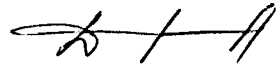


На правах рукописи



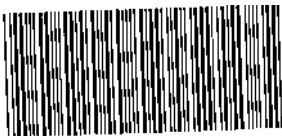
Дорошенко Анна Валерьевна

**МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СКОРОСТЕЙ
ВЕТРА И ПЕШЕХОДНОЙ КОМФОРТНОСТИ В ЗОНАХ ЖИЛОЙ
ЗАСТРОЙКИ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

5 ДЕК 2013



005541783

Москва, 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный строительный университет».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Варапаев Владимир Николаевич

Официальные оппоненты: **Мкртычев Олег Вартанович**,
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Московский государственный
строительный университет», профессор
кафедры «Сопротивления материалов»

Попов Николай Александрович,
кандидат технических наук, ОАО «НИЦ
«Строительство» Центральный научно-
исследовательский институт строительных
конструкций имени В.А. Кучеренко,
заведующий лабораторией надежности
сооружений

Ведущая организация: Государственное унитарное предприятие
города Москвы «Московский научно-
исследовательский и проектный институт
типологии, экспериментального
проектирования» (МНИИЭТП)

Защита состоится «20» декабря 2013 года в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.138.12, созданного на базе ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет» по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, в аудитории №9 «Открытая сеть».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет».

Автореферат разослан «19» ноября 2013 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Анохин Николай Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Ветровой режим территории является одним из наиболее важных природных факторов, который необходимо учитывать при строительстве зданий и сооружений. Воздействие ветровых потоков в городской застройке может приводить к негативному изменению микроклиматических условий воздушной среды, а также способно служить источником возникновения неблагоприятных ситуаций. Это связано как с образованием зон застоя воздуха с повышенным уровнем загрязнения приземного слоя атмосферного воздуха, так и с увеличением скорости ветровых потоков. Возрастающие потребности оценки рисков аэродинамического воздействия ветровых потоков определяются ростом числа высотных зданий и сооружений и плотности их размещения в крупнейших городах.

Традиционным методом оценки ветровой аэродинамики в окрестности комплексов зданий и сооружений сложной формы является экспериментальное исследование в аэродинамических трубах. Альтернативным подходом решения данных задач является численное моделирование движения воздушных потоков на ЭВМ, основанное на решении уравнений газодинамики. Данный метод обладает рядом преимуществ по сравнению с физическим экспериментом. В их числе, сокращение времени анализа, экономия средств, возможность получения более полной информации о распределении давлений по поверхности зданий и о полях скоростей вокруг них, возможность оперативного перебора различных вариантов форм проектируемых зданий для сравнительного анализа и оптимизации ветровой ситуации. Моделирование аэродинамических условий позволяет прогнозировать возникновение неблагоприятных ситуаций в пешеходных зонах и предложить меры по их устранению или по снижению их вредного воздействия.

Поскольку основные исследования задач пешеходной комфортности в настоящее время проводятся за рубежом, разработка верифицированной методики численного моделирования скоростей ветра в пешеходных зонах жилой застройки позволит отечественным специалистам определять ветровые воздействия в пешеходных зонах, как на стадии проектирования строительства, так и в существующей застройке. Представляется целесообразным разработку специализированной программы для критериальной оценки пешеходной комфортности по существующим российским и зарубежным методикам и нормам.

Цели и задачи работы

Целью работы является разработка, программная реализация и верификация методики численного моделирования скоростей ветра и пешеходной комфортности в зонах жилой застройки.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- Анализ существующей отечественной и зарубежной нормативной базы критериев пешеходной комфортности и анализ результатов исследований приземных ветров в городской застройке.

- Разработка комплексной методики многоэтапного расчета задач определения ветровых воздействий в пешеходных зонах городской застройки.

- Разработка рекомендаций по выбору схем дискретизации, граничных и начальных условий, рациональных моделей турбулентности для решения данного класса задач.

- Разработка специализированной подпрограммы (макроса) для дискретизации расчетной области применительно к задачам пешеходной комфортности.

- Разработка алгоритма и программы, реализующих критериальную оценку аэродинамической комфортности в пешеходных зонах.

- Разработка методики моделирования зеленых насаждений, используемых для снижения ветровых воздействий в пешеходных зонах.

- Верификация разработанной методики численного моделирования задач пешеходной комфортности на основе сравнения результатов расчета с экспериментальными результатами физического моделирования в аэродинамических трубах и натурными измерениями.

- Применение разработанной методики и программы критериальной оценки аэродинамической комфортности в пешеходных зонах для существующего и строящегося объектов.

Научная новизна работы:

- Разработана и верифицирована комплексная методика численного моделирования скоростей ветра и пешеходной комфортности в пешеходных зонах жилой застройки, включающая рекомендации по выбору схем дискретизации, граничных и начальных условий, рациональных моделей турбулентности для решения данного класса задач.

- Оценка аэродинамической пешеходной комфортности по различным нормам и методикам реализована в разработанной проблемно-ориентированной программе.

- Разработана методика численного моделирования аэродинамики зеленых насаждений для оценки эффекта снижения ветровых воздействий на пешеходном уровне.

Практическая значимость результатов исследования.

