

На правах рукописи

ДУБИНСКИЙ Сергей Иванович

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЕТРОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ
НА ВЫСОТНЫЕ ЗДАНИЯ И КОМПЛЕКСЫ**

Специальность 05.13.18 –
математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Московский государственный строительный университет.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Белостоцкий Александр Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Травуш Владимир Ильич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Попов Николай Александрович

Ведущая организация: **НИИ Механики МГУ,**
г. Москва

Защита диссертации состоится «29» ИЮНЯ 2010 г. в 16
часов на заседании диссертационного совета Д 212.138.12 при ГОУ ВПО
Московский государственный строительный университет по адресу: 129337,
г. Москва, Ярославское шоссе, д.26, ауд. 420. УЛК

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО
Московского государственного строительного университета.

Автореферат разослан «28» ИЮНЯ 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Анохин Н.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Обоснование безопасности и комфортности проектируемых и уже эксплуатируемых высотных зданий современных архитектурных форм и оригинальных конструктивных решений и их комплексов в России (ММДЦ "Москва-Сити", ЖК "Акварин" во Владивостоке и ряда других), для которых фактор ветрового воздействия является определяющим, сдерживается действующими нормативно-регламентированными методиками, которые не содержат рекомендаций по назначению аэродинамических коэффициентов для сложных по форме высотных зданий, не учитывают влияние интерференции, рельефа, изменения спектра набегающего потока в условиях плотной и изменяющейся застройки.

Нормами (СНиП 2.01.07-85* «Нагрузки и воздействия», МДС 20-1.2006 «Временные нормы по назначению нагрузок и воздействий ... на многофункциональные высотные здания и комплексы в Москве») предлагается использовать результаты испытаний крупномасштабных макетов в специализированных аэродинамических трубах, позволяющих воспроизвести атмосферный пограничный слой. Но такие испытания весьма трудоемки, причем для наиболее масштабных моделей их приходится выполнять за рубежом. Кроме того, методология экспериментального моделирования ветровых потоков и воздействий на высотные комплексы обладает собственными ограничениями и погрешностями.

В последние 10-15 лет бурно развивается вычислительная гидрогазодинамика (CFD), совершенствуются технологии расчетов ветровых воздействий на здания и сооружения при неуклонно возрастающей мощности компьютеров. Ведущие зарубежные исследовательские и проектные организации все чаще комбинируют испытания и "численные" эксперименты. В перспективе роль математического моделирования, как показал опыт в смежных отраслях (например, аэрокосмической) и задачах (строительная механика), будет только возрастать.

Разработка, программная реализация и применение верифицированной методики, основанной на численном решении трехмерных уравнений гидрогазодинамики, позволит отечественным специалистам определять ветровые воздействия на высотные комплексы с необходимыми достоверностью, полнотой и оперативностью.

Цели и задачи работы. Целью работы являлась разработка, программная реализация и верификация методики расчета ветровых воздействий на высотные здания и комплексы на основе численного решения задач гидрогазодинамики, позволяющей оперативное многовариантное решение большиеразмерных практических задач строительного проектирования и мониторинга в форме вычислительного эксперимента.

Исходя из поставленной цели работы, решались следующие задачи:

- Анализ результатов отечественных и зарубежных теоретических и экспериментальных исследований ветровых воздействий на высотные здания и их комплексы в условиях, прежде всего, их компактного расположения и

интерференции, а также анализ применимости существующей нормативной базы;

- Анализ и тестирование существующих методологий численного моделирования задач гидрогазодинамики и выбор программных средств с точки зрения их применимости к решению поставленных задач;

- Разработка комплексной методики расчета ветровых воздействий на высотные здания-комплексы, основанной на численном моделировании уравнений гидрогазодинамики и обеспечивающей решение с единых позиций регламентируемых нормами задач: расчета средней и пульсационной составляющих ветровых нагрузок на несущие конструкции, определения пиковых давлений на ограждающие конструкции, оценки уровня комфортности в пешеходных зонах комплексов.

- Выбор наилучших (по соотношению "ресурсы-точность") методологий построения расчетных сеток, моделей турбулентности, характеристик вычислительных алгоритмов применительно к данному классу задач и выбранному базовому программному комплексу (ПК);

- Разработка "инженерной" методики оценки пульсационной составляющей давления и пиковых нагрузок на фасадные конструкции по результатам стационарных расчетов;

- Разработка процедур передачи ветровых нагрузок в программы расчетов динамики и прочности конструкций, зданий и сооружений;

- Реализация вышеупомянутых методик в форме единого программного модуля – надстройки над базовым ПК;

- Верификация разрабатываемой методики и реализующего программного обеспечения на основе сравнения результатов расчетов с результатами испытаний в аэродинамических трубах и с данными натурных замеров на представительном наборе примеров;

- Применение разработанной методики и программного обеспечения для определения ветровых воздействий на реальные проектируемые и строящиеся высотные комплексы;

- Обучение студентов и аспирантов теоретическим основам и практическому применению разработанной методики.

Исследования проводились в рамках работ по Проекту 2.1.2/6414 аналитической ведомственной целевой программы "Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 годы)".

Научная новизна работы.

- Разработана и верифицирована методика определения ветровых воздействий на высотные здания и их группы на основе решения уравнений Навье-Стокса в приближении Рейнольдса (модели турбулентности RANS, URANS и DES) с применением метода конечных объемов, позволяющая адекватно учитывать ключевые факторы – направления и профиль ветровых потоков, рельеф местности, окружающую застройку и поэтапность возведения комплексов – и обеспечивающая успешное практическое решение регламентируемых отечественными нормами задач (расчета средней и пульсационной составляющей нагрузок на несущие конструкции, определения

пиковых давлений на ограждающие конструкции, оценки уровня пешеходной комфортности).

- Разработана методика оценки пульсационной составляющей давления и пиковых нагрузок на фасадные конструкции по результатам стационарных расчетов осредненной энергии турбулентных пульсаций и с учетом осредненных коэффициентов обеспеченности и корреляции.

- Разработана методология проблемно-ориентированного программного модуля для проведения вариантовных вычислительных экспериментов, позволяющего в автоматизированном режиме формировать полный программный код для всех этапов расчета.

Практическая значимость работы.

