На правах рукописи

Вальгер Светлана Алексеевна

СОЗДАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ВЕТРОВЫХ И УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА КОНСТРУКЦИИ

Специальность 05.13.18. – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)»

Научный руководитель: **Федорова Наталья Николаевна**,
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:
Пахомов Максим Александрович,
доктор физико-математических наук, доцент по кафедре физики, ведущий научный сотрудник отдела термогазодинамики, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук

Белостоцкий Александр Михайлович,
доктор технических наук, профессор по кафедре информатики и прикладной математики, начальник Научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Ведущая организация:
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИВТ СО РАН)

Защита состоится 5 апреля 2016 г. в 15^{00} часов на заседании диссертационного совета Д 003.061.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМиМГ СО РАН) по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, конференц-зал ИВМиМГ СО РАН, тел. (383)330-71-59.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, http://www.sscc.ru.

Автореферат разослан «20» января 2016 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 003.061.02
при ИВМиМГ СО РАН, д.ф.-м.н. Сорокин
Сергей Борисович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью обеспечения надежности, безопасности и пригодности к эксплуатации зданий и сооружений в современных городах. В последние годы в России наблюдается тенденция к увеличению плотности городских застроек и усложнению архитектурных форм зданий, что приводит к изменению внешней аэродинамики городов. Для определения ветрового воздействия на здания в городских массивах необходимо исследование структуры течения воздуха в приземном слое атмосферы (далее - ПСА) с учетом турбулентных эффектов, рельефа местности, интерференционных эффектов от окружающей застройки. Интерференционные эффекты также играют существенную роль при обтекании зданий потоком воздуха в критических режимах, связанных с формированием ударных волн (далее - УВ), образовавшихся в результате взрывов. Прогнозирование сценариев распространения УВ в плотных застройках и анализ внешних аэродинамических воздействий на здания позволяют разработать эффективные защитные мероприятия, снижающие риск разрушения несущих конструкций и конструктивных элементов фасадов зданий и сооружений.

Степень разработанности темы исследования. На основе выполненного обзора литературы можно выделить три основных подхода к оценке ветровых и ударно-волновых воздействий на здания и сооружения:

1. *Проведение физических экспериментов и натурных испытаний.*

Экспериментальным исследованиям ветровых нагрузок на здания с использованием аэродинамических установок в рамках теории подобия посвящены работы Н. А. Попова, С. Д. Саленко, С. М. Горлина, С. В. Николаева, В. И. Терехова, А. И. Гныри, М. А. Березина, I. P. Castro, K. Mehta, T. Ishihara, K. Hibi и др. Экспериментальные исследования воздействия взрыва на строительные конструкции проведены в работах С. С. Набатова, В. А. Могилева, М. И. Ганопольского, А. С. Еременко, P. Smith, T. Rose и др. Эксперименты по изучению ветровых и ударно-волновых течений позволяют получить обоснованные данные о физике явлений, однако они являются дорогостоящими и существенно ограничены характеристиками экспериментальных установок (например, по способности воспроизводить толщину пограничного слоя, превышающего высоту обтекаемых зданий при оценке ветровых воздействий).

2. *Расчет нагрузок по нормативным методикам и эмпирическим формулам.*

В российской и зарубежной практике при проектировании строительных объектов применяются нормативные документы, описывающие классификацию и методики расчета критических значений ветровой и ударно-волновой нагрузки на основе полуэмпирических подходов, представляющих собой обобщение данных физических экспериментов. Следует отметить, что современные нормативные методики при оценке ветровых нагрузок не позволяют учитывать или неполно учитывают сложную пространственную форму зданий, расположение зданий в комплексной застройке, влияние

рельефа местности. Кроме того, обязательный расчет конструкций на особые типы нагрузок, к которым относится ударно-волновое воздействие, производится только для промышленных объектов, что фактически исключает оценку безопасности и надежности зданий в городских кварталах при возникновении неконтролируемых взрывов.

3. *Моделирование, основанное на полных физико-математических моделях.* Математическое моделирование задач ветрового и ударно-волнового воздействия на здания позволяет существенно дополнить физические эксперименты, получить более детальную информацию о течении и учесть факторы, которые не могут быть оценены с помощью нормативных методик. Решению модельных задач обтекания плохообтекаемых конфигураций в режимах, соответствующих нормальным атмосферным условиям, и расчетам ветровой нагрузки на реальные здания и сооружения посвящены работы А. М. Белостоцкого, С. И. Дубинского, С. А. Исаева, Е. Ю. Филатова, С. В. Гувернюка, В. А. Гутникова, T. Stathopoulos, A. Baskaran, B. Blocken, Y. Tominaga, A. Mochida, A. Kashef и др. Следует отметить, что в большинстве работ для моделирования турбулентных течений используется приближение логарифмического подслоя, что не позволяет описать отрывные зоны и, следовательно, предсказать распределение коэффициента давления. Отсутствуют результаты оценки влияния сложной орографии местности, интерференционных эффектов, структуры отрывных течений на характер ветровой нагрузки в плотной городской застройке.