- Разработанная методика численного моделирования задач пешеходной комфортности позволяет определять ветровые воздействия в пешеходных зонах, как на стадии проектирования, так и для существующей застройки.

- Разработанная программа позволяет проводить оценку пешеходной комфортности по существующим нормам и методикам (отечественным и зарубежным), определять и прогнозировать возникновение неблагоприятных ситуаций в пешеходных зонах городской застройки.

- Разработанная методика моделирования зеленых насаждений позволит адекватно учитывать их влияние на ветровые потоки в пешеходных зонах при численном решении задач пешеходной комфортности.

- Решенные тестовые задачи можно использовать при верификации программного комплекса ANSYS CFD согласно требованиям Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН).

Внедрение результатов работы.

Разработанные методика и программное обеспечение применяются в Научно-образовательном центре компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов (НОЦ КМ) МГСУ и ООО "АЙКОМ".

На защиту выносятся:

- Методика численного моделирования скоростей ветра и пешеходной комфортности в зонах жилой застройки, включающая рекомендации по выбору схем дискретизации, граничных и начальных условий, рациональных моделей турбулентности для решения данного класса задач и специализированную подпрограмму (макрос) для дискретизации расчетной области.

- Программа, реализующая оценку аэродинамической пешеходной комфортности по различным нормам и методикам.

- Методика моделирования зеленых насаждений для снижения ветровых воздействий в пешеходных зонах.

- Результаты верификационных задач, решенных в обоснование достоверности и эффективности разработанной методики.

- Результаты исследования аэродинамической комфортности в пешеходных зонах кампуса Технического университета Эйндховен (Нидерланды), а также строящегося торгового комплекса «Пулково-аутлет» (г. Санкт-Петербург) по разработанной методике и оценка аэродинамической пешеходной комфортности с использованием разработанной программы.

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

- использованием апробированных научных подходов к математическому моделированию задач аэродинамики, а также обоснованных численных методов решения соответствующих математических задач.

- использованием лицензионного программного комплекса ANSYS CFD.

- согласованием полученных результатов с экспериментальными исследованиями и натурными замерами для моделей и реальных застроек.

Апробация работы.

Основные положения работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: «Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы», Москва, МГСУ, 2008, 2009гг.; Двенадцатой Международной межвузовской научно-практической конференции молодых ученых, докторантов и аспирантов, Москва, МГСУ, 2009г.; «Научно-техническое творчество

молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях», Москва, ВВЦ, 2009, 2010 гг.; Научно-технической конференции института фундаментального образования, Москва, МГСУ, 2009 г.; Тринадцатой Международной межвузовской научно-практической конференции молодых ученых, докторантов и аспирантов. «Строительство – формирование среды жизнедеятельности». Москва, МГСУ, 2010 г.; Фундаментальные науки в современном строительстве», Москва, МГСУ, 2010, 2012 гг.; Международной научной конференции «Интеграция, партнёрство и инновации в строительной науке и образовании», Москва, МГСУ, 2013.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 12 работ, из которых 5 статей – в журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 103 наименований и приложения. Общий объем диссертационной работы составляет 169 страниц текста, в текст включены 108 рисунков и 23 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение диссертации раскрывает актуальность темы работы, определяет проблемы, цели и задачи исследований, научную новизну и практическую значимость работы.

В первой главе диссертации приводится **обзор современного состояния анализа пешеходной комфортности.**

Определением принципов и критериев пешеходной комфортности занимались также специалисты, как А.Д. Пенварден, А.Ф.Е. Вайс, П.О. Фангер, С. Мураками, Т.В. Лоусон, П.С. Джэксон, В.Н. Мельбрун, Э.И. Реттер, И.С. Поултон, Дж.С.Р. Хант, Дж. С. Мамфорд, Н. Изюмов, А.Г.Давенпорт, Дж. Гандемер, С.И. Стриженов, Ф.Л. Серебровский, Н.А. Попов, Н.М. Томсон. Именно результаты их исследований были взяты в основу норм, как отечественных, так и зарубежных.

Приводится обзор и анализ существующих норм и методик, используемых на практике в разных странах для оценки пешеходной комфортности.

Рассмотрены особенности моделирования задач пешеходной комфортности в аэродинамических трубах и натурных замеров скоростей ветра в пешеходных зонах городской застройки.

Изучены основные достижения в области вычислительной аэрогидродинамики в целом, рассмотрены как классические работы (А.Н. Колмогоров, П. Роуч, Ван Дайк, фон Карман, Л.Г.Лойцянский, Л.И. Седов, Г.Шлихтинг, А.Г. Давенпорт и др.), так и современные отечественные (М.Х. Стрелец, А.В. Гарбарук, М.Л. Шур, П.Г. Фрик, А.Н. Секундов, Е.М. Смирнов, С.А. Исаев, А.Е. Усачов, И.К. Лифанов, О.М. Белоцерковский, С.В. Гувэрнюк, А.В. Атаманчук, В.Я. Шкадов, В.Н. Варапаев, С.И. Дубинский, В.К. Ахметов и др.) и зарубежные (P.R. Spalart, B. Launder, D. Spalding, L.

Davidson, J. Ferziger, B.J. Guerts, F. Menter, A. Kareem, D.C. Wilcox, T.J. Chung, A. Mochida, Y. Tominaga, B. Blocken и мн. др.).

