

На правах рукописи



Мешкова Виктория Дмитриевна

**ФИЗИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
АЭРОДИНАМИКИ И ТЕПЛОМАССООБМЕНА В УСЛОВИЯХ
ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ**

1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискании ученой степени

кандидата технических наук

Красноярск - 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет» (ФГАОУ ВО «СФУ»)

Научный руководитель: кандидат технических наук,
заведующий кафедры Теплофизики Института инженерной физики и радиоэлектроники ФГАОУ ВО «СФУ»
Дектерев Александр Анатольевич

Официальные оппоненты:

Половников Вячеслав Юрьевич - доктор технических наук, доцент научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

Иванов Николай Георгиевич - кандидат физико-математических наук, доцент, директор Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Защита состоится 15 февраля 2023 года в 9 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.1.129.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН), по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИТ СО РАН: www.itp.nsc.ru. Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просьба отправлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1. (e-mail: dissovet@itp.nsc.ru).

Автореферат разослан «__» декабря 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор РАН



Терехов Владимир Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Рост городского населения приводит к активному строительству новых жилых микрорайонов, удовлетворяющих требованиям рационального природопользования. Для решения этой задачи архитектурно-градостроительные структуры переориентировали подходы в области строительства и направили свои усилия на развитие эффективных технологий, которые позволяют расширять жилые массивы за счет уплотнённого расположения зданий, а также за счёт высотного строительства. Параллельно с развитием мегаполисов происходит расширение промышленной и городской инфраструктуры, которая сопровождается автомобилизацией населения.

Уплотнённое и высотное строительство влечёт за собой необратимые изменения аэрационного режима территории, что совместно с учётом всех возможных источников загрязнения атмосферного воздуха способствует формированию экологически неблагоприятных условий. Строительные материалы сооружений, дорожные полотна и т.д. приводят к изменению естественного теплового баланса города, за счет повышения температуры в застроенных микрорайонах по сравнению с прилегающей территорией к городу. На основании этого, современные города выступают накопителями большей доли падающей солнечной энергии, что способствует к формированию явления «городской остров тепла».

Различного рода факторы и антропогенные источники имеют множество взаимосвязей и носят комплексный характер воздействия на организм человека. В совокупности, формируются дискомфортные условия для человека в зоне его пребывания – в пешеходной области. Также необходимо отметить, что для определения уровня комфорта необходимы критерии оценок, которые позволили бы адекватно идентифицировать скалываемые условия по степени их воздействия на организм человека для выявления оптимальных условий. В качестве критериев рассматриваются биоклиматические индексы, описывающие восприятие человеческим организмом внешнее воздействие системы.

Существующие микромасштабные модели атмосферы города, направлены на изучение аэрационного режима застроенных территорий с определением процессов переноса загрязняющих веществ, а также условий формирования городского острова тепла. Но в настоящее время отсутствуют микромасштабные модели для определения уровня пешеходного комфорта через систему биоклиматических критериев.

На основании вышесказанного, в диссертационной работе основное исследование направлено на разработку микромасштабной численной модели, которая позволит комплексно подходить к решениям задач прогнозирования аэрационных режимов и процессов тепломассообмена в городской среде с учетом различных особенностей внешней среды, с дальнейшей возможностью оценки уровня пешеходного комфорта.

Цель работы заключается в выполнении комплексного анализа формирования условий пешеходного комфорта городской застройки через систему биоклиматических индексов в результате взаимодействия аэродинамических и теплофизических характеристик внешней среды.

Основные задачи:

1. Аргументирование выбора биоклиматических индексов, используемых для оценки внешней среды городской застройки;
2. Создание базы данных основных метеорологических параметров окружающей среды и выполнение исследований текущего состояния уровня комфорта г. Красноярска;
3. Натурные измерения и анализ влияния вида морфотипа застройки на локальные изменения метеорологических параметров;
4. Исследование особенностей аэродинамики обтекания модельных объектов (отдельные здания, тандем зданий, модель микрорайона) с помощью современных систем оптических измерений (визуализация, PIV-метод);
5. Разработка, верификация и апробация микромасштабной численной модели атмосферы для прогнозирования пешеходного уровня комфорта, описывающая динамику атмосферы и режимы переноса загрязняющих газовых и дисперсных примесей в атмосфере города с учетом особенностей метеорологических режимов, воздействия солнечного и теплового излучения, сопряжённого теплообмена с элементами городского (здания, дороги).