Численному моделированию взрывных процессов посвящены работы Ч. Мэйдера, Я. Б. Зельдовича, В. Н. Зубарева, Г. Т. Володина, В. Н. Охитина, А. М. Ременникова и др. Сложная ударно-волновая структура течений, инициированных детонацией зарядов конденсированных взрывчатых веществ (далее - ВВ), требует качественного разрешения течения на разрывах и в областях высоких градиентов, для чего используется адаптация расчетной сетки. Разработке методов динамической адаптации расчетных сеток посвящены работы В. Д. Лисейкина, Г. С. Хакимзянова, M. J. Berger, J. F. Daunenhofer, W. Cao, H. D. Ceniceros и др.

Учитывая актуальность проблемы, а также опираясь на анализ имеющихся подходов к ее решению, **целью** данной работы является разработка комплексных вычислительных технологий для расчета внешних статических и динамических нагрузок на строительные объекты, обусловленных воздействиями воздушного потока при режимах обтекания в широком диапазоне амплитуд и временных характеристик нагрузок с учетом орографического фактора и интерференционных эффектов. Исходя из поставленной цели исследования, в работе решены следующие **задачи**:

1. Разработана и реализована вычислительная технология, основанная на полных физико-математических моделях механики сплошной среды, позволяющая применить комплекс инженерного анализа ANSYS Fluent для

расчета ветровой нагрузки на здания в условиях плотной городской застройки и с учетом орографического фактора.
2. Разработана и реализована вычислительная методика, основанная на полных физико-математических моделях механики сплошной среды, позволяющая применить комплекс инженерного анализа ANSYS AUTODYN для оценки сценариев распространения ударных волн, инициированных детонацией зарядов конденсированных взрывчатых веществ, и расчета динамической ударно-волновой нагрузки на здания в условиях плотной городской застройки.
3. Разработан и программно реализован алгоритм адаптации расчетной сетки в задачах с ударными волнами.
4. Проведена верификация численных алгоритмов и валидация разработанных вычислительных технологий на модельных задачах, имеющих аналитическое решение или экспериментальные данные.
5. Выполнено моделирование турбулентного потока воздуха в окрестности здания сложной формы в диапазоне скоростей набегающего потока, соответствующих типичным атмосферным условиям.
6.Выполнено моделирование турбулентного потока воздуха в окрестности городского микрорайона в диапазоне скоростей набегающего потока, соответствующих нормальным атмосферным условиям, проведено исследование интерференционного влияния зданий в застройке.
7. Выполнено моделирование турбулентного потока воздуха в окрестности здания, расположенного на местности с неоднородным рельефом, исследовано влияние орографического фактора на аэродинамику здания.
8. Выполнено моделирование процесса распространения ударных волн в городской среде и определена динамическая нагрузка на стенки зданий.

Методы исследования. В работе используются надежные методы численного моделирования задач механики сплошной среды, основанные на решении полных трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса для расчета атмосферных течений воздуха. Для моделирования атмосферной турбулентности применяется подход осреднения уравнений Навье-Стокса по Рейнольдсу, которые замыкаются с помощью двухпараметрических моделей турбулентности. Для численной аппроксимации уравнений используется метод конечных объемов повышенного порядка точности. Для расчета ударно-волновых течений, инициированных детонацией заряда конденсированного ВВ, используются трехмерные нестационарные уравнения Эйлера, для аппроксимации которых применяется метод конечных разностей повышенного порядка точности. Для повышения точности численного решения и увеличения ресурсной эффективности вычислений разработан и реализован эффективный алгоритм динамической адаптации расчетных сеток, основанный на методе эквираспределения. Моделирование проведено с использованием инструментов программных модулей ANSYS Fluent, ANSYS Autodyn, Civil 3D, дополненных набором пользовательских программ для создания физико-

математической модели и задания граничных условий, а также для ряда задач – с использованием оригинального программного комплекса.

Научная новизна состоит в следующем:

1. Разработан оригинальный набор пользовательских функций и подпрограмм для создания физико-математической модели и формирования входных условий, позволяющий применить комплекс ANSYS Fluent для решения задач ветровой аэродинамики зданий.

2.Впервые выполнен детальный анализ пространственной структуры течений в окрестности зданий различной формы с учетом интерференционных эффектов от окружающей застройки, сложного рельефа местности и с разрешением вязкого ламинарного подслоя. Показано, что интерференционные эффекты и неоднородный рельеф местности могут существенно влиять на структуру течения в окрестности зданий, размер и форму отрывных зон, а также приводить к существенному (более чем в 2 раза) изменению значений коэффициента давления.

3. Разработан и использован для расчета течений с ударными волнами оригинальный программный комплекс решения уравнений Эйлера с динамической адаптацией расчетной сетки.

4. Впервые для условий плотной городской застройки описан сценарий распространения УВ, образовавшихся в результате детонации заряда конденсированного ВВ, и предсказаны положения потенциально опасных зон, что необходимо для разработки защитных мероприятий и планирования безопасной городской среды.

Положения, выносимые на защиту, в соответствии с пунктами паспорта специальности:

(Пункт 3)

1.Численный алгоритм расчета одно- и двумерных уравнений невязкого сжимаемого газа в преобразованных криволинейных координатах с учетом динамической адаптации расчетной сетки на основе эффективного метода эквираспределения.

2. Тестирование и обоснование применения численных моделей вихревой вязкости для расчета отрывных турбулентных течений в приземном слое атмосферы.