Приведен анализ возможностей ведущих программных комплексов применительно к расчетам пешеходной комфортности, таких как ANSYS CFD, STAR-CD, PHOENICS, OpenFOAM и др.

Обоснована необходимость создания и программной реализации методики численного моделирования задач пешеходной комфортности.

Во второй главе диссертации описана разработанная методика численного моделирования скоростей ветра в пешеходных зонах жилой застройки. Рассмотрены математическая формулировка задачи аэрогидродинамики; моделирование турбулентности; требования к геометрии расчетной области, начальные и граничные условия; пространственно - временная дискретизация задач; численное решение стационарных и нестационарных задач; разработка методики моделирования зеленых насаждений.

Расчеты ветровых потоков сводятся к решению трехмерных нестационарных нелинейных уравнений гидрогазодинамики с учетом вязкости в постановке Навье-Стокса для несжимаемой жидкости. Для упрощения моделирования массовые силы не учитываются, и система принимает вид:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \\ \rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где u, v, w – искомые компоненты вектора скорости (по осям x, y, z), μ – коэффициент динамической вязкости, p – давление, t – время, ν – коэффициент кинематической вязкости для воздуха, ρ – плотность.

При решении задач ветровой аэродинамики особое значение уделяется вопросу моделирования турбулентности. Существующие на данный момент модели турбулентности условно можно разделить на четыре группы:

1. Прямое численное моделирование DNS (Direct Numerical Simulation). Данный подход наиболее строгий из существующих, так как в нем непосредственно решаются трехмерные нестационарные уравнения Навье-Стокса на сетке с шагами (включая шаг по времени) достаточно малы для точного разрешения всех турбулентных вихрей. В ближайшей перспективе применение прямого численного моделирования для решения прикладных задач не возможно, в связи с высокими требованиями к сетке.

2. Метод моделирования крупных вихрей LES (Large Eddy Simulation).

Данный метод "фильтрует" поток от коротковолновых турбулентных неоднородностей. Длинноволновые турбулентности разрешаются точно, а мелкомасштабные турбулентности моделируются. При использовании данного метода предъявляется следующее требование к расчетной сетке: у стенок она должна быть достаточно мелкой, в связи с тем, что при приближении к ней характерный размер вихрей уменьшается. Таким образом, моделирование крупных вихрей связано с высокими вычислительными затратами (хоть и меньшими по сравнению с прямым численным моделированием).

3. Применение уравнений Навье-Стокса с осреднением по Рейнольдсу RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes).

При осреднении нестационарных трехмерных уравнений Навье-Стокса получим систему уравнений Рейнольдса.

$$\begin{cases} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \\ \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \end{cases} \quad (2)$$

Процедура осреднения выглядит следующим образом:

$$\bar{a}(t) = \frac{1}{2T} \int_{t-T}^{t+T} a(\tau) \cdot d\tau \quad (3)$$

Полученная система является незамкнутой, в нее входит тензор рейнольдсовых напряжений $\tau_{ij}^T = \rho \overline{u'_i u'_j}$. Замыкание этой системы производится с помощью различных полуэмпирических моделей турбулентности. Эти полуэмпирические модели условно можно классифицировать на две группы: модели, опирающиеся на гипотезу Буссинеска и модели рейнольдсовых напряжений. Первую группу в свою очередь можно классифицировать по количеству дифференциальных уравнений переноса: алгебраические модели турбулентности, модели с одним дифференциальным уравнением, модели с двумя дифференциальными уравнениями.

4. Гибридные методы. Помимо рассмотренных трех методов моделирования турбулентных течений в настоящее время разрабатывается ряд промежуточных, гибридных методов, сочетающих в себе те или иные элементы RANS, LES и DNS.

В диссертационной работе использовались модели турбулентности RANS с двумя дифференциальными уравнениями, а именно k-ε, SST, k-ε RNG, k-ω, BSL.

Сформулируем основные требования к расчетным моделям задач пешеходной комфортности.

Начальным этапом является выбор размеров расчетной области. Заметим, что в настоящее время в России нет определенных норм для численного моделирования задач внешней аэродинамики, однако в Архитектурном институте Японии (AIJ) рабочей группой под руководством Я. Томинаги были сформулированы некоторые рекомендации для

численного моделирования задач связанных с пешеходной комфортностью вокруг зданий. За уровень исследований выбрана высота 1.5 м. В частности, рекомендуются следующие размеры расчетной области: боковая граница на расстояние не менее 5Н от крайней точки застройки (где Н – размер самого высокого здания), более 10 Н с заветренной стороны, высота области 5Н и 5Н – расстояние по потоку до застройки. При численном моделировании задач пешеходной комфортности для одного - трех зданий использовались данные рекомендации.

В методике численного моделирования ветровых воздействий на высотные здания и комплексы, описанной в диссертационной работе С.И. Дубинского, предлагается рассматривать область радиуса 1-3 км (в зависимости от рельефа и высоты зданий) и высотой до 1 км. Эти рекомендации использовались при численном моделировании пешеходной комфортности для группы заданий.

Выбор граничных и начальных условий является одной из наиболее важных задач при численном моделировании.