- Разработанные в диссертации методика математического моделирования и вычислительного эксперимента, а также реализующие ее программные средства обеспечивают приемлемую практическую точность, позволяют существенно уменьшить временные ресурсы на выполнение расчетов ветровых воздействий (средняя и пульсационная составляющие нагрузок на несущие конструкции, пиковые давления на фасадные конструкции, оценка уровня пешеходной комфортности) на высотные здания-комплексы;

- Полученные с использованием разработанной методики результаты могут быть применены для верификации аналогичных технологий расчета и специализированных программных комплексов, а также для “настройки” вновь вводимых в эксплуатацию аэродинамических труб, для повышения эффективности, сокращения сроков испытаний и оптимального размещения датчиков;

- Методика позволяет создание справочной базы данных по аэродинамическим параметрам для типовых форм высотных зданий, допускающей использование совместное с программными комплексами расчетов динамики и прочности конструкций;

- Методика может быть использована в составе систем мониторинга перемещений и ускорений высотных зданий и комплексов для повышения эффективности их работы;

- Методика может быть применена для определения ветровых воздействий на произвольные классы сооружений, включая транспортные.

Внедрение:

- Методика и программное обеспечение применяются в Научно-образовательном центре компьютерного моделирования (НОЦ КМ) МГСУ и Научно-исследовательском центре “СтаДиО” для практических расчетов реальных высотных зданий и комплексов застроек;

- Разработанная методика используется в практике обучения студентов кафедры “Информатика и прикладная математика” МГСУ по дисциплине “Вычислительная аэрогидромеханика”, а также аспирантов, прикрепленных к НОЦ КМ МГСУ для выполнения диссертационных исследований.

Личный вклад соискателя. Все исследования, изложенные в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. Из совместных публикаций в диссертацию включен лишь тот

материал, который непосредственно принадлежит соискателю.

На защиту выносятся:

- Методология численного моделирования ветровых воздействий на высотные здания и их группы, обеспечивающая успешное практическое решение регламентируемых отечественными нормами задач (расчета средней и пульсационной составляющей ветровых нагрузок, определения максимальных давлений на ограждающие конструкции, оценки уровня пешеходной комфортности);

- Методика оценки пульсационной составляющей давлений и максимальных расчетных нагрузок на фасадные конструкции по результатам стационарных расчетов энергии турбулентных пульсаций и с учетом осредненных коэффициентов обеспеченности и корреляции;

- Методология проблемно-ориентированного программного модуля для проведения вариантных вычислительных экспериментов, позволяющего в автоматизированном режиме формировать полный программный код для всех этапов расчета, для анализа и оформления результатов расчета, а также для передачи ветровых нагрузок в пакеты "прочностных" расчетов в качестве исходных данных;

- Методология формирования расчетных аэродинамических моделей высотных сооружений и их комплексов в составе застройки.

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

- использованием апробированного математического аппарата (математические модели теории аэромеханики и механики деформируемого твёрдого тела) и численных методов решения;

- применением апробированных в мировой практике технологий аэродинамических расчетов широкого круга задач машиностроения и строительства и верифицированного лицензионного программного комплекса ANSYS CFX, их реализующего;

- успешным решением с использованием разработанной методики представительного набора верификационных тестовых задач;

- согласованием получаемых результатов с данными расчетов авторитетных отечественных и зарубежных специалистов, использующих иные методики и программные средства;

- согласованием с результатами экспериментальных исследований в аэродинамических трубах и данными натурных замеров для реальных зданий и застроек.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на симпозиумах Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН) «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» (Нижний Новгород, 2007 и Пермь, 2008), на конференциях «Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы» (Москва, МГСУ, 2008, 2009 гг.), на научных семинарах НОЦ КМ МГСУ "Актуальные проблемы компьютерного моделирования зданий, сооружений и комплексов" (в декабре

2009 и феврале 2010), а также на конференциях и семинарах пользователей ПК ANSYS (2001-2002, 2004-2008 гг.) и ПК SCAD в г. Москва (2006-2009 гг.) и в г. Киев (2008 г.).

Публикации. По тематике диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 7 работ в изданиях, включенных ВАК в перечень рекомендуемых.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав (с выводами по каждой главе), заключения, списка литературы (194 наименования, в том числе – 110 на иностранных языках), 99 рисунков и 11 таблиц. Общий объем диссертации – 198 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обоснование актуальности работы, определены проблемы, цели и задачи исследований, перечислены основные научные и практические результаты, приведено краткое содержание диссертации по главам.

В первой главе дается аналитический обзор современного состояния вопросов определения ветровых воздействий (нормативного, натурно-метеорологического, экспериментального и численного) на высотные здания и их комплексы. Представлен анализ отечественной нормативной базы в ее развитии и опыта практических расчетов на ветровые нагрузки (Э.И. Реттер, А.Г. Соколов, Г.А. Савицкий, И.М. Беспрозванная, Ф.Л. Серебровский, А.И. Цейтлин, А.С. Бернштейн, М.Ф. Барштейн, Б.Г. Корнев, М.И. Казакевич, А.А. Петров, Н.А. Попов, В.И. Травуш, А.В. Перельмутер, Б.В. Остроумов и др.). Из зарубежных исследований можно отметить вклад A.G. Davenport, E. Simiu, R. H. Scanlan, N.J. Cook, Y. Tamura, A. Kareem, J.D. Holmes, G. Solari и др.

Анализируются существующие отечественные и зарубежные экспериментальные оценки ветровых нагрузок на здания и комплексы (Р.А. Irwin, A.G. Davenport, Н.А. Попов, М.А. Березин, А.Б. Айрапетов, С.В. Гувернюк, В.Г. Гагарин, Б.В. Остроумов, Ю.В. Табунщиков, С.Г. Кузнецов и др.). Рассмотрены особенности аэродинамических испытаний и ветровой аэродинамики высотных зданий в условиях их компактного расположения и интерференции на примере сооружений ММДЦ “Москва-Сити”. Обсуждаются реальные ветровые режимы для гг. Москвы и Владивостока и нормативное районирование (Л.Е. Анапольская, М.М. Борисенко, Н.А. Дашко и др.).