3. Разработка и валидация методики численного моделирования турбулентных течений газа в приземном пограничном слое атмосферы в окрестности плохообтекаемых тел и их систем.

4. Разработка и валидация методики численного моделирования скоростных ударно-волновых течений невязкого сжимаемого газа в окрестности плохообтекаемых тел и их систем, имитирующих городскую застройку.

(Пункт 4)

5. Набор пользовательских функций и подпрограмм, обеспечивающий построение физико-математической модели и задание граничных условий

и позволяющий применить комплекс инженерного анализа ANSYS Fluent для решения задач расчета ветрового воздействия на сооружения.

6. Проблемно-ориентированный программный модуль, реализующий численный алгоритм расчета одно- и двумерных уравнений невязкого сжимаемого газа.

7. Проблемно-ориентированный программный модуль, реализующий численный алгоритм динамической адаптации конечно-разностных расчетных сеток к высоким градиентам и разрывам решения.

(Пункт 5)

8. Результаты численных расчетов пространственных нестационарных отрывных турбулентных несжимаемых течений воздуха в окрестности зданий и их комплексов с учетом однородной и неоднородной подстилающей поверхности.

9. Результаты исследования влияния орографической неоднородности подстилающей поверхности на изменение распределения газодинамических параметров течения воздуха в приземном слое атмосферы.

10. Результаты численных расчетов ветровой нагрузки на здания и их комплексы в условиях широкого диапазона форм и высот строительных объектов. Результаты исследования эффектов интерференции пространственных вихревых структур, образующихся при обтекании потоком воздуха плохообтекаемых тел и их комплексов, и их влияния на характер распределения ветрового давления на стенки обтекаемых конфигураций.

11. Результаты численных расчетов нестационарных невязких сжимаемых течений газа с учетом многократного отражения, интерференции и дифракции ударных волн, а также распределения ударно-волновой нагрузки на стенки плохообтекаемых тел и их систем.

Практическая ценность результатов исследования. Разработанные автором численные методики и алгоритмы могут быть использованы в проектной деятельности для уточнения данных о внешних аэродинамических нагрузках на строительные объекты; при разработке защитных мероприятий, нацеленных на повышение устойчивости сооружений при воздействии взрывов; в учебном процессе для подготовки специалистов в области проектирования зданий и сооружений, МЧС, планирования городской среды. Исследования были поддержаны грантами ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (2009-2013) № 01201275627 и № 01201275629; РФФИ № 115020610110; проектом в рамках задания Минобрнауки РФ № 2014/140 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности № 114091140003; проектом Аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (2009–2011) № 2.1.1/11316; совместным грантом Минобрнауки РФ и DAAD (Германия) на 2013/2014 г № 11.9152.2014.

Достоверность изложенных в работе результатов обусловлена применением математически обоснованных численных методов решения; сопос-

тавлением результатов численных расчетов модельных задач с аналитическими аналогами; проверкой сходимости численных результатов на последовательности вложенных сеток; сопоставлением результатов расчетов с данными экспериментальных исследований.

Апробация работы. Основные результаты работы представлены на 7 научных семинарах: кафедры информатики и прикладной математики НИУ МГСУ (рук. д.т.н., чл.-корр. РААСН А. М. Белостоцкий), «Информационно-вычислительные технологии» ИВТ СО РАН (рук. акад. РАН Ю. И. Шокин и д.ф.-м.н. В. М. Ковеня), «Механика вязкой жидкости и турбулентность» ИТПМ СО РАН (рук. д.ф.-м.н. В. В. Козлов), отдела термогазодинамики ИТФ СО РАН (рук. д.т.н. В. И. Терехов), лаборатории волновых процессов в ультрадисперсных средах ИТПМ СО РАН (рук. д.ф.-м.н. А. В. Федоров), научно-техническом Совете по физике атмосферы, океана и охраны окружающей среды ИВМиМГ СО РАН (рук. д.ф.-м.н. В. В. Пененко и д.ф.-м.н. В. И. Кузин), а также на всероссийских и международных научных конференциях: XI Всероссийский съезд по фундаментальный проблемам теоретической и прикладной механики (Казань, 2015), международная конференция «Потоки и структуры в жидкостях» (Калининград, 2015), Всероссийский семинар «Динамика Многофазных Сред» (Новосибирск, 2013, 2015), 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (Барселона, 2014), 17-я Международная конференция по методам аэрофизических исследований ICMAR'14 (Новосибирск, 2014), XII международная конференция «Забабахинские научные чтения» (Снежинск, 2014), Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные вопросы строительства» (Новосибирск, 2012–2015), «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании –2013» (Усть-Каменогорск, 2013), Taiwan–Russia Bilateral Symposium on Civil Engineering (Тайпей, 2012), Всероссийский семинар с международным участием по струйным, отрывным и нестационарным течениям (Томск, 2012; Новосибирск, 2015) и др.

Личный вклад автора состоит в постановке задач, анализе и оценке имеющихся подходов к их решению, выборе методов решения задач и создании технологий и методик, основанных на этих методах, проведении расчетов, анализе и оценке результатов расчетов. В статьях, опубликованных в соавторстве, личный вклад автора заключался в участии на всех этапах работы.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в **19** печатных изданиях, из которых **4** статьи опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК [1 - 4], **1** программа – в свидетельствах государственной регистрации программ для ЭВМ [5].