Для задач численного моделирования пешеходной комфортности на входе задаются средние скорости, которые, как правило, получают на основе норм (в работе используется аппроксимация данных СНиП 2.01.07–85*. Нагрузки и воздействия или МДС 20-1.2006 «Временные рекомендации по назначению нагрузок и воздействий, действующих на многофункциональные высотные здания и комплексы в Москве»). Если известны данные замеров для профиля скорости, турбулентной кинетической энергии, диссипации, интенсивности турбулентности, то они непосредственно могут быть заданы на входе в модель. Следует проследить, чтобы заданный профиль ветра не изменялся вплоть до достижения центральной зоны модели. В качестве теста, рекомендуется "продувать" модель с учетом застройки, но без исследуемого объекта, при той же подробности сетки.

На стенках рекомендуется задавать условия прилипания. При моделировании задач пешеходной комфортности задается условие "no slip", означающее, что скорость воздуха непосредственно на стенке равна нулю.

На "выходе" из области и на "внешних" границах применяются граничные условия, обеспечивающиеся постоянным статическим давлением. В этом случае формируется однородный поток за счет минимизации производных всех переменных.

В зоне застройки по необходимости задаются условия "шероховатости".

В настоящее время для задач гидрогазодинамики используются различные методы дискретизации, в частности метод конечных разностей, метод конечных элементов, метод дискретных вихрей, метод конечных (контрольных) объемов (МКО). Для решения задач пешеходной комфортности был выбран МКО, основным достоинством которого является возможность применения неструктурированных сеток для дискретизации уравнений гидрогазодинамики. При дискретизации задач пешеходной

комфортности необходимо правильно моделировать сетку до пешеходного уровня - количество элементов сетки до пешеходного уровня должно быть достаточным для анализа пограничного слоя на уровне пешеходов.

Течение в задачах аэродинамики можно рассматривать как в стационарных, так и в нестационарных постановках. В общем случае при решении задач пешеходной комфортности при нестационарной постановке задается поле скоростей, переменное во времени, с заданным спектром пульсаций (Давенпорта, Каймала и др.), отвечающим заданной высоте и ветровому району.

Отметим, что многие исследователи рекомендуют изучать воздействие ветра на людей, используя эквивалентную (эффеkтивную) скорость ветра:

$$V_e = V + k * (v'^{2^{1/2}} / V) \quad (4)$$

где V – средняя скорость; $v'^{2^{1/2}}$ – среднее квадратическое значение пульсаций продольной компоненты скорости; k – постоянная величина, характеризующая степень значимости воздействий пульсаций.

Если установлено, что на некоторых участках приземные ветры сильны и вызывают дискомфорт для пешеходов, то необходимо принимать меры для улучшения ветрового режима территории. Местные улучшения приземных ветров территории могут быть достигнуты с помощью декоративных кустарников и деревьев. Их моделирование, как в аэродинамических трубах, так и численно, является сложной задачей. Это связано, в первую очередь, со сложностью их формы.

При численном моделировании воздушных потоков вблизи деревьев возможно применять следующие подходы:

- Создание реалистичной модели дерева (с ветками и листьями);
- Область дерева моделируется пористой упрощенной формы (в виде конуса, сферы, параллелепипеда и т.д.).

В обоих подходах существуют свои сложности – при первом они связаны с тем, что явное моделирование дерева требует высоких вычислительных затрат. При моделировании дерева упрощенно, в виде пористой поверхности, сложность заключается в подборе коэффициента потери, который будет адекватно отражать ветровую проницаемость реального дерева.

В третьей главе описана программная реализация разработанной методики численного моделирования скоростей ветра в пешеходных зонах жилой застройки и оценки пешеходной комфортности.

В качестве базовых программных комплексов были выбраны ANSYS Mechanical и ANSYS CFX. Основные этапы расчетов скоростей ветра в пешеходных зонах жилой застройки следующие:

1 создание геометрии объекта либо в ANSYS Mechanical, либо конвертированием из других программ.

2 создание 3D-геометрии воздушного пространства, построение сетки.

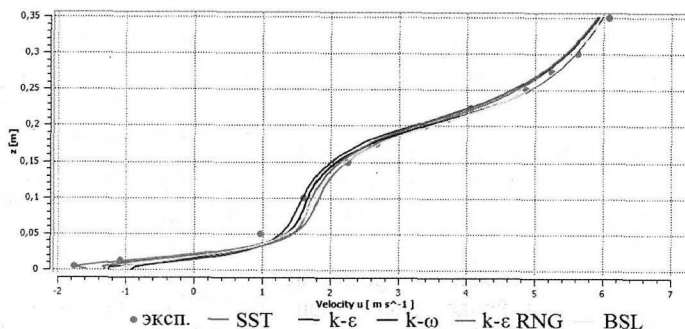


Рис. 1. — Сопоставление распределения горизонтальной составляющей скорости ветра по высоте (центральное сечение) при $x=-0.075$ м.

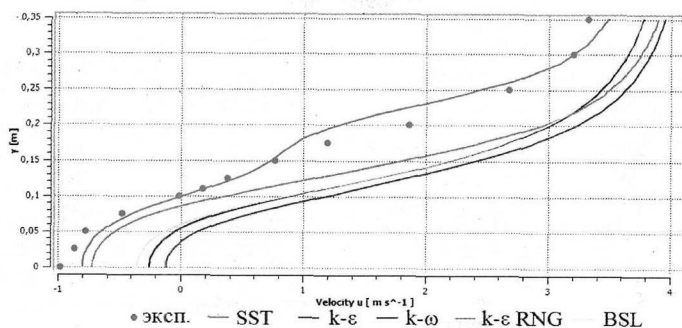


Рис. 2. — Сопоставление распределения горизонтальной составляющей скорости ветра на пешеходном уровне (горизонтальное сечение) при $x=-0.075$ м.

