций вертикального здания является положение объектов № 1. При этом положении наблюдается меньшая интенсивность возникновения завихрений с подветренной стороны и снижение скорости по сравнению с таким же отдельно стоящим объектом. Интенсивность ветрового потока на боковых фасадах существенно не меняется.

Заключение. Исследование показало, что геометрическая форма объектов, выбранных для изучения, не способствует увеличению скорости ветра или резкой смене его направления. Расположение двух объектов в непосредственной близости ведет, наоборот, к её падению, но, вследствие отражения ветровых потоков, — к созданию завихрений с подветренной стороны впереди стоящего объекта. При проектировании комплекса зданий анализ распределения ветровых потоков позволит подобрать оптимальную форму зданий и их взаимное расположение для создания комфортной среды для пешеходов и людей, выполняющих технические работы на ограждающих конструкциях зданий.

Библиографический список

1. Герасимов С. И., Глухов А. А., Кикеев В. А. [и др.]. Спектр сверхзвукового обтекания вокруг летательного аппарата с управляющими тормозными щитками // Научная визуализация. 2023. Т. 15, № 5. С. 136–148. DOI: 10.26583/sv.15.5.11. EDN: MBSUQG.
2. Герасимов С. И., Ерофеев В. И., Зубанков А. В. [и др.]. Математическое моделирование и экспериментальное исследование бесконтактного измерительного сечения в задаче высокоскоростной аэробаллистики // Инженерно-физический журнал. 2021. Т. 94, № 1. С. 174–179. EDN: PJBMHT.
3. Singh J., Roy A. K. CFD simulation of the wind field around pyramidal roofed single-story buildings // SN Applied Sciences. 2019. № 1 (11). P. 1425. DOI: 10.1007/s42452-019-1476-2.
4. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. Введ. 2017–06–04. Москва: Минстрой России, 2016. 80 с.
5. ГОСТ Р 56728-2015. Здания и сооружения. Методика определения ветровых нагрузок на ограждающие конструкции. Введ. 01–05–2016. Москва: Стандартинформ, 2016. 12 с.
6. Савицкий Г. А. Ветровая нагрузка на сооружения. Москва: Изд-во литературы по строительству, 1972. 111 с.
7. Трянина Н. Ю., Облетов Е. Н., Самохвалов И. А. Аэродинамическое воздействие на панельные антенны базовых станций // Приволжский научный журнал. 2022. № 1 (61). С. 23–30. EDN: NGWFXK.
8. Трянина Н. Ю., Облетов Е. Н., Самохвалов И. А. Оценка ветрового воздействия на пояса башенной конструкции //

Приволжский научный журнал. 2020. № 4 (56). С. 64–70. EDN: XAVIWD.

9. Zhang X., Weerasuriya A. U., Zhang X. [et al.]. Pedestrian wind comfort near a super-tall building with various configurations in an urban-like setting // Building Simulation. 2020. Vol. 13. P. 1385–1408. DOI: 10.1007/s12273-020-0658-6.
10. Valger S. A., Fedorova N. N., Fedorov A. V. Numerical study of interference effects in atmospheric air flow past a group of intricately shaped buildings // Thermophysics and Aeromechanics. 2017. Vol. 24, № 1. P. 35–44. DOI: 10.1134/S0869864317010048.
11. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействия ветра на здания и сооружения / пер. с англ. Б. Е. Маслова, А. В. Швецов; под ред. Б. Е. Маслова. Москва: Стройиздат, 1984. 360 с.
12. Сатанов А. А., Симонов А. В., Хазов П. А. Определение аэродинамических характеристик большепролетного здания экспериментальными методами // Строительная механика и конструкции. 2023. № 1 (36). С. 63–74. DOI: 10.36622/VSTU.2023.36.1.007. EDN: MXRVNG.
13. Хазов П. А., Февральских А. В., Лампси Б. Б. [и др.]. Экспериментальное исследование распределения ветровой нагрузки на поверхность большепролетного здания // Приволжский научный журнал. 2019. № 2. С. 9–16. EDN: GZUURX.
14. Шилов С. С., Кашкина Е. С., Хазов П. А. Численное моделирование и оптимизация ориентации высотного здания по розе ветров // Приволжский научный журнал. 2023. № 3 (67). С. 42–50. EDN: FCMGPK.
15. Kb R., Ganesan V., Rajan S. S. Experimental and computational investigation of outdoor wind flow around a setback building // Building Simulation. 2019. № 12 (5). P. 891–904. DOI: 10.1007/s12273-019-0514-8.
16. Седов Л. И. Механика сплошной среды. В 2 т. Москва: Наука, 1970. Т. 1. 488 с. ISBN 5-02-007052-1.
17. Седов Л. И. Механика сплошной среды. В 2 т. Москва: Наука, 1973. Т. 2. 568 с. ISBN 5-02-007053-X.