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и семи приложений. Общий объем диссертации составляет **220** печатных листов, включая **81** рисунок и **10** таблиц. Список цитированной литературы включает **251** наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** содержится обоснование актуальности исследования, дан обзор научной литературы и нормативной документации по теме исследования, классифицированы современные подходы к оценке ветровых и ударно-волновых воздействий на здания и сооружения, сформулированы цели и задачи, научная новизна, практическая ценность, а также основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведены постановки задач, обоснование выбора физико-математических моделей, методов их решения и описание инструментов их реализации. В **разделе 1.1** даны уравнения движения сплошной среды и обоснованы используемые допущения. Для описания течения воздуха в условиях нейтральной стратификации атмосферы использованы осредненные по Рейнольдсу трехмерные уравнения Навье-Стокса при постоянной плотности и температуре. Для замыкания используются модели вихревой вязкости: k-ε (B. E. Launder), k-ω (D. C. Wilcox), k-ω *SST*(F. Menter) и *SAS* (F. Menter, Y. Egorov) с коррекцией члена генерации турбулентной кинетической энергии *Kato-Launder* (M. Kato, B. E. Launder). При моделировании ударно-волновых течений воздуха в работе принято допущение о пренебрежимо малом эффекте вязкого трения по сравнению с инерционными силами, поэтому в качестве исходной системы уравнений рассматриваются уравнения Эйлера, дополненные уравнением состояния идеального газа для воздуха и уравнением состояния Джона-Уилкинса-Ли для продуктов детонации.

В **разделе 1.2** приведены постановки граничных условий на искусственных границах расчетных областей. Граничные условия для скорости и турбулентных параметров в ПСА на входной границе заданы в соответствии с теорией Монина-Обухова на основе данных натурных замеров. Масштаб турбулентных пульсаций для всех расчетных случаев варьировался по высоте области и соответствовал в каждом расчетном узле расстоянию до стенки подложки. На стенках здания и подложке задано условие вязкого прилипания. При расчете ударно-волновых течений в условиях невязкой среды на твердых стенках задано условие непротекания, а на внешних искусственных границах среды - мягкие неотражающие граничные условия, обеспечивающие выход возмущений за границы области.

В **разделе 1.3** описана аппроксимация уравнений и дискретизация расчетных областей. Для решения уравнений Навье-Стокса использован метод SIMPLE коррекции давления и метод конечных объемов. Для аппроксимации конвективных членов используется MUSCL схема повышенного порядка точности. Для аппроксимации диффузионных членов уравнений использована центрально-разностная схема второго порядка точности. Градиенты скорости на гранях ячеек, необходимые для вычисления вязких потоков, определяются через осреднение градиентов в центрах ячеек по теореме Грина-Гаусса. Дискретизация уравнений по времени осуществляется по неявной схеме второго порядка. Аппроксимация уравнений Эйлера выполнена на основе

конечно-разностных схем с явным интегрированием по времени. В работе использованы: модификация метода Годунова второго порядка точности, комбинированный метод коррекции потоков *FCT*, а также *FVS* методы расщепления вектора потоков с использованием *TVD* схемы повышенного порядка точности. Для решения уравнений Эйлера в работе предложен и программно реализован алгоритм адаптации расчетной сетки, основанный на методе эквираспределения. Уравнения движения, записанные в криволинейных координатах, дополнены уравнениями для сетки:

$$x_\tau = \nabla(\omega\nabla x)\,,\; y_\tau = \nabla(\omega\nabla y),\; \omega = \sqrt{1+\sigma^2\cdot|\nabla\rho|^2}\,,$$

где σ – параметр метода, $\nabla\rho$ – градиент плотности, в зависимости от которого происходит сгущение узлов сетки. Для аппроксимации уравнений для сетки используется конечно-разностная схема второго порядка, реализованная с помощью метода дробных шагов (продольно-поперечной прогонки).

В **разделе 1.4** описаны инструменты реализации вычислительных методик. Основные этапы расчетов включают: построение геометрических моделей зданий и их комплексов на основе данных CAD систем; формирование расчетных областей с учетом рельефа местности на основе обработки данных сканирования территорий с помощью метода триангуляции Делоне в Civil 3D; построение расчетных сеток в соответствии с требованиями к разрешению особенностей исследуемых течений, изложенными в разделах диссертации 1.1 и 1.3; формирование подпрограмм для создания физико-математических моделей и набора граничных условий в решателе Fluent с использованием языков *Scheme (Lisp)* и *C*. Дано описание структуры модулей оригинального программного комплекса для адаптации расчетной сетки и решения 1D и 2D уравнений Эйлера, решателя AUTODYN для расчета ударно-волновых нагрузок на здания. Структура комплекса для расчета уравнений Эйлера включает универсальный модуль 1D и 2D адаптации расчетной сетки к градиентам заданного газодинамического параметра в течении (в расчетах ударно-волнового течения – плотность), а также модули решения уравнений Эйлера в криволинейных координатах с адаптацией сетки.