Научная новизна:

1. Впервые разработана программа по сбору метеоданных с открытых информационных потоков для г. Красноярска и сформирована организационная структура (база данных), предназначенная для систематизации и обработки взаимосвязанной информации с помощью инструмента Navicat Premium.
2. Разработана комплексная методика многоэтапного расчета условий формирования пешеходного комфорта через систему температурных и сезонных биоклиматических индексов в программном комплексе Lamprug. Впервые выполнена диагностика текущего состояния комфортности внешней среды г. Красноярска через систему температурных и сезонных биоклиматических индексов;
3. Впервые проведено физическое моделирование обтекания ветровым потоком модели реального смешанного морфотипа застройки г. Красноярска и исследована трансформация ветровых зон в результате изменения направления входного потока по отношению к объекту исследования.
4. Впервые разработана, верифицирована и апробирована микромасштабная численная модель прогнозирования пешеходного уровня комфорта через систему температурных и сезонных биоклиматических индексов, а также определена степень влияния аэродинамических и теплофизических характеристик на изменения внешней среды городской застройки.

Практическая значимость заключается в том, что разработанный комплексный подход исследования и прогнозирования пешеходного уровня комфорта городской застройки с учётом множества факторов внешней среды. Отработанные экспериментально-численные исследования возможно использовать при разработке проектной документации капитального строительства для обоснования тех или иных технологических решений, что позволит аргументировано подойти к планированию застраиваемых территорий.

Рассмотренные методологические подходы возможно использовать при разработке нормативно-правовой документации в виде градостроительных норм, правил, регламентов и рекомендаций по обеспечению, должного уровня безопасного и эффективного застраивания земельных участков.

Основные результаты научно-исследовательской деятельности были внедрены в образовательную деятельность в учебных программах бакалавриата 16.03.01 «Техническая физика», магистратуры 14.03.01 «Ядерная энергетика и теплофизика» и аспирантуры 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника». А также внедрены в практическую деятельность АО «Гражданпроект», где была выполнена апробация программного модуля «SigmaEco» на микрорайоне г. Норильска, где полученные результаты оценки влияния застройки на комфортные /дискомфортные условия в пешеходной зоне были выполнены в рамках работы «Разработка архитектурного-планировочной концепции реновации города Норильска до 2035 года».

Основные результаты вошли в научно-исследовательские отчеты по следующим проектам: РФФИ №19-31-90096; Конкурс краевого фонда науки «Целевой конкурс прикладных научных исследований, направленных на решение проблем городского развития» №2020080506564.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке новой микромасштабной численной модели прогнозирования пешеходного уровня комфорта через систему биоклиматических критериев. Разработанна комплексная методика многоэтапного расчета условий формирования пешеходного комфорта через систему температурных и сезонных индексов. На основании разработанных методов исследования диагностики внешней среды становится возможным анализировать и оценивать взаимовлияния аэродинамических теплофизических характеристик на формирование условий комфорта в современных морфотипах городской застройки.

Положения, выносимые на защиту:

1. Сформированная база данных метеорологических параметров на основе данных с федеральных и региональных постов наблюдения, разработанная в специализированной подпрограмме Navicat Premium;
2. Комплексная методика многоэтапного расчета условий формирования пешеходного комфорта через систему температурных и сезонных биоклиматических индексов в программном комплексе Lampyre;
3. Результаты диагностики текущего состояния комфортности внешней городской среды Красноярска на основе данных станций наблюдений и натурных данных;
4. Результаты лабораторного эксперимента обтекания модельных объектов (куб/параллелепипед/модели микрорайона) на аэродинамическом стенде;
5. Результаты верификации микромасштабной метеорологической модели прогнозирования атмосферы на тестовых задачах зарубежных исследований и собственного лабораторного эксперимента;
6. Результаты исследования пешеходного уровня комфорта в реальных морфотипах г. Красноярска.

Обоснованность и достоверность результатов, полученных в ходе выполнения научно-исследовательских работ, основана на строгом математическом описании и проверенных применяемых численных алгоритмов, которые неоднократно были верифицированы на данных физического эксперимента и других численных тестовых задач, выполняемых другими авторами.

Личный вклад автора заключается в разработке плана исследования и постановке задач на всех этапах работы, которые выполнялись автором совместно с научным руководителем. Выполнен обзор нормативной базы критериев

пешеходного комфорта; осуществлён сбор и анализ метеорологических параметров, разработана база данных, а также методика их задания в численную модель. Оценка комфортности городской среды через систему биоклиматических критериев, постановка задачи и интерпретация полученных результатов в ходе физического эксперимента под специфику темы исследования, а также верификация и апробирование численной модели выполнена непосредственно соискателем. Обсуждение полученных результатов, подготовка публикаций по теме диссертации выполнялись совместно с научным руководителем и соавторами.

