

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЫТА ЗАРУБЕЖНЫХ УЧЕНЫХ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ, ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ УНИКАЛЬНОЙ ФОРМЫ

А. И. Комаров

Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (г. Екатеринбург, Россия)

В реферате рассмотрены отдельные методики и практические аспекты определения аэродинамического воздействия ветровых потоков на высотные объекты, здания и сооружения сложной формы в неодинаковых условиях ветрового районирования. Раскрыта актуальность дальнейшего исследования и совершенствования методик определения ветровых нагрузок при проектировании высотных зданий, зданий, сооружений уникальной формы. Описаны преимущества рассмотренных методик определения ветровой нагрузки при проектировании для обеспечения наибольшей надежности и безопасности проектируемых конструкций, сооружений.

Ключевые слова: вычислительные алгоритмы, количественная оценка, безопасность, расчеты, аэродинамическая труба, нагрузки, воздействия, конечные элементы, численное моделирование.

STUDY OF THE EXPERIENCE OF FOREIGN SCIENTISTS IN THE APPLICATION OF METHODS FOR DETERMINING THE WIND LOAD IN THE DESIGN OF HIGH-RISE BUILDINGS, BUILDINGS, STRUCTURES OF A UNIQUE SHAPE

Study of the experience of foreign scientists in the application of methods for determining the wind load in the design of high-rise buildings, buildings, structures of a unique shape

A. I. Komarov

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (Yekaterinburg, Russia)

The abstract considers separate methods and practical aspects of determining the aerodynamic impact of wind flows on high-rise objects, buildings and structures of complex shape in unequal conditions of wind zoning. The relevance of further research and improvement of methods for determining wind loads in the design of high-rise buildings, buildings, structures of a unique shape is revealed. The advantages of the considered methods for determining the wind load in the design to ensure the greatest reliability and safety of the designed structures and structures are described.

Keywords: computational algorithms, quantitative assessment, safety, calculations, wind tunnel, loads, impacts, finite elements, numerical simulation.

Введение

В настоящее время воплощение проектов по строительству зданий и сооружений сложной формы, уникальных зданий, высотных зданий, влечет за собой необходимость детальной оценки всей совокупности природных условий, оценки риска сложной технической системы. Данные обстоятельства диктуют повышенные требования, как к технологиям, используемым в строительстве уникальных зданий, зданий и сооружений сложных форм, высотных зданий; так и к учету природных воздействий, воздействий всех компонентов сложной технической системы. Особенное внимание при разработке проекта любого здания или сооружения, уделяется исследованиям ветровых воздействий и их влияния на несущий каркас. При проектировании уникальных зданий, зданий и сооружений сложных форм,

высотных зданий, перед инженером-проектировщиком встает вопрос в правильной оценке ветровой нагрузки на здание.

Обеспечение безопасности, надежности и комфортности проектируемых и уже эксплуатируемых высотных зданий современных архитектурных форм и оригинальных конструктивных решений и их комплексов в России и в других странах, для которых фактор ветрового воздействия является определяющим, возможно только при всестороннем изучении таких факторов, как влияние интерференции, рельефа, изменения спектра набегающего потока в условиях плотной и изменяющейся застройки; уточнения ветрового районирования; и практическом подтверждении путем проведения вычислений и применения физико-математических методов. Учет этих факторов требует использования современных методов в научно-техническом сопровождении при проектировании конструкций, сооружений.