Во **второй главе** проведена верификация и валидация численных методов и расчетных методик на задачах, имеющих точное аналитическое решение, и на модельных задачах, для которых имеются экспериментальные данные. Исследование алгоритма адаптации расчетной сетки (**раздел 2.1**) проведено на 1D и 2D задачах о распаде произвольного разрыва (тесты Сода, Лакса, сверхзвуковой). Показано, что приближенное решение на адаптивной сетке успешно разрешает характерные газодинамические особенности течения (рис. 1) и дает меньшую среднеквадратичную погрешность решения по сравнению с решением, полученным на фиксированной сетке. На основе проведенных экспериментов указаны диапазоны эффективного применения алгоритма адаптации сетки для задач с разрывными решениями.

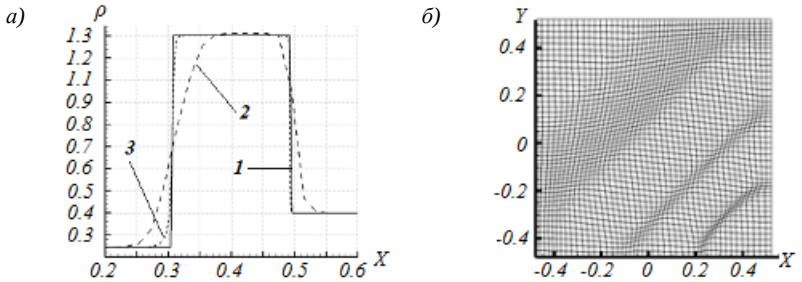


Рис. 1. Результаты расчетов 1D теста Лакса при t=0.2 (*а*): точное решение (1); численное решение на равномерной (2) и на адаптивной (3) сетках; сетка, адаптированная к решению 2D теста Сода (*б*)

В **разделе 2.2** рассмотрена 3D задача о воздействии воздушного взрыва заряда конденсированного ВВ на призму прямоугольного сечения, установленную на плоской подложке. Моделирование проведено в условиях экспериментальных данных T. Rose, 2001. Выполнено исследование сходимости по сетке. Подробно проанализирована волновая картина течения. Построены зависимости от времени статического давления и удельного импульса в точках, расположенных на стенках призмы (рис. 2). Проведено их сравнение с экспериментальными данными и результатами, полученными с помощью эмпирической функции *CONWEP* (G. Randers-Pehrson). Показано, что метод *FCT* позволяет достаточно точно предсказать амплитуду основной и вторичной УВ. Эмпирическая функция *CONWEP* не воспроизводит «отрицательную» фазу воздействия, не учитывает эффекты затенения и некорректно предсказывает время прихода УВ на подветренную сторону призмы и пиковые значения ударно-волновой нагрузки.

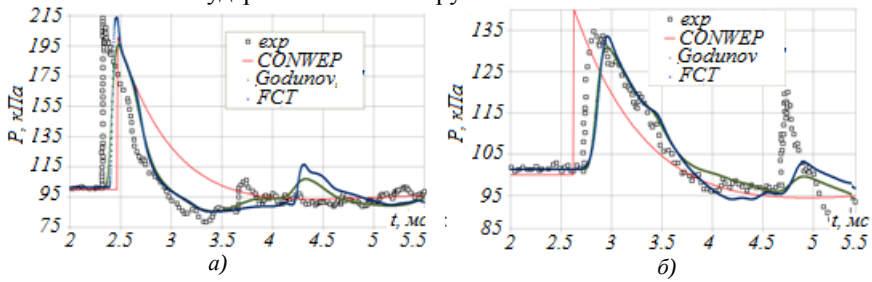


Рис. 2. Статическое давление в точках, расположенных на наветренной (а) и подветренной стенках призмы (б), полученное в эксперименте, расчетах по различным схемам и эмпирической функции CONWEP

Раздел 2.3 посвящен 2D расчетам модельных задач обтекания плохообтекаемых тел (цилиндр, тандем призм) в диапазоне чисел Рейнольдса $1<Re<2\times10^4$ с использованием *k-ε, k-ω, k-ω SST* и *SAS* моделей турбулентности. Проведено сравнение с экспериментальными данными из литературы результатов расчетов по структуре нестационарного турбулентного течения, а также по характерным частотам срыва вихрей с кромок обтекаемых тел.

Показано, что для рассматриваемых чисел Рейнольдса *k-ω SST* и *SAS* модели позволяют получить характерные частоты срыва вихрей, близкие к описанным в литературе. Однако *SAS* модель является более чувствительной к данным на входной искусственной границе и требует более подробного сеточного разрешения.

В **разделе 2.4** при соблюдении критериев аэродинамического подобия выполнено численное исследование пространственного отрывного течения в окрестности призмы квадратного сечения с высотой h=0.16 м. Скорость в ядре набегающего потока составляет U_∞=7.68 м/с. Для моделирования турбулентности использованы подходы *k-ε* (м. 1), *k-ω* (м. 2), *k-ω SST* (м.3), *k-ω* с ограничителем члена генерации ТКЭ (м. 2.1), *k-ω* с коррекцией *Kato-Launder* (м. 2.2), *k-ω SST* с коррекцией *Kato-Launder* (м. 3.1). Получена вихревая структура течения в окрестности призмы (рис. 3), предсказаны отрывные зоны (*O31–O35*) и линия растекания потока (*z1*) на фронтальной стенке призмы. Для модели *k-ω SST* с использованием коррекции члена генерации ТКЭ *Kato-Launder* получено хорошее соответствие с экспериментальными данными T. Ishihara по распределению средней скорости и ТКЭ в характерных сечениях в окрестности призмы (рис. 4) и размеру отрывных зон.