Кратко описана история математического моделирования задач гидрогазодинамики. Рассмотрены как классические работы (И. Ньютон, Д. Бернулли, Ж.Л. Даламбер, О. Рейнольдс, Д. Стокс, Н.Е. Жуковский, Л. Прандтль, Т. фон Карман, А.Н. Колмогоров, Л.И. Седов, Л.Г. Лойцянский, Г. Шлихтинг и др.), так и современные отечественные (М.Х. Стрелец, Е.М. Смирнов, С.А. Исаев, А.Е. Усачов, И.К. Лифанов, О.М. Белоцерковский, С.В. Гувернюк, А.В. Атаманчук, В.Я. Шкадов, В.Н. Варапаев и др.).

Изучены существующие методические рекомендации по численному моделированию ветровой аэродинамики (J. Franke, С.P.W. Guerts, A.Mochida). Анализируются возможности существующих программных комплексов (ПК) и

опыт расчетов ветровых воздействий (Stathopoulos, Blocken, Carmeliet, Bitsuamlak, Meroney, Franke, Kai Fan Liaw, F.Menter, R. Stangroom, С.В. Гувернюк, С.А. Исаев и др.). Отмечено, что применение наиболее мощных и признанных ПК (в частности, ANSYS CFX, ANSYS FLUENT, STAR-CD, PHOENICS) обеспечивает успешное решение практических задач.

Обосновывается необходимость разработки специализированного программного модуля, учитывающего особенности расчетов ветровых воздействий на высотные здания и комплексы.

Во второй главе описана разработка комплексной методики численного моделирования ветровых воздействий на высотные здания и их компактно расположенные группы.

Расчеты ветровых потоков и воздействий сводятся к численному решению трехмерных нестационарных нелинейных уравнений гидрогазодинамики в постановке Навье-Стокса:

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

Кроме того, должны удовлетворяться уравнения неразрывности (сохранения массы) и состояния:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} &= 0 \\ p &= \rho RT \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь u, v, w – искомые компоненты вектора скорости (по осям x, y, z), p – давления, t – время, μ – динамический коэффициент вязкости для воздуха, ρ – плотность, R – универсальная газовая постоянная, T – температура.

Для упрощения моделирования ветровые потоки предполагаются несжимаемыми и изотермическими, массовые силы не учитываются.

Прямое решение уравнений (1-3) с учетом вихрей всех масштабов (DNS, Direct Numerical Simulation) при современных возможностях ЭВМ практически реализуемо только для очень малых скоростей потока и чисто исследовательских задач. Поэтому, в современной расчетной практике доминирует полуэмпирический подход, основанный на разложении скорости на осредненную во времени и пульсационную составляющие $u_i(t) = \bar{u}_i + u'_i(t)$ и переходе к решению т.н. "осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса" (Reynolds averaged Navier-Stoks Method, RANS):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i \cdot \bar{u}_j) &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right], \\ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} &= 0, \quad \frac{\partial \bar{u}'_i}{\partial x_i} = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где \bar{p} – средние давления, индексы $i=1,2,3$ и $j=1,2,3$ соответствуют координатам x,y,z . Сдвиговые (рейнольдсовы) напряжения $\rho \overline{u'_i u'_j}$ являются дополнительными шестью неизвестными к параметрам осредненного движения ($\overline{u_i}, \bar{p}$) и аппроксимируются, как правило, по гипотезе Буссинеска:

$$\rho \overline{u'_i u'_j} = -\mu_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, \quad (5)$$

где μ_t – дополнительная вязкость, вызванная пульсациями; k – осредненная энергия турбулентных пульсаций (ТКЕ). Система является незамкнутой и требует дополнительных соглашений ("моделей турбулентности").

Важным аспектом решения уравнений Навье-Стокса является схема дискретизации. Наиболее эффективным в настоящее время признан "метод конечных объемов" (МКО), не требующий столь детального моделирования пограничного слоя, как метод конечных элементов (МКЭ), и более удобный при описании сложных расчетных областей реальных застроек, чем метод конечных разностей. Современные подходы (схемы адвекции второго порядка, применение пристепенных функций и увеличение числа точек интегрирования в ячейке) значительно снижают требования к расчетной сетке и ресурсам ЭВМ.

Решение уравнений (4) может проводиться как в стационарной, так и в нестационарной постановке. Стационарная задача сводится к итерационному решению редкозаполненной системы линейных алгебраических уравнений, с узловыми давлениями, компонентами скоростей и мерами локальной турбулентности (в частности, ТКЕ) в качестве неизвестных. Определяются осредненные во времени величины, число которых для рассматриваемых объектов/задач может достигать сотен миллионов. Итерационный процесс решения системы проводится по связанной многосеточной схеме (coupled multigrid) и считается сошедшимся при малых относительных невязках решения системы. Для улучшения сходимости в качестве предобуславливателя используется неполное треугольное (ILU) разложение матрицы.

К сожалению, точность (и даже сходимость) стационарных расчетов RANS в ситуациях с развитым вихреобразованием не всегда удовлетворительна. Проведенное представительное тестирование на широком круге практических задач (включая сравнение с данными испытаний в аэродинамических трубах) позволило определить наиболее пригодную для данного класса задач модель турбулентности. Модель SST (Shear Stress Transport, перенос сдвиговых напряжений, F.Menter, 1993), комбинируя достоинства классических моделей "k-ε" и "k-ω", обеспечивает достаточную точность результатов и эффективную сходимость итерационного процесса даже при относительно грубых сетках и умеренном разрешении пограничного слоя.

Выработаны рекомендуемые размеры расчетной области – минимум 10 высот "господствующего" задания во всех направлениях. Рассмотрены варианты построения сетки в расчетной области и типы ячеек-элементов.

В качестве характеристик набегающего потока используются профили скорости ветра и характеристик турбулентности (интенсивность и масштаб

вихря), отвечающие заданным ветровым районам и типам местности по СНиП 2.01.07-85*. Предлагается в качестве "внешних" граничных условий для расчетной области использовать "мягкие" условия по Нейману (равенство нулю производных).

Для учета шероховатости стенок рекомендуется вместо подбора пристеночных функций или коррекции их стандартных параметров применять по возможности "натуральное" моделирование (учет в модели рельефа местности, балконов и оконных проемов и т.п.).