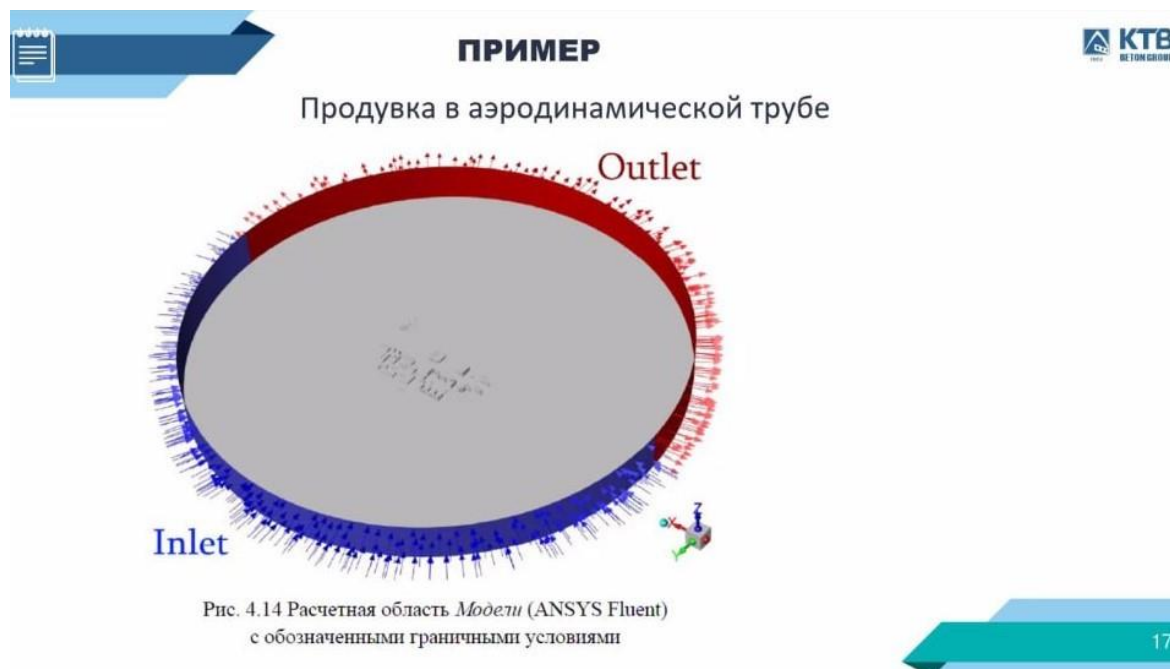
Рис. 1 [1].



Действующими нормами, регламентирующими осуществление градостроительной деятельности, а также инженерных изысканий, архитектурно-строительного проектирования и строительства (СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия.) допускается использовать экспериментальные данные на основе результатов испытаний крупномасштабных макетов зданий в специализированных аэродинамических трубах, позволяющих воспроизвести атмосферный пограничный слой. Для получения наиболее достоверных аэродинамических коэффициентов исследовательские и проектные организации в России и за рубежом все чаще

комбинируют испытания по продувке моделей конструкций в аэродинамических трубах и методы численного (компьютерного) моделирования.

Рис. 1 [2].



С целью изучения имеющихся исследований в области определения ветровых воздействий на высотные здания и их группы, выбора оптимальных (по соотношению затраченные ресурсы, точность полученных результатов) методологий построения расчетных сеток, моделей турбулентности, характеристик вычислительных алгоритмов применительно к рассматриваемым задачам и выбранному программному обеспечению; в процессе изучения проблемы повышения безопасности высотных зданий, зданий и сооружений сложной формы, рассмотрены опубликованные научные изыскания ученых зарубежных стран.

Применение методики численного моделирования уникального здания в Копенгагене

Одним из примеров уникальных зданий является здание делового центра, расположенное в городе Копенгаген (центральный офис Копенгагена). Учеными высокопроизводительной лаборатории моделирования Института архитектуры и технологии Датской Королевской академии изящных искусств (далее – ученые Датской академии) проведена оценка метода цифрового моделирования делового центра Копенгагена на этапе проектирования здания уникальной формы. Деловой центр Копенгагена был сконструирован в цифровом формате, а моделирование CFD было выполнено с использованием ANSYS Fluent.