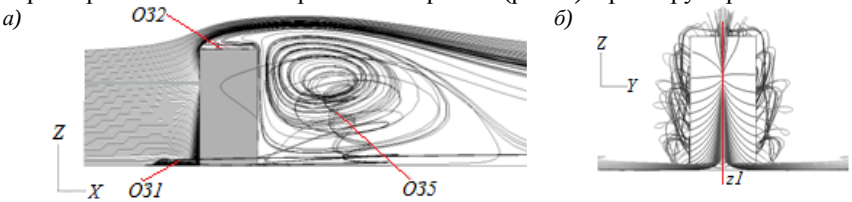


Рис. 3. Структура течения в окрестности параллелепипеда: вид сбоку (а), спереди (б)

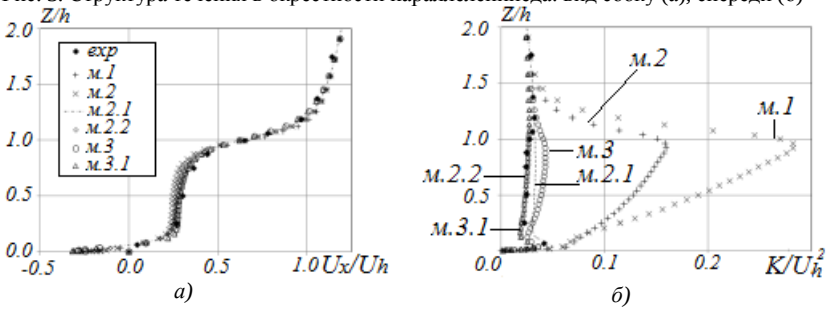


Рис. 4. Экспериментальные и расчетные профили средней продольной скорости (*а*) и ТКЭ (*б*) в сечении, расположенном в отрывной зоне перед призмой

В **третьей главе** приведены результаты расчета ударно-волновых и ветровых воздействий на здания и сооружения с учетом их формы, комплексной застройки и неоднородного рельефа местности.

В **разделе 3.1** рассматривается задача об ударно-волновом течении в окрестности имитирующего фрагмент городской застройки комплекса призм различного сечения и высоты. Взрыв инициирован в т. *O* (рис. 5, *а*)

детонацией заряда ВВ с массой m=0.016 кг в тротиловом эквиваленте. Моделирование проведено в условиях экспериментальных данных F. Shaun, 2011. По результатам расчета выполнено исследование сценария распространения УВ по времени с учетом их отражения от стенок, интерференции и дифракции (рис. 5, *а*, УВ 1–5). По результатам расчетов с различными схемами выполнен анализ динамической нагрузки $P(t)$ в характерных точках на зданиях (рис. 5,*б*, для *T21*). Проведено сравнение с экспериментальными данными, показавшее удовлетворительное соответствие.

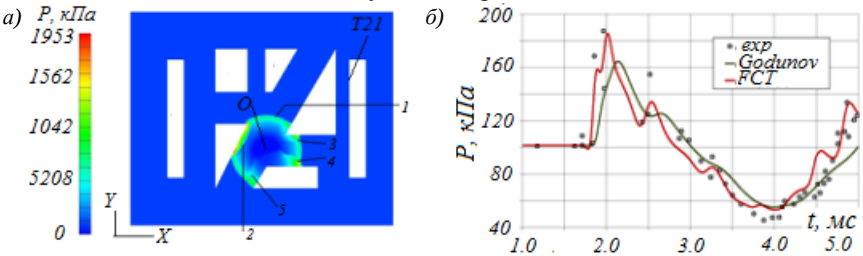


Рис. 5. Мгновенное поле статического давления при t=0.2 мс в сечении z=0.105 м (*а*); экспериментальные и расчетные зависимости $P(t)$ в точке *T21*(*б*)

В **разделе 3.2** исследована внешняя аэродинамика реального здания сложной формы, расположенного в Биотехнопарке р.п. Кольцово Новосибирской области (*А*, рис. 6, *а*) в условиях потока, соответствующих атмосферным. Моделирование выполнено в масштабе 1:150 с соблюдением геометрического подобия и подобия по числу Рейнольдса в соответствии с экспериментом, проведенным по заказу ООО НИПТиПЦ «Сибстройреконструкция».