Установлено, что результаты эксперимента и численного моделирования лучше всего сходятся при использовании модели турбулентности SST. Далее задача решалась для этой модели при использовании четырех вариантов сетки, отличавшихся количеством элементов по высоте до пешеходного уровня. Результаты исследования показали, что для задач пешеходной комфортности достаточным по высоте до пешеходного уровня является 5 элементов.

Численное моделирование живой изгороди. Для изучения ветровых потоков за живой изгородью в АИ проводились натурные замеры. Высота изгороди составляет 7 м, ширина 2 м.

Изгородь моделировалась как изотропная пористая область, потери импульса для которой могут быть сформулированы на основе коэффициентов потери (K_{loss}) в модифицированных уравнениях (1) следующим образом:

$$\left\{ \begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] - K_{loss} \frac{\rho u}{2} \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] - K_{loss} \frac{\rho v}{2} \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \\ \rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] - K_{loss} \frac{\rho w}{2} \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

где K_{loss} - коэффициент потери (инерции, m^{-1}).

Поставленная задача численно решалась в двумерной постановке. При численном решении задачи коэффициент потерь калибровался таким образом, чтобы результаты были наиболее близки к результатам натурального эксперимента. Оценивалась эквивалентная скорость.

В результате сравнения натуральных испытаний и численного моделирования определен коэффициент потери ($K_{loss}=1.75 m^{-1}$), при котором отклонение результата в среднем составляет 1,65%. Для полученного коэффициента потери было проведено сравнение результатов эквивалентных скоростей ветра на пешеходном уровне, полученных с помощью численного моделирования и натуральных замеров. Рассогласование расчетных и экспериментальных результатов не превысило 3.28%.

Проведенное исследование позволит в дальнейшем использовать модель изотропной пористой области для упрощенного представления деревьев и кустарников при оценке пешеходной комфортности в зонах жилой застройки, а также для выработки рекомендаций по улучшению ветрового режима территории.

Продувка трехмерной модели дерева в аэродинамической трубе. При численном моделировании данной задачи (рисунок 3) использовалась методика «погруженного тела». Трехмерная сетка для области дерева (839 624 элемента) «погружалась» в сетку области пространства воздуха (2 100 000 элементов). Высота «ствола» модели дерева 0.3м, «крона» дерева в виде куба размерами 0.3×0.3×0.3 м, высота всего дерева - 0.6 м.

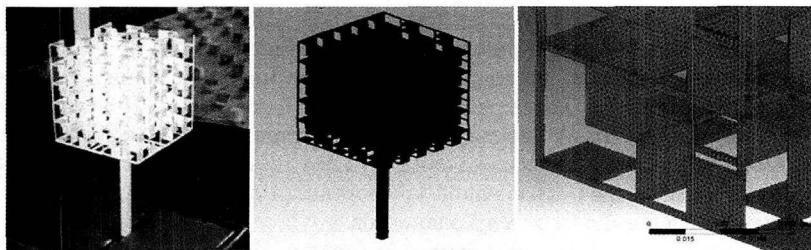


Рис. 3. — Модель дерева в аэродинамической трубе и расчетная сетка на поверхности модели дерева.

Установлено, что на высоте 0.8 м отклонение результатов численного моделирования от результатов эксперимента составило 4.33%, а на высоте 0.45 м расчетные скорости за моделью ниже полученных в аэродинамической

3 загрузка созданной сетки в ANSYS CFX Pre. Задание граничных и начальных условий, параметров расчета.

4 расчет ANSYS CFX Solver. Применяется метод конечных (контрольных) объемов с локальной многоуровневой адаптацией.

5 обработка и анализ результатов в модуле ANSYS CFX Post (графики, рисунки, таблицы, анимация).

Для реализации второго этапа расчета была разработана подпрограмма (макрос), создающая сетку, специально ориентированную на задачи определения скоростей ветра в пешеходных зонах и позволяющая автоматизировать процесс создания сетки и варьировать ее параметры.

В ПК ANSYS CFX, как и в других пакетах гидрогазодинамики, нет "встроенного" расчета на оценку пешеходной комфортности - поэтому разработана программа, позволяющая обрабатывать результаты для пешеходных зон и осуществлять критериальную оценку уровней пешеходной комфортности.

В качестве входных данных необходимо задавать:

- розу ветров. Для этого создана библиотека, содержащая розы ветров для различных городов. Если необходимой розы ветров нет в библиотеке, то ее можно задать в программе в табличном виде;
- директорию с файлами, хранящими информацию о скоростях ветра на рассматриваемой территории для каждого направления ветра из розы ветров (могут быть как результатами численного расчета, так и результатами моделирования в аэродинамической трубе или данными натурных замеров);
- коэффициент k , учитывающий пульсационную составляющую ветра (по умолчанию $k = 1,5$);
- значение скорости на высоте 10м, замеряемое на метеостанции.