За основную переменную величину было взято общее количество слоев окружающих зданий вокруг целевого здания, находящегося под наблюдением. Каждый слой определялся на основе фиксированных радиальных расстояний от целевого здания. Результирующее давление ветра на фасады и крышу целевого здания сравнивалось для разных номеров слоев, также сравнивался масштаб воздействия между номерами каждого слоя. Размер сетки и условия границ поддерживались постоянными для всех симуляций, где была принята реализуемая модель турбулентности $k-\epsilon$.

При проектировании зданий давление ветра на внешние поверхности здания является одним из ключевых факторов, поскольку оно оказывает непосредственное влияние на дизайн конструкций и элементов фасада. Исследования показали, что как +ve (ветер, дующий в сторону лица), так и -ve (ветер, дующий в сторону от лица) давления уменьшаются с увеличением окружающих слоев зданий, смоделированных в рамках моделирования. Согласно результатам, максимальное давление +ve снизилось примерно на 95% с модели радиусом 100 м до модели радиусом 200 м, а для модели радиусом 250 м была замечена лишь незначительная разница. Для давления -ve падение составило около 63% между моделями радиусом от 100 м до 250 м. Значительные различия в уровне давления между моделями показывают прямое влияние уровня окружающих зданий, включенных в моделирование. Окружающие здания определяют характерные свойства (направления и величины) ветра, когда он достигает целевого здания, и особенно для тех случаев, когда городские планы не представлены в ортогональных форматах сетки, становится более важным включить достаточное количество слоев окружающих зданий, чтобы получить результаты, которые соответствуют реальным условиям.

Исследованное учеными Датской академии влияние окружающих слоев здания на результирующие данные моделирования ветрового потока CFD было сосредоточено на городских планах с пониженной ортогональностью. Таким образом, для исследования был выбран участок центра Копенгагена и четыре модели, которые включают окружающие здания на основе заданных радиусов (100 м, 150 м, 200 м и 250 м) вокруг целевого здания. Следовательно, для моделирования ветрового потока CFD применительно к городскому контексту, окружающие здания в радиусе 200 м от целевого здания должны быть включены в модель, чтобы создать более близкие характеристики ветра к фактическому месту. При проектировании уникальных зданий целесообразно проводить дополнительные исследования с использованием различных моделей турбулентности и типов сеток, основанных на различных городских контекстах в отношении геометрических (включая различную высоту зданий) и сеточных характеристик окружающих зданий.

Результаты показывают, что уровень окружающих слоев здания оказывает значительное влияние на решаемые данные; максимальное давление ветра + 5 в от модели с радиусом 100 м до 250 м снижается на 95%. Кроме того, характеристики ветра на уровне пешеходов (высота 1,5 м от земли) показали существенные различия.

Исследованный в статье метод определения ветровых воздействий на высотные здания и их группы, взятые в процессе цифрового моделирования за основу показатели, позволяют сделать вывод, что окружающие слои здания оказывают значительное влияние на характеристики ветра, что приводит к значительному снижению давления ветра на фасад целевого здания и скорости ветра на уровне пешеходов.

Применение учеными Университета Тунцзи в исследованиях киборг-физической аэродинамической трубы

Существенно новым и значимым этапом в области определения ветровых нагрузок является формирование комплексной методики для практических расчетов ветровых воздействий на высотные здания, уникальные сооружения, комплексы сооружений. Значительных шагов в формировании данной методики достигли ученые Университета Тунцзи (Китайской Народной Республики). Китайскими учеными предложена новая модель, называемая киборг-физической аэродинамической трубой (CPWT). CPWT разработана на основе операционной платформы физических вычислений с открытым исходным кодом, в своей работе использует общую характеристику основных компонентов окружающей среды. Киборг-физическая структура соединяет киберпространство и физический мир для мониторинга, координации и управления физическими операциями с помощью вычислительных алгоритмов и коммуникационных технологий.