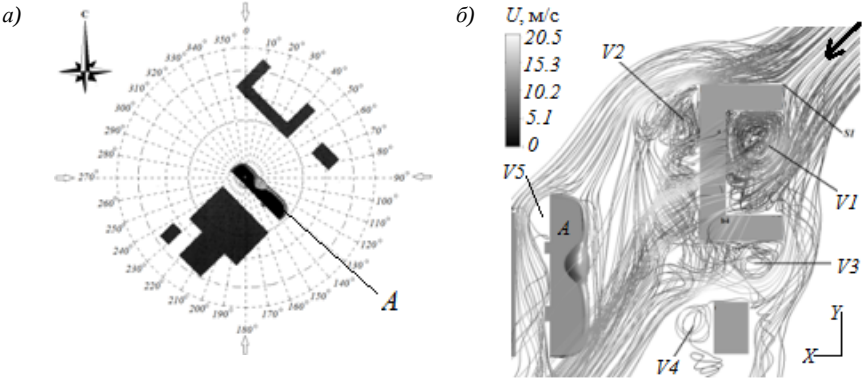


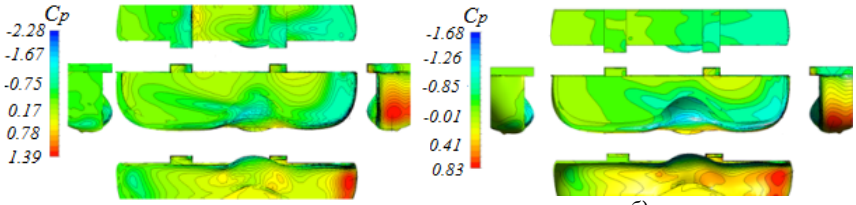
Рис. 6. Схема расположения зданий для (*а*) и структура течения (*б*) для *к1*

В работе проведены расчеты для двух конфигураций: здание расположено в комплексе строений (*к*1), что соответствует эксперименту, и изолированно (*к2*). По результатам анализа сеточной сходимости выбрана сетка ≈ 46 млн. ячеек с разрешением вязкого подслоя (y^+≈1). По результатам расчетов для обеих конфигураций получена сложная пространственная структура течения (рис. 6, *б* для *к1*), описаны формы и размеры характер-

ных отрывных зон, расположение вихревых структур (*V1–V5*) и исследовано влияние особенностей течения на характер ветровой нагрузки на здание *А*. Показано, что учет влияния интерференционных эффектов для *к1* приводит к более чем 50% увеличению ветровой нагрузки на здание *А* по сравнению с *к2* (рис. 7, *а*, *б*). При этом существенно меняется характер распределения коэффициента ветрового давления C_p на поверхность здания, что особенно важно при конструировании фасадов. Сравнение полученных в расчетах данных по C_p в характерных точках на фасаде здания *А* для *к1* и *к2* и в эксперименте (табл. 1) показало, что расчет *к1* удовлетворительно предсказывает значения C_p.

Таблица 1. Экспериментальные и расчетные значения коэффициента давления C_p в точках g1–g5 для сечения z=0.760h_A

	g1	g2	g3	g4	g5
к1	-0.835	-1.157	-0.836	-0.52	-0.482
к2	-0.521	-0.885	-1.354	-1.261	-1.149
Эксперимент	-0.831	-1.128	-0.876	-0.444	-0.408

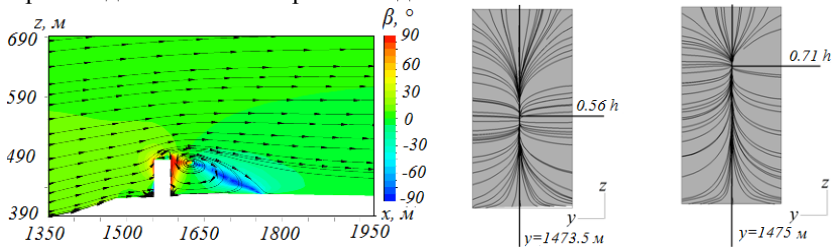


а) *б)*

Рис. 7. Расчетные распределения C_p по поверхности здания *А* для *к1*(*а*) и *к2* (*б*)

В **разделе 3.3** исследуется влияние орографического фактора на характер ветровой нагрузки на здание призматической формы с квадратным сечением в реальном масштабе и соотношением сторон 1:1:2. Высота здания составляет h=60 м. Рассматривается фрагмент территории со сложным рельефом и характерными размерами 2950×3475×1500 м, для которого имеются данными натурных замеров средней скорости и ТКЭ на нескольких характерных высотах (H. Marvin, 2014). На первом этапе исследуется структура течения над сложным рельефом. Описано расположение локальных отрывных зон, изменение направления потока при обтекании неоднородной подложки. Исследовано влияния орографии местности на распределение турбулентных параметров. Проведенный анализ профилей средней скорости в характерных сечениях позволяет сделать вывод о сильной обратной корреляционной зависимости между степенью наполненности профилей скорости и изменением рельефа местности по высоте. Далее выполнено сравнение аэродинамических характеристик здания при его обтекании потоком воздуха в условиях неоднородного рельефа (*с1*) и плоской подложки (*с2*). Показано, что в случае *с1* угол атаки потока на здание существенно изменяется (рис. 8, *а*), что приводит к перестроению структуры течения, изменению расположения линии растекания потока на наветренной стенке (рис. 8, *б*, *в*), возникновению

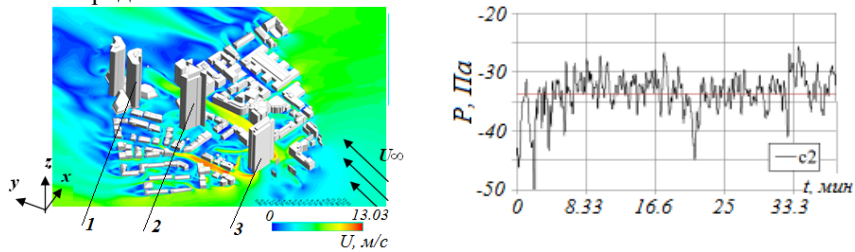
асимметрии в отрывных зонах и увеличению более чем в 2 раза значений ветрового давления на поверхности здания.