После сопоставления файлов с данными и направлениями ветра выполняется расчет, в ходе которого происходят следующие действия:

- 1) Подготовка структур входных и выходных данных
- 2) Загрузка данных
- 3) Подготовка данных к расчету
- 4) Реализация алгоритмов для определения основных критериев пешеходной комфортности: оценка распределения относительных скоростей, критерии МДС, определение скорости ветра по шкале Бофорта для каждой точки измерения, нормы Нидерландов NEN 8100, нормы Т.В. Лоусона (США, Канада), нормы А.Ф.Е Вайса и А.Д. Пенвардена (Япония).
- 5) Сохранение выходных данных в файл.

В программе имеется возможность анализировать информацию для произвольного количества направлений ветра. В результате работы программы формируется файл с информацией о результатах выполнения критериальных норм, который может быть импортирован в ANSYS CFX Post для анализа результатов и их графического представления.

Программа оценки пешеходной комфортности зарегистрирована в Роспатенте (Свидетельство о государственной регистрации №2013611022 от 27.03.2013г.)

В четвертой главе приводится верификация разработанной методики.

Разработанную методику численного моделирования скоростей ветра в пешеходных зонах жилой застройки можно верифицировать на основе сравнения с результатами натуральных замеров и испытаний в аэродинамических трубах для моделей, включающих изолированные здания, зеленые насаждения и группы зданий.

В качестве верификационных задач рассматриваются следующие:

- эксперимент по обдувке комплекса из двух зданий в аэродинамической трубе;
- обтекание параллелепипеда с соотношением сторон 4:4:1;
- моделирование “живой” (зеленой) изгороди;
- эксперимент по обдувке модели одиноко стоящего дерева.

Комплекс из двух зданий в аэродинамической трубе. Эксперимент проводился в НИИ Механики МГУ на установке А-6. Труба А-6 – замкнутая, одноканальная с открытой рабочей частью эллиптического сечения. Экспериментальная модель предназначена для изучения комплекса из двух зданий (одноподъездного 23-этажного и многоподъездного 9-этажного). Всего на модели располагалось 24 датчика давления: 16 – на высоком, и 8 – на низком.

Трехмерная геометрическая модель объекта подготовлена в ANSYS, при составлении расчетной сетки применялся макрос, разработанный для построения сеток для задач пешеходной комфортности. Макрос адаптирован под задачу - сетка имитировала аэродинамическую трубу НИИ Механики МГУ. В модели около 1.2 миллиона узлов, 2.8 миллиона ячеек (из них 1.9 миллиона тетраэдральных, 46.5 тысяч призматических и 600 гексаэдральных). Для углов 0° , 180° и 22° численный эксперимент проводился для трех различных моделей турбулентности, а именно: k- ϵ , SST и k- ϵ RNG.

Среднее отклонение для всех точек измерения составило для модели SST – 13.16%, для модели k- ϵ RNG – 19.08%, для модели k- ϵ – 27.81%. Установлено, что для данной задачи результаты лучше всего согласуются с экспериментом при модели турбулентности SST.

Обтекание параллелепипеда. Для параллелепипеда с соотношением сторон 4:4:1 в Архитектурном институте Японии (AIJ) был проведен ряд тестов в аэродинамической трубе; скорости ветра измерялись не только в центральном сечении ($x=0$), но и в сечении на уровне пешеходов ($z=0.0125$ м).

Сравнивались результаты измерений и численного моделирования для профилей скорости по высоте и профилей скорости на пешеходном уровне для пяти моделей турбулентности (рисунки 1 и 2).

трубе - рассогласование результатов для данной высоты составило до 33.17% (рисунок 4).

При представлении дерева в виде трехмерной изотропной пористой области численные результаты существенно и качественно не согласуются с экспериментальными данными.

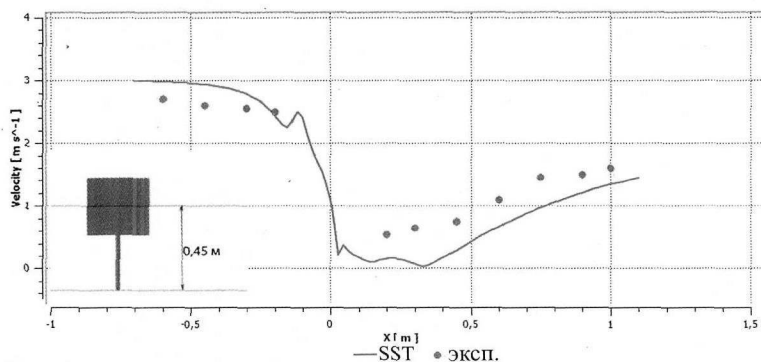


Рис. 4. - Сопоставление скоростей ветра на высоте 0.45м, полученных при численном моделировании (SST) и из эксперимента в аэродинамической трубе (эксп).

В пятой главе рассматривается практическое применение разработанной методики к задачам численного моделирования пешеходной комфортности. Расчеты выполнялись на вычислительном кластере НОЦ КМ МГСУ.