Эта цифро-физическая платформа динамического моделирования работает с обратной связью по данным для выполнения интерактивного генеративного проектирования в реальном времени на основе характеристик окружающей среды. Система восприятия данных платформы использует датчики для восприятия давления и скорости ветра и преобразования их в распознаваемые электрические сигналы для ввода в компьютерную систему обработки. Измерения можно разделить на три категории: (1) распределение ветрового давления; (2) распределение скорости ветра; (3) нагрузочные характеристики тестируемой модели. Используя миниатюрный датчик, исследователи могут воспринимать параметры окружающей среды, количественно преобразовывать идентифицируемые электрические сигналы и в дальнейшем преобразовывать их в полезные данные с помощью функций.

Ядром системы динамического управления, управляющей приводом и датчиком, является электронная платформа управления с открытым исходным кодом. Устройство использует электронный сигнал, генерируемый установленным датчиком, для управления

серводвигателем и выполнения движения рулевого механизма для приведения в действие механической коробки передач, которая принимает различную форму.

Вся система управления состоит из следующего: блока связи; блока управления подъемным механизмом; блока управления механизмом поворота; блока сбора данных датчика; и блока питания. Благодаря передаче данных и управлению с обратной связью реализуется кластерная форма здания в режиме реального времени, основанная на системе «зондирование-передача-миссия-обратная связь». CPWT обеспечивает сопоставление физических (скорость ветра, давление ветра и температура ветра) и цифровых данных в реальном времени, вычисление грамматической базы данных и преобразование сетки.

Большая масса зданий и замкнутое городское пространство влияют на воздушный поток динамики в городском пограничном слое, вызывающей образование отдельных и обратных ветров вокруг здания и увеличивающей скорость ветра. Некоторые существующие исследования показали, что планировка здания, высота и форма фасада, размер проема и угол между зданием и направлением ветра могут влиять на ветровую среду вокруг здания вдоль геометрического края плоскости здания. Колебания скорости ветра в угловой области будут уменьшены, в то время как скручивание и масштабирование по высоте будут направлять поток ветра.

Несомненно, создание морфологии здания на основе ветровых характеристик на базе CPWT является новым ценным методом проектирования, полученным путем сочетания экологических характеристик с выводом архитектурной формы. Тем не менее, существуют также некоторые проблемы и ограничения, касающиеся этой платформы CPWT: 1) CPWT является маломасштабным, недорогим и простым в изготовлении устройством, что объясняет более низкую точность моделирования по сравнению с традиционной аэродинамической трубой и CFD; 2) надежность входных профилей является ключевым предварительным условием надежности полученных измеренных данных. Следовательно, универсальность применения алгоритма глубокого изучения в CPWT должна быть повышена. Данная область исследования перспективна для дополнительного изучения и оптимизации.

Особенности определения ветровой нагрузки при проектировании конструкций, с применением систем с аутригерами для высотных зданий

Объемно – пространственные решения высотных зданий складываются из градостроительных ситуаций объектов проектирования (локальных, групповых и массовых). Особое влияние оказывает нахождение объекта в исторической зоне сложившейся застройки. Также большое влияние на формообразование и планировочные решения объекта оказывает

форма участка строительства (угловое, рядовое или островное). Важное значение при формировании объёмно-планировочного решения здания, имеют климатические зоны предполагаемого строительства: архитектура фасадов по странам света, применение гелиотропного остекления, устройство ветровых генераторов в соответствии с направлением господствующих ветров.

Частным примером определения ветровой нагрузки методом численного моделирования является расчет ветрового давления на высотные здания в универсальной программной системе анализа методом конечных элементов ANSYS (далее – ANSYS).