а) *б)* *в)*

Рис. 8. Распределение угла поворота потока β в сечении y=1475 м в окрестности здания для конфигурации *c1* (*а*); линии тока, касательные к поверхности, расположенной на расстоянии d=10^{-3} м от фронтальной стенки здания для конфигурации *c1* (*б*) и *c2* (*в*)

В **разделе 3.4** рассматривается нестационарное турбулентное течение несжимаемого воздуха в окрестности комплекса зданий, расположенного в деловом районе г. Франкфурт/Майн (рис. 9, *а*). Численное моделирование выполнено в реальном масштабе. Размеры микрорайона в плане составляли 480×480 м. Максимальная высота зданий (здание *2*) составляет h_{max}≈ 186 м. Параметры набегающего потока выбраны в соответствии с данными натурных замеров A. Berneiser, 1997. Число Рейнольдса, вычисленное по толщине ПСА и скорости U_∞, составляет Re≈3.2×10^8. На основе проведенных расчетов описаны закономерности течения, которое имеет выраженный нестационарный характер, определены коэффициенты ветрового давления на здания и районы пешеходной комфортности. На рисунке 9, *б* показано мгновенное распределение модуля скорости в сечении z=8 м. При обтекании потоком здания *3* происходит формирование вихревой дорожки, а вихри, срывающиеся с его боковых кромок, оказывают существенное влияние на пульсационную составляющую ветрового давления на здании. Пульсационная составляющая ветровой нагрузки на наветренной стенке здания *2* достигает 30% от средних значений ветровой нагрузки (рис. 9, *б*). Данный расчет позволяет говорить о применимости разработанной методики для расчета аэродинамики микрорайонов и городов.



а) *б)*

Рис. 9.Расчетное мгновенное поле модуля скорости в сечении z=8 м (*а*) и статическое давление в точке, расположенной в сечении z=60 м на фронтальной поверхности здания 2 (*б*)

В **заключении** приведены основные результаты работы. В **приложениях** приведены: пример подпрограммы для формирования профилей входных граничных условий для Fluent (**A**); фрагмент файла журнала для построения физико-математической модели вязкого несжимаемого течения газа в окрестности здания (**B**); формат хранения данных LANDXML (**C**); программный код, реализующий адаптацию расчетной сетки (**D**); программные реализации для модулей решения 1D и 2D уравнений Эйлера на адаптивной сетке (**E**, **F**); копия свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ в реестре программ для ЭВМ Федеральной службы по интеллектуальной собственности (**G**).

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Вальгер С. А., Федорова Н. Н. Применение алгоритма адаптации расчетной сетки к решению уравнений Эйлера // Вычислительные технологии. – Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2012. – Т. 17. – № 3. – С. 24–33.
2. Вальгер С. А., Федоров А. В., Федорова Н. Н. Моделирование несжимаемых турбулентных течений в окрестности плохообтекаемых тел с использованием ПК ANSYS Fluent // Вычислительные технологии. – Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2013. – Т. 18. – № 5. – С. 27–40.
3. Вальгер С. А., Федоров А. В., Федорова Н. Н. Структура турбулентного отрывного течения в окрестности установленной на пластине призмы с квадратным сечением // Теплофизика и Аэромеханика. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2015. – Т. 22. – № 1. – С. 29–42.
4. Вальгер С. А., Данилов М. Н., Федорова Н. Н., Федоров А. В. Сравнение данных моделирования ударно-волнового воздействия на сооружения с использованием AUTODYN и LS-DYNA // Известия Высших учебных заведений. Строительство. – Новосибирск: НГАСУ, 2014. – № 11. – С. 77–92.
5. Вальгер С. А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015618456 «Расчет невязких сжимаемых течений газа с использованием адаптивно-подвижной сетки».
6. Вальгер С. А., Федорова Н. Н. Численное исследование обтекания зданий турбулентным потоком воздуха в ПК ANSYS CFD Fluent // Труды НГАСУ. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2013.– Т. 16. – № 1 (55). – С. 101–112.
7. Бедарев И. А., Вальгер С. А., Федорова Н. Н. Расчеты сверхзвуковых течений с использованием адаптивных сеток // Труды НГАСУ. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2010. – Т. 13. –№ 1 (47). – С. 58–63.
8. Valger S. A., Fedorova N. N. Mathematical modeling of wind flow in the vicinity of buildings and their complexes // Потоки и структуры в жидкостях: Международная конференция; 23–26 июня 2015 г., г. Калининград: Сборник материалов конференции. – М. МАКС Пресс, 2015. – С. 258–262.
9. Вальгер С. А., Данилов М. Н., Федорова Н. Н., Федоров А. В. Численное моделирование ударно-волновых воздействий на строительные конструкции в ПК ANSYS EXPLICIT // Забабахинские научные чтения: сборник материалов XII Международной конференции 2–6 июня 2014 г. – Снежинск: Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2014. – С. 282–283.