Предложена и апробирована следующая схема расчетных исследований:

1) по результатам стационарных расчетов для всех направлений ветра определяются наиболее благоприятные направления по максимальным значениям средних нагрузок и максимальной энергии турбулентных пульсаций на поверхностях; для этих направлений выполняется уточненный расчет при сгущенной сетке и/или с применением схем автоматической адаптации;

2) для этих направлений выполняется нестационарный расчет; при существенном отличии средних значений может оказаться необходимым выполнить нестационарные расчеты для многих или "всех" направлений ветра. Нестационарные расчеты также следует выполнять для направлений, при которых стационарный расчет указывает на возникновение "стоячей волны".

Нестационарные расчеты RANS (Unsteady RANS, URANS) также не всегда позволяют правильно отследить срывные потоки. В этой связи наиболее активно в настоящее время развиваются "гибридные" подходы. При DES-подходе (моделировании "отсоединенных" вихрей, Detached Eddy Simulation, M.X. Стрелец и P.R. Spalart, 1997) комбинируются LES (моделирование крупных вихрей, Large Eddy Simulation) и URANS, что позволяет во много раз уменьшить трудоемкость расчетов по сравнению с "классическим" LES. Вихри в пограничном слое и вблизи него моделируются интегрально, отсоединенные вихри предлагается моделировать детально (аналогично LES), применяя достаточное разрежение сетки. При подходе SAS (Scalable Adaptive Simulation, Menter, Egorov, 2005) комбинируются уже DES и URANS, в процессе нестационарного расчета гибко изменяется предельный размер учитываемых вихрей.

Неявные схемы интегрирования позволяют применять временной шаг с числами Куранта $Co > 3$ при условии отслеживания отклика системы. Для нестационарных расчетов необходима генерация нестационарного поля скоростей ветра со средними и спектральными характеристиками, отвечающими заданной высоте и ветровому району. Используется суммирование гармонических функций со случайными фазами согласно выражению:

$$u(t) = \sum_{k=1}^N [2 \cdot S_k(f_k) \cdot \Delta f]^{1/2} \cos(2\pi f_k t + \phi_k), \quad (6)$$

где: N – количество частот, для которых рассчитывается спектр $S(f)$, Δf – заданное приращение (шаг) для частот; текущая частота $f_k = k \cdot \Delta f$, t – время, угол ϕ – случайная величина, равномерно распределенная в диапазоне $[0; 2\pi]$.

Ввиду крайней трудоемкости вариантных нестационарных расчетов для минимизации их объема предлагается практическая методика оценки и пиковых расчетных нагрузок на фасадные конструкции (P^*_{max} и P^*_{min}) по результатам стационарных расчетов энергии турбулентных пульсаций TKE и с учетом осредненных коэффициентов обеспеченности θ_{max} и θ_{min} . Пульсационная составляющая нагрузок на конструкцию может быть получена в результате интегрирования по поверхности пульсационной составляющей давлений $P_{пульс}$.

Приведем основные расчетные соотношения методики:

$$\begin{aligned} TKE &= 3/2 (I \cdot V)^2 = 3 \cdot P / \rho \cdot I^2 \\ I &= (\rho \cdot TKE / \text{abs}(P)/3)^{1/2}, \sigma_p = (I^2 + 2 \cdot I) \cdot \text{abs}(P) \\ P^*_{max} &= P \cdot (1 + \sigma_p \cdot \theta_{max}), P^*_{min} = P \cdot (1 - \sigma_p \cdot \theta_{min}) \\ P_{пульс} &= (P^*_{max} - P^*_{min}) \cdot v/2 \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь: σ_p – среднеквадратичное отклонение (стандарт) давлений P , I – интенсивность турбулентности (стандарт пульсаций скорости), V – локальная скорость ветра, v – коэффициент корреляции давлений на поверхностях (по СНиП 2.01.07-85*, либо вычисленный из анализа нестационарных результатов).

Для предварительных расчетов можно принять $\theta_{min}=6$ и $\theta_{max}=3$ (по рекомендациям А. Davenport, 2005); уточнение значений выполняется по результатам аналогичных нестационарных расчетов по соотношениям:

$$\theta_{max} = (P_{max} - P) / \sigma_p, \theta_{min} = (P - P_{min}) / \sigma_p, \quad (8)$$

где P_{max} , P_{min} и P – вычисленные значения минимумов, максимумов и среднего давлений в точке поверхности, σ_p – стандарт давлений.

Высокие скорости ветра, образующиеся вокруг высотного здания, неблагоприятно воздействуют на человека, особенно при низких температурах, а в некоторых случаях являются опасными. В этой связи, нормативные документы МДС 20-1.2006 требуют, чтобы скорость ветра (в порывах на уровне 1.5 м) превышала $V_{cr1}=6$ м/с не чаще $K_{cr1}=1000$ часов в год (1-й уровень комфортности); превышала $V_{cr2}=12$ м/с не чаще $K_{cr2}=50$ часов в год (2-й уровень комфортности); превышала $V_{cr3}=20$ м/с не чаще $K_{cr3}=5$ часов в год (3-й уровень комфортности). После проведения численного моделирования для “всех” направлений ветра (как правило, $j=1, \dots, 24$) “время дискомфорта l -го уровня” $K_{cr,l}$ ($l=1,2,3$) для представительного набора точек пешеходных зон определяется соотношениями:

$$K_{cr,l} = \sum S_{ij} T_{ij}, \quad V_{ij} = V_j / V_{10} (V_j + \theta \cdot I) \quad (9)$$

где: $V_i=1,2,3, \dots$ V_i^{max} – скорости в таблице метеоданных (“розе ветров”); T_{ij} – продолжительность (по метеоданным, часов в год) ветрового воздействия направления j и средней скорости V_i ; V_j – средняя скорость ветра в данной точке согласно расчету для направления j при скорости V_{10} на высоте 10 м; V_j – максимальная скорость в точке в порывах при скорости ветра V_i ; θ – коэффициент обеспеченности по заданию на расчет (обычно в диапазоне от 1 до 3); S_{ij} – признак (0 или 1) превышения локальной скоростью ветра в точке критического значения $V_{cr,l}$ для данного уровня комфорта l .