Апробация работы: Все результаты, которые выносятся на защиту, являются математически достоверными факторами. Они были опубликованы в рецензируемых журналах, а их доказательства неоднократно проверялись специалистами в той области, к которой эти результаты относятся. Результаты диссертации обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях: Всероссийская конференция студентов-физиков и молодых ученых «ВНКСФ-24», 31.03-07.05 2018 гг., г. Томск; VII Международный симпозиум «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений», 01.07-8.07. 2018 гг., г. Новосибирск; Всероссийская научная конференция с международным участием «XI Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике», 21.10-23.10.2019 гг., г. Санкт-Петербург; Международная конференция «Перспективы-2020», 20.04.-18.05.2020 гг., г. Красноярск; V Всероссийская конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых учёных, 13.09-20.09.2020 гг., г. Ялта; Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодых учёных «XXXVI Сибирский теплофизический семинар», 5.10-7.10.2020 гг., г. Новосибирск; VII Всероссийская конференция «Безопасность и мониторинг природных и техногенных систем», 5.10-9.10. 2020 гг., г. Кемерово; XVI Всероссийская школа-конференция молодых учёных с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», 24.11-27.11.2020 гг., г. Новосибирск; VI Всероссийская научная конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика», научная молодежная школа Теплофизика и физическая гидродинамика: современные вызовы (ТФГСВ2021), 22.08-29.08.2021 гг., г. Севастополь; IV Международная научно-практическая конференция «Город, пригодный для жизни», 11.11-12.11 2021 гг., г. Красноярск.

Публикации:

По теме диссертации опубликовано 10 статей, из них 2, входящих в перечень ВАК РФ, и 9 статей, индексируемых Web of Science или Scopus, а также 15 тезисов доклада, индексируемых в базе РИНЦ.

Структура и объём диссертации:

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы. Объём диссертации составляет 149 страниц, включая 102 рисунков и 9 таблиц. Библиография состоит из 175 наименований и 3 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность научного исследования, которая выражена в потребности детального изучения механизмов взаимодействия объектов городской застройки с природными факторами, так как результат данного взаимодействия приводит к формированию экологически опасных и дискомфортных условий в области жизнедеятельности человека (в пешеходной зоне, на высоте 2 м от Земли). Определена цель исследования, поставлены задачи, а также аргументирована научная новизна и сформулирована теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе представлен обзор текущего состояния современных городов. Выражена проблематика отсутствия достаточного уровня пешеходного комфорта в условиях городской застройки на примере г. Красноярска. Рассмотрены общепринятые критерии оценки влияния внешней городской среды на организм человека, а также приведён обзор современных методов исследования аэродинамики и процессов теплообмена в условиях городской застройки.

Вторая глава посвящена описанию методологической основе для анализа условий комфорта в результате взаимодействия природно-климатических фактов с городской застройкой.

Подразделе 2.1 говорится о том, что естественные факторы напрямую связаны с климатом изучаемой территории, следовательно, метеорологические параметры (атмосферное давление, скорость и направление ветра, влажность и температура) позволяют охарактеризовать внешнюю среду, а также могут послужить данными в качестве начальных и граничных условий для микромасштабных численных моделей прогнозирования атмосферных процессов.

Основными источниками сбора необходимых данных могут послужить метеорологические станции и сети мониторинга за окружающей средой. Основоположителем в области гидрометинформации является федеральное государственное бюджетное учреждение ФГБУ «Среднесибирское УГМС» [<http://meteo.krasnoyarsk.ru/>]. Сбор информации осуществляется с 4 наблюдательных пунктов. Для сбора и систематизации данных с федеральных постов наблюдения написан web scraping сайта [<http://meteo.krasnoyarsk.ru/>] с помощью языка программирования Python, с использованием модуля requests mmm. Также было реализовано подключение к «Краевой ведомственной информационно-аналитической системе о состоянии окружающей среды Красноярского края» (КВИАС) [<http://www.krasecology.ru/About>]. Полученные данные были систематизированы в СУБД Navicat Premium, где с помощью SQL-запросов возможно получение статистических данных, которые будут использоваться в дальнейшем в исследовании.

Для пополнения интегральной базы данных, а также для выявления особенностей поведения ветрового потока в условиях разного морфотипа застройки были выполнены натурные наблюдения. Фиксировались данные по основным метеорологическим параметрам. Также в рамках данного исследования были выполнены оценки влияния основного источника загрязнения атмосферы в области пребывания человека – автомобильный транспорт. Контроль осуществлялся в 10 точках по следующим загрязняющим веществам: CO, CO₂, NO₂, взвешенные вещества, неорганическая пыль SiO₂.