Территория кампуса Технического университета г. Эйндховен (Нидерланды). К.П.В. Гертсом в 1997 году была проведена серия экспериментов в аэродинамической трубе Лаборатории Строительной Аэродинамики (Бохум, Германия) для модели главного здания кампуса в масштабе 1:350. Тест проводился при средней скорости ветра 14м/с (западное направление). На наветренной стороне было установлено 42 датчика давления на высотах 0.97Н, 0.72Н и 0.61Н.

Для численного моделирования скоростей ветра в пешеходных зонах кампуса построена трехмерная модель, включающая около 1.5 миллиона узлов и 4.32 миллиона ячеек (2.3 миллиона тетраэдральных, 2 миллиона призматических и 0.02 млн. гексаэдральных ячеек). Рассогласование расчетных и экспериментальных результатов составило до 11.17%.

После верификации проведен расчет остальных 15 направлений ветра, сгенерированы файлы для оценки пешеходной комфортности. Обработка результатов была проделана для всех норм, заложенных в программе, с учетом пульсационной составляющей скорости и без нее.

Следующим шагом была расширена область прилегающей застройки и обработаны результаты для всех норм, заложенных в программе с учетом пульсационной составляющей скорости и без нее. Для расширенной модели также было построено распределение «ощущаемой» температуры воздуха в пешеходных зонах кампуса с учетом ветра при температуре воздуха -4°C .

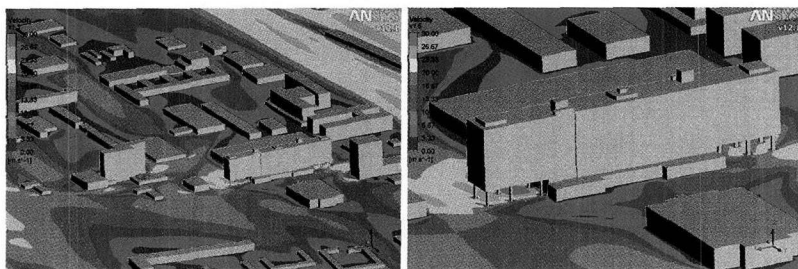


Рис. 5. – Скорости ветра в пешеходных зонах кампуса при западном направлении ветра.

По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

1. В целом по всем нормам и методикам (за исключением МДС) ветровой режим с учетом пульсационной составляющей на территории кампуса можно назвать неблагоприятным для пешеходов.

2. Ветровой режим с учетом пульсационной составляющей на территории кампуса с учетом прилегающей территории благоприятнее, чем ветровой режим без учета прилегающей территории.

3. Критичными, с точки зрения пешеходной комфортности, можно назвать зоны у колонн главного здания по всем нормам (рисунок 5).

Территория торгового комплекса «Пулково аутлет». Торговый комплекс запроектирован на участке 12,6 га, расположенном к югу от Санкт-Петербурга. Территория находится в пределах приаэродромной территории международного аэродрома "Пулково" и представляет собой ровный участок земли, с северной стороны расположено несколько промышленных и логистических зданий. Комплекс окружен "забором" высотой 2 м. Торговая улица и внешняя складская зона отделены воротами.

На предварительном этапе выполнены расчеты для оценки влияния рельефа и шероховатости местности при западном, южном и северном ветре. Далее создана модель окружающего воздушного пространства в форме цилиндра. Поверхность земли полагалась плоской, с незначительной шероховатостью.

В модели около 1.5 миллиона узлов и 4.35 миллиона ячеек (2.6 миллиона тетраэдральных, 1.5 миллиона призматических и 0.2 млн. гексаэдральных ячеек). Количество элементов сетки по высоте до пешеходного уровня составило 10 элементов (рисунок 6). Зеленые насаждения ("в запас") не учитывались.

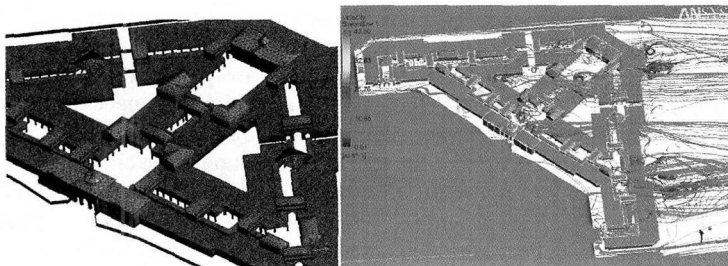


Рис. 6 – Комплекс «Пулково аутлет». Расчетная сетка на поверхностях зданий (левый рисунок). Расчетные линии тока при западном ветре (правый рисунок).

Для расчета средних скоростей в пешеходных зонах и оценки ветровых нагрузок выполнены трехмерные расчеты в стационарной постановке. Для этого предварительно были составлены 24 расчетные модели, соответствующие углам атаки ветра от 0° до 345° с шагом 15° .

Расчеты проводились с использованием модели турбулентности SST вплоть до достижения всеми неизвестными относительной среднеквадратичной нормы невязок 10^{-5} .

По результатам предварительных расчетов сетка была скорректирована в ряде зон, выбрано значение эквивалентной шкалы "псевдвремени", монотонно ускоряющее сходимость. "Хорошая" сходимость (порядка 70-80 итераций) позволила сделать вывод о рациональности принятой модели и параметров итераций.