В главе 3 описана структура и возможности специализированного программного модуля WINDLOAD/CFX, реализующего разработанную

численную методику.

В качестве основного расчетного инструмента выбран лицензионный универсальный ПК ANSYS, установленный в МГСУ и допускающий также проведение (в развитие диссертационных исследований) прочностных и связанных аэроупругих расчетов.

Поскольку расчеты на ветровые воздействия требуют задания множества нестандартных (для универсальных расчетных программ) параметров расчета и опций, определено, что для повышения эффективности вариантных расчетов и минимизации ошибок ввода наиболее целесообразно программно формировать текстовый стартовый файл, содержащий все необходимые признаки и опции для расчетной области (домена) и для граничных условий на внешних границах расчетной области, а также параметры рекомендуемых моделей турбулентности, опции решения, точки мониторинга и записываемые результаты.

Разработанные расчетные процедуры были оформлены в специальный программный модуль WINDLOAD/CFX, включающий в настоящее время около 80 "макросов" (процедур) на языке программирования APDL.

В рамках ПК ANSYS создаются и файлы с сеткой (*.cdb) и программный код (*.ccl) для ПК ANSYS CFX. Макросы снабжены русифицированным интерфейсом и рассчитаны на специалистов в области прочности, не имеющих большого опыта численного моделирования задач газодинамики. Макросы составлены для различных типовых форм сооружений, для двумерной и трехмерной постановок, для различных вариантов учета симметрии, для различных подходов к формированию сетки. В рамках одного входного файла можно провести генерацию сетки в цикле (например, при вариациях геометрических параметров задачи и для вариантов застройки). Разработаны макросы для формирования стационарных и нестационарных профилей скорости ветра и параметров турбулентности, а также процедуры методик, описанных в главе 2. Для упрощения и повышения эффективности обработки и оформления результатов средствами программирования APDL создается и файл настроек постпроцессора (в формате *.cst). Формируются плоскости сечений, ракурсы рисунков, вспомогательные параметры и переменные. Определяются спектры воздействия (давлений и нагрузок на характерные зоны), а также числа Струхала

$$St = Df/V, \quad (10)$$

где D – характерный размер (как правило, поперек потока), V – средняя скорость потока, f – частота срыва вихрей.

Рассмотрены преимущества одновременного расчета модели застройки сразу при нескольких направлениях ветра для оптимизации использования многопроцессорной вычислительной техники и особенности применения кластеров к решению данного класса задач. Описана методика импорта геометрии зданий и передачи ветровых нагрузок (средней и пульсационной составляющей) из ANSYS CFX в программы расчетов НДС зданий (ANSYS, SCAD, Лира, MicroFE, СТАДИО).

Глава 4 посвящена верификации разработанной методики и

реализующего программного обеспечения на основе сравнения с результатами испытаний в аэродинамических трубах для моделей, включающих изолированные и группы высотных зданий, а также сравнения с результатами альтернативных расчетов и данными натурных замеров для реальной застройки (см. таблицу 1 – "матрицу верификации"). Расчеты проводились в стационарной (модель турбулентности SST) и в нестационарной (DES, SAS) постановках. Контролируемые параметры: скорости вблизи модели и в пешеходных зонах, St – числа Струхала (10), аэродинамические коэффициенты C_x , C_y , C_p

$$C_x = F_x/q, \quad C_y = F_y/q, \quad C_p = p/q \quad (11)$$

где F_x , F_y – составляющие ветровых нагрузок (по потоку и в поперечном направлении, соответственно), $q = \frac{1}{2} \rho \cdot V_h^2$ – скоростной напор, V_h – скорость потока на характерной высоте.

Из тестовых задач, подготовленных авторитетным Институтом Архитектуры Японии (АИ), для примера рассмотрена модель высотного здания в малоэтажной плотной застройке (рис.1).

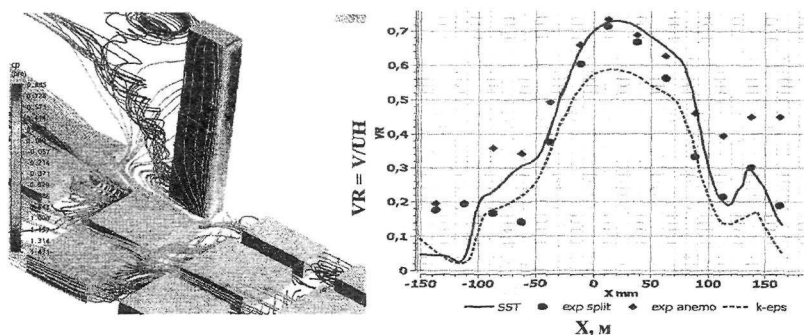


Рис.1. Высотное здание в малоэтажной застройке. Расчетные линии тока и поля коэффициентов C_p . На графиках – коэффициенты усиления скорости ветра (относительно набегающего потока) вдоль линии в пешеходной зоне. Расчеты SST (сплошная линия) и "к-ε" (штрих-пунктир), эксперименты (точки).

В базе данных АИ приводятся результаты натурных замеров поля скоростей ветра в пешеходных зонах микрорайона Синдзюку (Токио) за 1977-78 гг., данные двух различных испытаний в аэродинамических трубах и результаты расчетов, выполненных несколькими коллективами японских ученых. Показано (рис. 2), что результаты расчетов диссертанта по разработанной методике находятся в диапазоне разброса "эталонных" данных.

Исследована ветровая аэродинамика МФК "Сити-Палас" в составе ММДЦ "Москва-Сити" (рис.3). Средняя и пульсационная составляющие ветровых воздействий при наиболее характерных направлениях ветра сравниваются с результатами испытаний в аэродинамической трубе ВМТ (Великобритания). С учетом сложности задачи и неполноты информации о геометрии испытанной модели, получено практически приемлемое

соответствие эксперименту для уровней средних давлений в характерных сечениях фасада (см. рис.3) и для максимальных пульсационных нагрузок на здание в целом.

Отмечено, что при некоторых направлениях ветра из-за экранирования наряду с уменьшением средних значений нагрузок может резко возрасти пульсационная составляющая. При недостаточном количестве датчиков в эксперименте могут быть пропущены локальные пиковые давления.