Учеными Государственной ключевой лаборатории уменьшения опасности бедствий в гражданском строительстве Университета Тунцзи Китайской Народной Республики (далее – КНР) совместно с учеными кафедры гражданского строительства и охраны окружающей среды Университета Иллинойса в Соединенных Штатах Америки проведено исследование по расчету ветрового давления на конструкции, проектируемые с применением систем с аутригерами для высотных зданий. Особенностью данного исследования является применение при расчетах метамоделей кригинга, разработанной для использования расчета хрупкости высотных зданий с тремя типами систем аутригеров. Оценка хрупкости высотных зданий с системами аутригеров дает количественную оценку эффективности систем амортизирующих аутригеров в улучшении характеристик высотных зданий и уменьшении их уязвимости при ветровой нагрузке.

Система аутригеров позволяет значительно увеличивать высоту высотных зданий за счет улучшения поперечной жесткости. Общими компонентами аутригера являются: ядро/рама, выносные опоры с амортизаторами или без них и колонны по периметру, которые объединены в большую раму. В большой раме взаимодействие между периметральными колоннами и выносными опорами (с демпферами или без них) создает полезный сдерживающий момент, который рассматривается как эквивалентная вращательная жесткость и эквивалентное демпфирование, действующее на сердечник/раму. Это основной механизм действия системы аутригеров.

По мере развития исследований обычные системы выносных опор были усовершенствованы, чтобы стать системами выносных опор с демпфированием для адаптации к изменяющимся условиям (в основном, сейсмических и ветровых опасностей), которые могли смягчить повреждения и повысить устойчивость при небольших повреждениях высотных зданий. Из-за лучшего рассеивания энергии акцент в текущих исследованиях систем с выносными опорами делается на системах с выносными опорами с демпфированием и большинство из них индивидуальны. Однако прогностические модели для структурных реакций высотных зданий с системами аутригеров, которые являются объективными и

учитывают соответствующие неопределенности, в литературе отсутствуют. Кроме того, на основе прогностических моделей (здесь — метамоделей кригинга) оценка рисков для высотных зданий с системами аутригеров становится значительно проще. С помощью прогностических моделей в случае возникновения какой-либо опасности инженеры могли бы немедленно получить максимальную реакцию и соответствующие факторы уязвимости в высотных зданиях и быстро заменить уязвимые выносные опоры и/или амортизаторы на новые.

Методы анализа систем аутригеров включают конечные элементы, численные упрощенные модели и экспериментальное моделирование. Модели кригинга используются, в том числе, для разработки оценок хрупкости, которые количественно определяют эффективность систем аутригеров. В метамоделах кригинга учитываются три представляющие интерес величины отклика: дрейф между ярусами, ускорение кровли и смещение кровли. На основе входной информации строятся трехмерные конечно-элементные модели и проводится нелинейный временной анализ с использованием ANSYS. Указанная база данных позволяет сформулировать метамоделей кригинга для трех величин реагирования высотных зданий с тремя типами систем аутригеров при трех типах опасностей. Эти прогностические модели фиксируют соответствующие неопределенности и обеспечивают несмещенные оценки. В ходе анализа чувствительности выдается информация о наиболее чувствительных входных параметрах, что может помочь улучшить предлагаемые модели в будущей работе. Следующим этапом используются метамоделей кригинга для построения оценок хрупкости высотных зданий без какого-либо дополнительного анализа методом конечных элементов, что представляет собой значительную экономию вычислительных затрат по сравнению с традиционными методами расчета оценок хрупкости высотных зданий.

Заключение

Традиционным методом оценки ветровой ситуации вблизи комплексов зданий и сооружений сложной формы являются экспериментальные исследования в аэродинамических трубах на моделях строящихся объектов. Альтернативным подходом к решению данных проблем является численное (компьютерное) моделирование движения воздушных потоков на ЭВМ, основанное на решении уравнений движения воздуха. Математическое моделирование имеет по сравнению с физическим экспериментом ряд преимуществ: меньшая стоимость работ и более сжатые сроки их выполнения; возможность получения более подробной информации о распределении давления по поверхности зданий и о поле скоростей вокруг зданий; возможность быстрого перебора различных вариантов формы проектируемых зданий для сравнительного анализа ветровой ситуации.