Анализ полученных результатов показал, что значения максимально-разовых концентраций в местах отбора проб не превышали значения предельно-допустимых концентраций, но в местах расположения автомобильных дорог и самого транспорта наблюдаются резкие скачки значений по CO, CO₂ и SiO₂. В ходе проведения измерений фиксировалось постоянное колебание скорости ветра. Из анализа видно, что в городской застройке скорость ветра значительно изменяет свои значения, что нельзя сказать про относительную влажность. Данный параметр определяется макромасштабной циркуляцией атмосферного воздуха и слабо зависит от локальных условий городской среды, поэтому сложно выявить закономерности поведения данного параметра в течение одного дня, возможно только в зависимости от времени года. Температура в условиях города имеет минимальное колебание в зависимости от места расположения точки контроля, то есть наблюдается незначительный перепад от одной точки к другой в 2-3°C. Повышение или понижение значения может быть вызвано как появлением дополнительного источника тепла (например, выхлопного газа у автомобильных дорог), так и положением солнца на небосклоне.

Представленный анализ натурных замеров концентраций и метеорологических параметров отображает существующее в момент времени состояние микроклимата среды в точке контроля. Стоит отметить, что значения концентраций по веществам, наблюдаемых в застройке многоэтажного строительства, оказываются ниже, чем в современных микрорайонах. Также в рассматриваемых точках наблюдается равномерное движение потока воздуха, так как не было зафиксировано сильных скачков в значениях по отношению к значениям в других местах. Возможно, это связано с оптимальным расположением зданий по отношению друг к другу и самого микрорайона по отношению к господствующему потоку ветра в городе, т.е. наблюдается хороший аэрационный режим.

В подразделе 2.2 описана методика использования метеорологических параметров для оценки уровня комфортности через систему биоклиматических критериев. В городской среде формируется микроклимат уже с учётом косвенно связанных явлений с погодой, таких как: дополнительные источники антропогенного тепла, выбросы загрязняющих веществ, а также изменение аэрационного режима. Вследствие этого возникает потребность в оценке складываемых условий для определения степени их влияния на организм человека.

Стоит отметить, что оценка влияния одного метеорологического параметра без учета остальных, не является корректной, так как не позволит отобразить в полной мере действительность. Попытки связать наибольшее число факторов окружающей среды поспособствовало разработке различных биоклиматических критериев, которые направлены на исследование влияния теплоощущения с учетом ветра, влажности, температуры. В связи с этим в основу методики расчёта для диагностики городской среды легли уравнения температурных и сезонных индексов (табл. 1).

Таблица 1 – Температурные и сезонные индексы для диагностики внешней городской среды

Температурные индексы:

1. Эффективная температура (ЭТ, °C) [Missenard A., 1937]:

$$ЭТ = t - 0,4 \cdot (t - 10) \cdot \left(1 - \frac{f}{100}\right)$$

2. Эквивалентно-эффективная температура, Б.А. Айзенштата (ЭЭТ, °С) [Айзенштат Б. А., 1974]:	
	$\text{ЭЭТ} = t \cdot [1 - 0,003 \cdot (100 - f)] - 0,38v^{0,59} \cdot [(36,6 - t) + 0,622 \cdot (v - 1)] + [(0,0015v + 0,008) \cdot (36,6 - t) - 0,0167] \cdot (100 - f)$
3. Радиационно-эквивалентно-эффективная температура, Е.Г. Головиной, В.И. Русанова (РЭЭТ, °С) [Головина Е. Г., 1997]:	
	$\text{РЭЭТ} = 0,83 \cdot \text{ЭЭТ} + 12$
4. Нормально-эффективная температура воздуха, И.В. Бутьевой (НЭЭТ, °С) [Бутьева И. В., 1980]:	
	$\text{НЭЭТ} = 0,83 \cdot \text{ЭЭТ} + 7$
5. Биологически активная температура воздуха, Е.В. Циценко (БАТ, °С) [Головина Е. Г., 1997]:	
	$\text{БАТ} = 0,8 \cdot \text{НЭЭТ} + 9$
Сезонные индексы:	
6. Индекс ветрового охлаждения Сайпла-Пассела (<i>WCIs</i> , ккал/м ² · ч) [Siple P. A., 1945]:	
	$\text{WCIs} = (10,45 + 10v^{0,5} - v) \cdot (33 - t)$
7. Индекс ветрового (влажного) охлаждения, М. Хилла (<i>WCIs_h</i> , Вт/м ²) [Головина Е. Г., 1997]:	
	$\text{WCIs}_h = H_c + (0,085 + 0,102v^{0,3}) \cdot (61,1 - e)^{0,75},$
Индекс ветрового охлаждения (<i>H_c</i>):	
	$H_c = (0,13 + v^{0,5}) \cdot (36,6 - t)$
8. Индекс жесткости погоды С. Бодману (<i>S</i>) [Hill L. E., 1958]:	
	$S = (1 - 0,04 \cdot t) \cdot (1 + 0,272 \cdot v)$
Примечание: <i>e</i> (<i>E</i>) –упругость водяного пара, гПа; <i>t</i> –температура, °С; <i>f</i> – относительная влажность, %; <i>v</i> – скорость ветра, м/с.	