Приведены результаты численного моделирования аэродинамики высочайшего в Европе комплекса “Федерация” (ММДЦ “Москва-Сити”) совместно с несколькими близкорасположенными зданиями в сопоставлении с данными испытаний, проводившихся фирмой RWDI (Канада). Удалось с достаточной для практики точностью воспроизвести поля средних давлений и

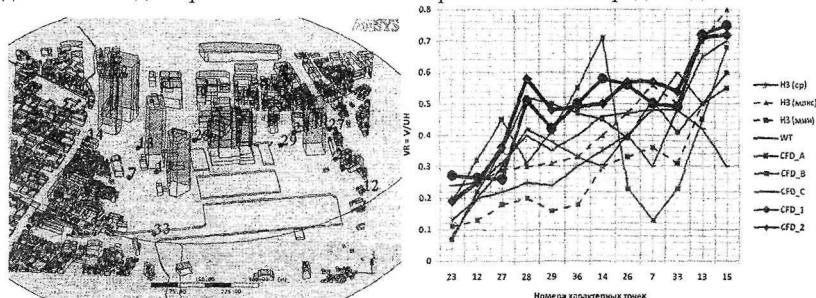


Рис.2. Коэффициенты усиления скорости ветра в окрестности группы высотных зданий (Токио) при южном ветре. Модель (около 11 млн. ячеек). На графиках – данные эксперимента (WT), натурные замеры (HZ) с учетом разброса, расчеты японских ученых различными ПК (CFD_A, B, C), расчеты диссертанта (CFD_1 – предварительный, CFD_2 – уточненный).

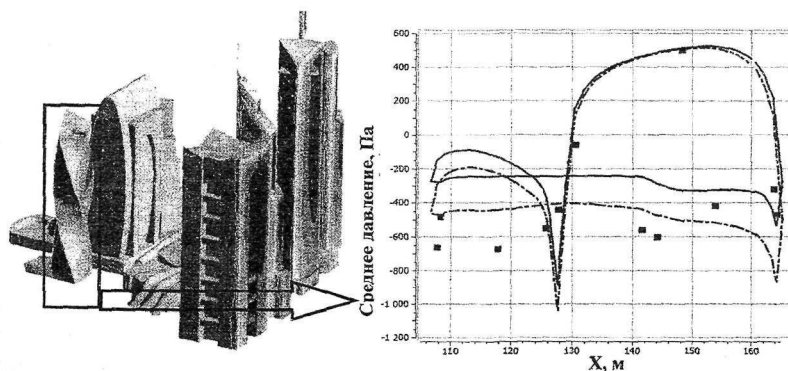


Рис.3. МФК “Сити-Палас” в составе ММДЦ “Москва-Сити” (слева внизу). Восточный ветер. Эпюры средних давлений (Па) по контуру 17-го этажа (DES – пунктир, RANS SST – сплошная, эксперимент BMT – квадраты).

Таблица 1

"Матрица верификации" разработанной методики

Описание задачи аэродинамики	"Эталоны"	Методика, модель турб.	Модели, тыс. ячеек	Контролируемые параметры	Время счета, час	Расхождение, %
Призма квадратная, двумерная постановка	Экспер. Lyp	DES	20	Средние $C_x, C_y, C_p, St, V_x, V_y$	10	5-20%
Интерференция двух квадратных призм, двумерная постановка	Экспер. С.Г.Кузнецов	DES	50	Средние C_x и пульсации C_y	20	5% средние 15% пульсационные
Цилиндр, двумерная постановка ($Re=3900$)	Расчеты Liaw Экспер. Norberg	DES	40	Средние $C_x, C_y, C_p, St, V_x, V_y$	20	5-10% (для C_p 5-20%)
Призма 2:1:1	Экспер. Tamura	SST	220	$V_{\text{пешех}} TKE$ C_p	0.5	3-5% (для V) 10-30% (для TKE)
Куб	Натур. замеры Silsoe Экспер. Castro	DES	120	C_p	40...80	10-30% (замеры) 10-20% (экспер.)
Высотное здание в малоэтажной застройке	Экспер. AIJ	SST	200 450	$V_{\text{пешех зон}}$ (средние и пиковые)	1 2	5-10%, средние 10-20%, пиковые
Застройка района Синдзюку, г. Токио	Натур. замеры Экспер. AIJ	SST	19 700	$V_{\text{пешех зон}}$ (пиковые)	15	10-50% (натурные) 10-30% (экспер.)
МФК "Сити-Палас" ММДЦ "Москва-Сити"	Экспер. BMT	SST DES	3 200	C_p (средние), C_x, C_y (средние и пиковые)	6 - SST 200 - DES	5-10% средние 10-30% пульсац.
МФК "Федерация" ММДЦ "Москва-Сити"	Экспер. RWDI	SST DES	2 400	C_p (средние и станд. пульсаций)	4 - SST 160- DES	5-10% средние 10-30% пульсац.

стандарты их пульсаций на ограждающих поверхностях башен «Запад» и «Восток».

В главе 5 рассматривается применение разработанной методики к решению ряда практических задач для проектируемых и строящихся высотных комплексов.

Изложены важные аспекты моделирования ветровой аэродинамики строящегося в настоящее время ЖК «Акварин» (г.Владивосток, 210 м). После выполнения серии тестовых нестационарных расчетов при различных направлениях ветра была изменена планировавшаяся последовательность возведения корпусов, обеспечив тем самым экранирование наиболее высокого и гибкого корпуса с учетом анализа локальной годовой розы ветров (повторяемости северного направления, особенно в зимний период). Были проведены вариантные (24 направления ветра) расчеты средней и пульсационной составляющей ветровой нагрузки для подробной модели (около 4 млн. ячеек) с учетом рельефа (перепад высот до 150 м), близлежащих сооружений в радиусе до 1 км и этапности застройки (см. рис. 4). Выполнены оценки пиковых давлений на фасадные конструкции, оценки уровня пешеходной комфортности и возможного возникновения ветрового резонанса.