Учет ветровых воздействий очень важен для обеспечения надежности, безопасности проектируемых уникальных зданий, зданий и сооружений сложной формы, высотных зданий. Численное моделирование при определении ветровых нагрузок при осуществлении научно-технического сопровождения при проектировании конструкций, сооружений, позволяет заранее спрогнозировать возникновение всех возможных неблагоприятных ситуаций и предложить мероприятия по их устранению или по снижению их вредного воздействия. Взаимодействие групп зданий и влияние их расположения на характеристики ветровых воздействий остается малоизученным.

Проектируемые здания, сооружения имеют различные формы, расположены в разных ветровых районах, аэродинамическая характеристика каждого уникальна, что делает ее определение весьма сложным процессом. Поэтому для получения наиболее достоверных аэродинамических коэффициентов исследовательские и проектные организации в России и за рубежом все чаще комбинируют испытания по продувке моделей конструкций в аэродинамических трубах и методы численного (компьютерного) моделирования. Контроль корректности выполненных расчетов на этапе проектирования должен осуществляться с использованием различных программных средств, методик и расчетных схем. Основная задача научно-технического сопровождения – обеспечение безопасности при проектировании и строительстве любых зданий и сооружений, поэтому должны быть рассмотрены все возможные расчетные ситуации и проанализированы все результаты.

-
1. Дубинский С.И. Материалы презентации к семинару Эффективное проектирование. «Особенности ветровых воздействий на здания и сооружения» от 03.05.2023.
 2. Баглаев Н.Н. Материалы презентации к семинару Эффективное проектирование. «Особенности ветровых воздействий на здания и сооружения» от 03.05.2023.

Библиографический список

1. Леденев, П. В. Определение ветровых воздействий на навесные фасадные системы с учетом влияния вентилируемой воздушной прослойки : специальности 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения», 05.23.03 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Леденев Павел Викторович ; Научно - исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук ; Научно - исследовательский институт механики Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова. – Москва, 2011. – 23 с. Библиогр.: с. 21 – 23.

2. Материалы семинара Эффективное проектирование // Особенности ветровых воздействий на здания и сооружения / 03.05.2023 : [сайт]. — URL: <https://www.youtube.com/watch?v=IPi9SUAitxY> (дата обращения: 03.05.2023).
3. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85 : свод правил : утвержден и введен в действие Приказом Министерства регионального развития Российской Федерации от 27 декабря 2010 г. N 787/пр : пересмотр СП 20.13330.2011 : дата введения 2011-05-20 / подготовлен Департаментом архитектуры, строительства и градостроительной политики Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов Консорциума «Кодекс» : [сайт]. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200084848> (дата обращения: 27.11.2022).
4. An architectural building cluster morphology generation method to perceive, derive, and form based on cyborg-physical wind tunnel (CPWT) / S. H. Beh, Y. Chao, S. Huang, Y. Lin, Y. Song, Z. Wu, T. Xiao, P. F. Yuan, J. Zheng // Building and Environment. — 2021. — No. 203. — Pp. 108045. ScienceDirect journal : [сайт]. — 2021. — URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132321004479> (дата обращения : 24.11.2022).
5. Gardoni, P., Xing, L., Zhou, Y. Kriging metamodels for the dynamic response of high-rise buildings with outrigger systems and fragility estimates for seismic and wind loads // Resilient Cities and Structures. — 2022. — No. 1 (1). — Pp. 110-122. ScienceDirect journal : [сайт]. — 2021. — URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772741622000072> (дата обращения : 24.11.2022).
6. Lee, D. S.-H. Impacts of surrounding building layers in CFD wind simulations / Daniel Sang-Hoon Lee // Energy Procedia. — 2017. — No. 122. — Pp. 50-55. ScienceDirect journal : [сайт]. — 2021. — URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217329119> (дата обращения : 25.11.2022).