ХАЗОВ Павел Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теории сооружений и технической механики Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета (ННГАСУ), г. Нижний Новгород.

SPIN-код: 2856-3284

AuthorID (SCOPUS): 57219007380

ORCID: 0000-0003-1220-6930

ResearcherID: ABN-9937-2022

ВЕДЯЙКИНА Ольга Ивановна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики и теоретической механики ННГАСУ, г. Нижний Новгород.

SPIN-код: 1652-5585

ORCID: 0009-0007-1686-2579

Адрес для переписки: razvnauki@rambler.ru

Для цитирования

Хазов П. А., Ведяйкина О. И. Компьютерное моделирование аэродинамического обтекания и оценка пешеходной аэродинамической комфортности комплекса зданий // Омский научный вестник. 2024. № 3 (191). С. 56–63. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-191-56-63.

Статья поступила в редакцию 25.05.2024 г.

© П. А. Хазов, О. И. Ведяйкина



COMPUTER MODELING OF AERODYNAMIC FLOW AND ASSESSMENT OF PEDESTRIAN AERODYNAMIC COMFORT OF A BUILDING COMPLEX

The results of a computer modeling of the distribution of wind flows near diverse objects (large-span and high-rise buildings) are given and analyzed. The analysis of pedestrian aerodynamic comfort is carried out for a vertical object (a high-rise building) separately and in two positions in combination with a horizontal one (a large span). Wind flow distribution fields are obtained. The results of the experiment show that complex buildings affect their distribution. The point of application and the modulus of the vector of the resultant wind load change. The speed and direction of distribution of wind flows near objects are changing. A nearby building located on the windward side creates a «barrier» reducing the wind speed in the courtyard areas. A building located downwind is able to reflect air flows, creating swirls near objects. More comfortable for external technical work on the facades of the buildings in question is the position from behind facing the direction of the wind flow.

Keywords: computer modeling, wind load, pedestrian comfort, aerodynamic comfort, aerodynamic experiment, integrated development, wind pressure, air flow.

References

1. Gerasimov S. I., Glukhov A. A., Kikeyev V. A. [et al.]. Spektr sverkhzvukovogo obtekaniya vokrug letatel'nogo apparata s upravlyayushchimi tormoznymi shchitkami [The spectrum of supersonic flow around an aircraft with control brake shields] // Nauchnaya vizualizatsiya. *Scientific Visualization*. 2023. Vol. 15, no. 5. P. 136–148. DOI: 10.26583/sv.15.5.11. EDN: MBSUQG. (In Russ.).
2. Gerasimov S. I., Erofeev V. I., Zubankov A. V. [et al.]. Matematicheskoye modelirovaniye i eksperimental'noye issledovaniye beskontaktnogo izmeritel'nogo secheniya v zadache vysokoskorostnoy aeroballistiki [Mathematical simulation and experimental investigation of a contactless measuring section in the problem on high-velocity ballistic flights] // Inzhenernofizicheskiy zhurnal. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2021. Vol. 94, no. 1. P. 174–179. EDN: PJBMHT. (In Russ.).
3. Singh J., Roy A. K. CFD simulation of the wind field around pyramidal roofed single-story buildings // SN Applied Sciences. 2019. No. 1 (11). P. 1425. DOI: 10.1007/s42452-019-1476-2. (In Engl.).
4. SP 20.13330.2016. Nagruzki i vozdeystviya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.01.07-85* [Loads and actions. Updated edition of SNiP 2.01.07-85*]. Moscow, 2016. 80 p. (In Russ.).
5. GOST R 56728-2015. Zdaniya i sooruzheniya. Metodika opredeleniya vetrovykh nagruzok na ograzhdayushchiye konstruksii [Buildings and constructions. Method for determining wind loads on the building envelope]. Moscow, 2016. 12 p. (In Russ.).
6. Savitskiy G. A. Vetrovaya nagruzka na sooruzheniya [Wind load on structures]. Moscow, 1972. 111 p. (In Russ.).
7. Tryanina N. Yu., Obletov E. N., Samokhvalov I. A. Aerodinamicheskoye vozdeystviye na panel'nyye anteny bazovykh stantsiy [Aerodynamic impact on panel antennas of base stations] // Privolzhskiy nauchnyy zhurnal. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2022. No. 1 (61). P. 23–30. EDN: NGWFXK. (In Russ.).
8. Tryanina N. Yu., Obletov E. N., Samokhvalov I. A. Otsenka vetrovogo vozdeystviya na poyasa bashennoy konstruksii [Assessment of wind impact on tower construction belts] // Privolzhskiy nauchnyy zhurnal. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2020. No. 4 (56). P. 64–70. EDN: XAVIWD. (In Russ.).
9. Zhang X., Weerasuriya A. U., Zhang X. [et al.]. Pedestrian wind comfort near a super-tall building with various configurations in an urban-like setting // Building Simulation. 2020. Vol. 13. P. 1385–1408. DOI: 10.1007/s12273-020-0658-6. (In Engl.).
10. Valger S. A., Fedorova N. N., Fedorov A. V. Numerical study of interference effects in atmospheric air flow past a group of intricately shaped buildings // Thermophysics and Aeromechanics. 2017. Vol. 24, no. 1. P. 35–44. DOI: 10.1134/S0869864317010048. (In Engl.).
11. Simiu E., Skanlan R. Vozdeystviya vetra na zdaniya i sooruzheniya [Wind impacts on buildings and structures] / trans. from Engl. B. E. Maslova, A. V. Shvetsovoy; ed. by B. E. Maslova. Moscow, 1984. 360 p. (In Russ.).
12. Satanov A. A., Simonov A. V., Khazov P. A. Opredeleniye aerodinamicheskikh kharakteristik bol'sheproletnogo zdaniya eksperimental'nymi metodami [Experimental study of the aerodynamic characteristics of the large-span building] // Stroitel'naya mekhanika i konstruksii. *Structural Mechanics*