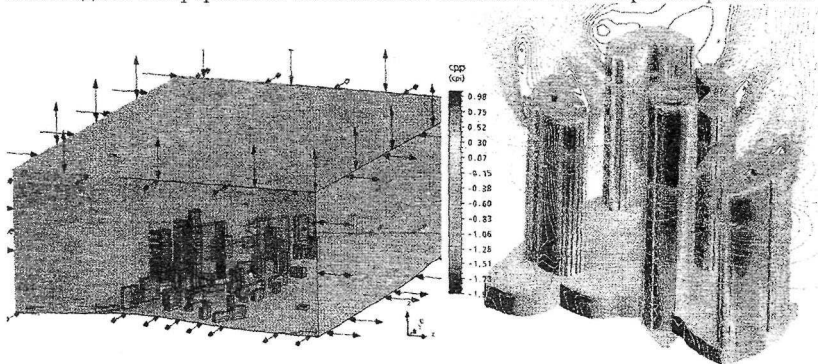


Рис.4. ЖК "Акварин". Расчетная CFD-модель. Аэродинамические коэффициенты и поля средних скоростей ветра.

Рассмотрены принципы и особенности моделирования для расчетов средних, минимальных и максимальных давлений на фасадные конструкции строящегося ЖК «Зодиак» (г. Москва) в трехмерной постановке с учетом рельефа местности и основных близкорасположенных зданий. Базовая модель с 3.5 млн. ячеек (домен) была "скопирована" 24 раза с назначением граничных условий, соответствующих различным направлениям ветра. Полная модель (более 83 млн. ячеек, 130 млн. неизвестных) исследовалась в многопроцессорной постановке на вычислительном кластере МГСУ. По результатам вариантных расчетов были построены огибающие, а также оценены коэффициенты обеспеченности и верифицирована численная методика оценки пульсационной составляющей ветровой нагрузки.

Разработанная методика была использована при моделировании ветровых воздействий на проектируемый МФК "Газойл-Сити" (г. Москва). Особенностью задачи является сложный характер интерференционного взаимодействия двух основных корпусов МФК и близкорасположенного здания ОАО "Газпром". Расчеты для выбранных 24-х направлений ветра были выполнены как в стационарной, так и в нестационарной постановках с учетом окружающей застройки и этажности возведения. Демонстрируются значимые эффекты «подъемной силы» для изолированного корпуса (для ряда "углов атаки" – действующими нормами не выявляются, рис.5) и экранирования, значительное усиление ветровых потоков в проеме между основными корпусами, не определяемые нормативными методами расчета.

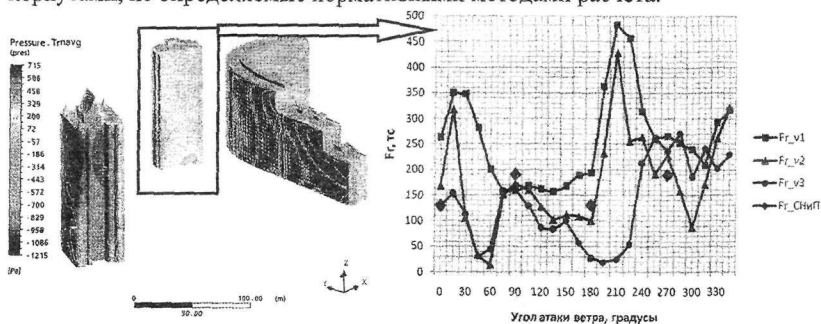


Рис.5. МФК "Газойл-Сити". Средние давления (Па) от северо-западного ветра. Равнодействующая средних нагрузок Fr (тс) на корпус 1 в зависимости от направления ветра. ■ – изолированный корпус 1, ▲ – частичная застройка, после возведения корпуса 1, ● – в полной застройке. ◆ – результаты по СНиП 2.01.07-85* (для изолированного прямоугольного профиля).

Описана разработанная аэродинамическая модель самого высотного в Европе комплекса зданий ММДЦ "Москва-Сити" (рис. 6, около 30 млн. ячеек-объемов). На настоящий момент, в связи с произошедшими изменениями проекта, отсутствуют результаты испытаний для существующей и наиболее вероятной «окончательной» застройки. В этой связи, численное моделирование по разработанной методике, верифицированное по результатам ранее проведенных испытаний (глава 4), позволило бы достаточно оперативно оценить измененные параметры ветровых воздействий для всех зданий без необходимости повторения испытаний.

Предложена структура систем мониторинга с учетом одновременного замера ветровых воздействий и динамического поведения конструкции. В качестве примера рассмотрено использование аэродинамической модели комплекса зданий МГСУ на Ярославском шоссе.

Проанализирован опыт внедрения разработанных методик в практику обучения студентов и аспирантов профильных специальностей в МГСУ по дисциплине "Вычислительная аэрогидромеханика".

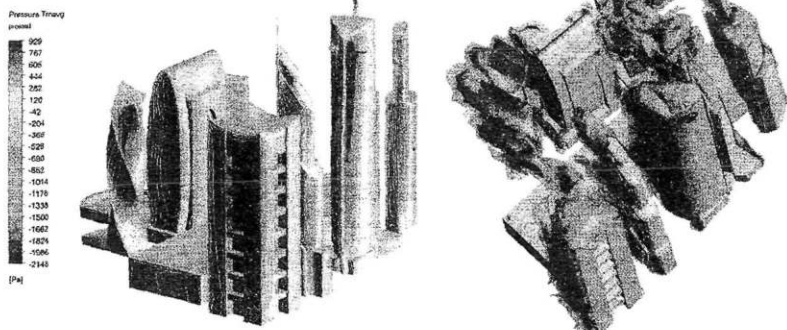


Рис.6. ММДЦ “Москва-Сити”. Средние ветровые давления (Па) и изоповерхности завихренностей (угловых скоростей вращения потока)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Как показал анализ современных отечественных и зарубежных теоретических и экспериментальных исследований, существующие нормативные документы и методики не в полной мере отражают специфику ветровых воздействий на высотные здания и их комплексы, прежде всего, в условиях их компактного расположения и интерференции и, поэтому, нуждаются в уточнении и развитии.

2. Разработана методика расчета нормативных параметров ветровых воздействий (средней и пульсационной составляющих нагрузок на несущие конструкции, пиковых давлений на ограждающие конструкции, уровня пешеходной комфортности) на высотные здания и их комплексы на базе численного решения стационарных и нестационарных трехмерных уравнений гидродинамики (Навье-Стокса в приближении Рейнольдса, модели турбулентности RANS, URANS и DES) с дискретизацией методом конечных объемов, позволяющая адекватно учитывать важные факторы – направления и профиль ветровых потоков, рельеф местности, окружающую застройку и последовательность возведения комплексов.