По результатам анализа установлено, что территория торгового комплекса в целом является комфортной для пешеходов. Ветрозащита обеспечивается, главным образом, заборами и внутренними воротами.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Анализ современных отечественных и зарубежных нормативных документов и методик для пешеходной комфортности в городской застройке показал, что они нуждаются в уточнении и дополнении, особенно в части учета видов деятельности при пребывании на открытых площадках, вероятности возникновения критических скоростей ветра, выбора величин таких скоростей.

2. Разработана методика расчета ветровых воздействий в пешеходных зонах городской застройки на базе численного решения стационарных и нестационарных трехмерных уравнений гидрогазодинамики (Навье-Стокса в приближении Рейнольдса, модели турбулентности RANS) с дискретизацией методом конечных объемов, позволяющая адекватно учитывать важные факторы – направления и профиль ветровых потоков, рельеф местности, окружающую застройку.

3. Разработаны рекомендации для построения расчетных сеток, выбора граничных и начальных условий, моделей турбулентности для решения данного класса задач применительно к выбранному базовому программному комплексу (ANSYS CFD). Для автоматизации процесса применения методики разработана подпрограмма (макрос), реализующая подготовку оптимальной расчетной сетки для задач пешеходной комфортности.

4. Разработана программа, реализующая оценку пешеходной комфортности по различным нормам и методикам. Программа зарегистрирована в Роспатенте (Свидетельство № 2013613169 от 27 марта 2013г).

5. Разработана методика моделирования зеленых насаждений, основанная на их представлении в виде «эквивалентных» пористых подобластей, показавшая адекватность результатов для задач в двумерной постановке, и требующая дальнейших исследований применительно к трехмерным задачам.

6. Проведена верификация разработанной методики численного моделирования задач пешеходной комфортности и ее программной реализации на основе сравнения с результатами физического моделирования в аэродинамических трубах и с натурными замерами.

7. Разработанная методика и программа оценки скоростей ветра в пешеходных зонах использованы для расчетного определения параметров пешеходной комфортности на территориях кампуса Технического университета г. Эйндховен (Нидерланды) и строящегося торгового комплекса «Пулково аутлет» (Санкт-Петербург).

8. Разработанную, верифицированную и апробированную методику можно рекомендовать для использования при выборе архитектурных концепций и обосновании проектных решений городских застроек.

Основные положения и результаты диссертации отражены в следующих публикациях:

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

1. Дубинский С.И., Дорошенко А.В. Влияние посадки деревьев на структуру приземного воздушного потока внутри городской застройки // Вестник Московского государственного строительного университета – 2011 – №4 – С.45-49.

2. Дорошенко А.В., Дорошенко С.А., Орехов Г.В. Определение ветровой нагрузки на трехмерные конструкции с помощью моделирования в аэродинамической трубе // Вестник Московского государственного строительного университета – 2012 – №7 – С.69-74.

3. Дубинский С.И., Дорошенко А.В. Численное моделирование скоростей ветра в реальной застройке на примере района г.Токио // Приволжский научный журнал – 2012 – №4 – С.70-75.

4. Дорошенко А.В. Численное моделирование ветровых потоков вокруг живой изгороди // Научно-технический вестник Поволжья – 2012 – №4 – С.69-74

5. Дорошенко А.В. Программа оценки аэродинамической комфортности в пешеходных зонах // Вестник Иркутского государственного технического университета – 2013 – № 5 – С.100-103.

б. Публикации в иных изданиях

6. Серебrenникова А.В., Дубинский С.И. Моделирование ветровых потоков в пешеходных зонах с помощью программного комплекса ANSYS CFX // Сборник научных докладов научно-практической конференции «Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях», Москва. – 2009 – С. 241-244.

7. Серебrenникова А.В., Дубинский С.И. Численное моделирование аэродинамической Комфортности пешеходных зон // Вестник Московского государственного строительного университета – 2009 – спецвыпуск №1 – С. 485-488.

8. Дорошенко С.А., Серебrenникова А.В., Белых А.С. Проведение аэродинамических экспериментов с использованием среды LABVIEW // Сборник трудов конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LABVIEW и технологии National Instruments». Москва. РУДН – 2009 – С.102-104.

9. Дорошенко А.В., Дорошенко С.А. Применение моделей турбулентности, основанных на решении осредненных уравнений Рейнольдса для численного моделирования задач обтекания зданий // В мире научных открытий – 2010 – №4 (10), Часть 13 – С.149-151.

10. Варапаев В.Н., Дорошенко А.В. Оценка дискомфорта, вызываемого ветром в пешеходных зонах внутри застроенной территории // Сборник трудов Тринадцатой Международной межвузовской научно-практической конференции молодых ученых, докторантов и аспирантов. Строительство – формирование среды жизнедеятельности. Москва. МГСУ. – 2010 – С.102-105.

11. Дорошенко А.В. Численное моделирование и расчет ветровых воздействий на уникальные здания и комплексы // Сборник трудов Второй Международной Научно-практической конференции «Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях». Москва. ВВЦ. – 2010 – С. 243-246

12. Дорошенко А.В. Влияние топографии местности на ветровые потоки // Сборник докладов III Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов "Современная российская наука глазами молодых исследователей" – 2013 – С.232-235.

КОПИ-ЦЕНТР св.: 77 007140227 Тираж 100 экз.
г. Москва, ул. Енисейская, д. 36.
тел.: 8-499-185-79-54, 8-906-787-70-86
www.kopirovka.ru