and Structures. 2023. No. 1 (36). P. 63–74. DOI: 10.36622/VSTU.2023.36.1.007. EDN: MXRVNG. (In Russ.).

13. Khazov P. A., Fevral'skikh A. V., Lamps B. B. [et al.]. Eksperimental'noye issledovaniye raspredeleniya vetrovoy nagruzki na poverkhnost' bol'sheproletnogo zdaniya [Experimental study of wind load distribution on the surface of large-span buildings] // Privolzhskiy nauchnyy zhurnal. Privolzhsky Scientific Journal. 2019. No. 2. P. 9–16. EDN: GZUURX. (In Russ.).

14. Shilov S. S., Kashkina E. S., Khazov P. A. Chislennoye modelirovaniye i optimizatsiya oriyentatsii vysotnogo zdaniya po roze vetrov [Numerical simulation and optimization of the orientation of a high-rise building by the wind rose] // Privolzhskiy nauchnyy zhurnal. Privolzhsky Scientific Journal. 2023. No. 3 (67). P. 42–50. EDN: FCMGPK. (In Russ.).

15. Kb R., Ganesan V., Rajan S. S. Experimental and computational investigation of outdoor wind flow around a setback building // Building Simulation. 2019. No. 12 (5). P. 891–904. DOI: 10.1007/s12273-019-0514-8. (In Engl.).

16. Sedov L. I. Mekhanika sploshnoy sredy [Continuum mechanics]. In 2 vols. Moscow, 1970. Vol. 1. 488 p. ISBN 5-02-007052-1. (In Russ.).

17. Sedov L. I. Mekhanika sploshnoy sredy [Continuum mechanics]. In 2 vols. Moscow, 1973. Vol. 2. 568 p. ISBN 5-02-007053-X. (In Russ.).

KHAZOV Pavel Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor

of Theory of Structures and Technical Mechanics Department, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (NNGASU), Nizhny Novgorod.

SPIN-code: 2856-3284

AuthorID (SCOPUS): 57219007380

ORCID: 0000-0003-1220-6930

ResearcherID: ABN-9937-2022

VEDIAIKINA Olga Ivanovna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of General Physics and Theoretical Mechanics Department, NNGASU, Nizhny Novgorod.

SPIN-code: 1652-5585

ORCID: 0009-0007-1686-2579

Correspondence address: razvnauki@rambler.ru

For citations

Khazov P. A., Vediaikina O. I. Computer modeling of aerodynamic flow and assessment of pedestrian aerodynamic comfort of a building complex // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 3 (191). P. 56–63. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-191-56-63.

Received May 25, 2024.

© P. A. Khazov, O. I. Vediaikina