3. Разработанная методика реализована в форме специализированного программного модуля WINDLOAD/CFX к выбранным, в качестве базовых, универсальным программному комплексу ANSYS. Для решения большемерных задач (до 100 млн. вычислительных ячеек - конечных объемов, до 150 млн. неизвестных) используются эффективные параллельные вычисления кластерной организации.

4. Проведена верификация разработанной методики и ее программной реализации на основе сравнения с результатами испытаний моделей в аэродинамических трубах (тестовые модели, комплекс “Федерация” и МФК “Сити-Палас” в ММДЦ “Москва-Сити” и др.) и с данными натурных замеров

для группы высотных зданий в реальной застройке (микрорайон Синдзюку, Токио, Япония).

5. Установлена приемлемая для практики точность результатов расчета средней составляющей ветровых нагрузок для зданий сложных форм (расхождение с имеющимися экспериментальными данными не более 15-20%) не только при нестационарных, но и при стационарных расчетах с использованием модели турбулентности SST, предложенной схемы дискретизации и при адаптивной схеме расчетов с последовательным сгущением сетки.

6. Для "уточненного" определения пульсационной составляющей ветровой нагрузки рекомендуется выполнять нестационарный расчет с использованием моделей турбулентности DES или URANS. Для сложных реальных застроек наблюдается рассогласование результатов по отрицательным давлениям (20-50%) с данными испытаний в аэродинамических трубах. Для дополнительной верификации предлагается проводить выборочные натурные замеры параметров реальных ветровых воздействий.

7. Для оценки пульсационной составляющей нагрузок допустимо использование предложенного и верифицированного "инженерного" подхода, основанного на оценке турбулентной энергии пульсаций (по результатам стационарного расчета), максимальных коэффициентов обеспеченности и нормативных параметров корреляции нагрузок. Этот подход применим и при определении ветровых нагрузок на фасадные конструкции. Возможно определение локальных зон пиковых давлений, которые не могут быть надежно идентифицированы в практике испытаний в аэродинамических трубах.

8. Особенно эффективна разработанная численная методика, как показали результаты решения верификационных задач, при оценке пешеходной комфортности. При этом исключается масштабный эффект, снижающий при испытаниях точность замеров потоков вблизи поверхности.

9. Разработанная методика использована для трехмерных стационарных и нестационарных расчетов ветровых нагрузок на несущие и ограждающие конструкции и оценки пешеходной комфортности ряда проектируемых и строящихся высотных комплексов (ММДЦ "Москва-Сити", МФК "Газойл-Сити" и ЖК "Зодиак", ЖК "Акварин"), а также комплекса зданий МГСУ. Выявлен и проанализирован ряд реальных аэродинамических эффектов (включая интерференцию), которые не определяются при применении действующих нормативных методик.

10. Применительно к объектам исследования конкретизирована и обеспечена выполненными разработками современная концепция определения ветровых воздействий: а) "предварительное" численное моделирование с определением наиболее опасных/характерных направлений ветра, оценка необходимости испытаний в аэродинамической трубе (б); б) испытания в аэродинамической трубе (углы ветра, расположения и количества датчиков по рекомендациям а); в) уточненное многопараметрическое и многофакторное численное моделирование с сопоставлением характерных параметров с результатами испытаний.

11. Предложена структура системы мониторинга высотных зданий/комплексов с учетом одновременного замера характеристик ветра и перемещений/ускорений, базирующаяся на разработанной методике.

12. Разработанная методика успешно используется в практике обучения студентов и аспирантов профильных специальностей МГСУ по дисциплине "Вычислительная аэродинамика".

Основные положения и результаты диссертации отражены в следующих публикациях:

а. В периодических изданиях, включенных в перечень рекомендованных ВАК:

1. Дубинский С.И. Расчеты высотных сооружений при ветровом воздействии. // САПР и графика, 2005, №10, с. 32-34.

2. Дубинский С.И. Численное моделирование ветровых воздействий на комплекс «Федрацья» «Москва-Сити». // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. Volume 4, Issue 2, 2008, pp.58-59.

3. Дубинский С.И., Серебrenникова А.В. Численное моделирование аэродинамической комфортности пешеходных зон. // Вестник МГСУ, 2009, №1 (спецвыпуск), с.485-488.

4. Белостоцкий А.М., Дубинский С.И. Некоторые аспекты верификации программных средств численного моделирования конструкций и сооружений. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering Volume 4, Issue 2, 2008, p.30.

5. Дубинский С.И. ANSYS 8.0: обзор новых возможностей. // САПР и графика, 2003, №11, с.42-44.

6. Дубинский С.И. Программный комплекс ANSYS/LS-DYNA 8.0. // САПР и графика, 2004, №3, с.34-38.

7. Дубинский С.И. ANSYS и ANSYS/CivilFEM в строительстве. // САПР и графика, 2004, № 12, с.75-77.

б. Публикации в иных изданиях

8. Белостоцкий А.М., Дубинский С.И. и др. Комплексное расчетное обоснование напряженно-деформированного состояния высотных многофункциональных комплексов. // Строительная механика и расчет сооружений, №10, 2006, с.111-115.

9. Белостоцкий А.М., Дубинский С.И. и др. Методы динамического синтеза подконструкций в задачах моделирования сложных инженерных систем. // Строительная механика и расчет сооружений, №10, 2006, с.99-110.

10. Дубинский С.И., Серебrenникова А.В. Численное моделирование ветровой аэродинамики в пешеходных зонах «высотной» застройки. // «Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы». Сб. трудов международной научно-практической конференции. М.: МГСУ, 2008, с.259-266.

11. Белостоцкий А.М., Дубинский С.И. и др. Расчетное обоснование НДС высотных многофункциональных комплексов. // ANSYS Solutions/ Русская редакция. – Зима 2007 (4), с.13-17.

КОПИ-ЦЕНТР св. 7:07:10429 Тираж 100 экз.
г. Москва, ул. Енисейская, д.36
тел.: 8-499-185-7954, 8-906-787-7086