Эффективная температура позволяет определить теплоощущение, испытываемое человеком в результате совместного воздействия комплекса метеоданных (*t*, *f*). Эквивалентно-эффективная температура учитывает ещё и ветровой фактор воздействия. Оценить влияние солнечной радиации на общее теплоощущение возможно с помощью радиационно-эквивалентно-эффективной температуры. Данные показатели рассматривают восприятие среды человеком, когда он полностью одет, в то время как нормальная эквивалентно-эффективная температура определяет комфортность теплоощущения одетого по пояс человека. Биологически активная температура учитывает комплексное воздействие и связывает между собой ЭЭТ и НЭЭТ, что позволяет оценить воздействие температуры, влажности, скорости ветра, суммарную и длинноволновую радиацию. Сезонные индексы позволяют оценить суровость и континентальность климата, так как они учитывают воздействие тепловой радиации на открытые участки тела, а также ветровое воздействие, что в совокупности будет являться объективной оценкой теплоощущения в плане оценки дискомфорта холодного периода:

Методика расчёта биоклиматических критериев была реализована в программном продукте Lamroute. Алгоритм применения методики оценки уровня пешеходного комфорта состоит из следующих этапов: *первый этап* заключается в сборе и систематизации данных метеорологических параметров, приоритетных загрязняющих веществ с различных источников их фиксации в разработанную базу

данных; на втором этапе выполняется анализ собранных данных метеорологических параметров и определение начальных и граничных условий, таких как: температура (t), скорость (v), влажность (f), на основании которых будет осуществляться оценка и прогнозирование условий комфорта. Третий этап подразумевает выполнение численных расчётов, которые выполняются в программном продукте Lamprye. Температурные и сезонные индексы были прописаны в script-файле на языке программирования Python. На четвёртом этапе необходимо выполнить интерпретацию полученных численных значений, согласно рассматриваемым критериям и описать складываемые условия внешней среды и как она воспринимается человеком.

Анализ обработки массива метеорологических показателей осуществлялся за трёхлетний период времени (2018-2020). Индекс ЭЭТ показал, что в г. Красноярске зимний период времени характеризуется как «холодный» и «очень холодный» уровень комфорта. Формирование данных условий вызвано приходом Сибирского антициклона, в области которого наблюдаются нисходящие потоки воздуха, которые формируют высокое давление и понижают температуру вблизи поверхности Земли. Значительное снижение температур в окружающей среде приводит к появлению туманов испарения над незамерзающей р. Енисей, что способствует увеличению влажности воздуха. Рассматривая же весенний, летний и осенний период времени индекс ЭЭТ колеблется в пределах нормы, условия среды являются «комфортными».

РЭЭТ в течение рассматриваемого периода варьирует от уровня «комфорта» до «субкомфорта». Согласно расчётам индекса суровости погоды по Бодману, в Красноярске наблюдается преимущественно малосуровая зима. Умеренно суровые погодные условия встречаются реже. В то время в пригородной части фиксируются преимущественно умеренно суровые дискомфортные условия, а в дни максимальных минимумов формируются крайне дискомфортные, опасные условия. Индекс Сайпла-Пассела в городе варьируется в пределах 1000-1200 (очень холодные условия); в пригородной части данный индекс может достигать значения от 1300-1550, что характерно для жестко-холодных условий.

Подраздел 2.3 посвящен экспериментальным исследованиям взаимодействия ветрового потока с модельными объектами городской застройки. Данного рода исследования необходимы для получения интегральных характеристик, которые в дальнейшем возможно использовать для верификации численной модели. Для исследования аэродинамики обтекания моделей домов было проведено физическое моделирование, основанное на оптических методах диагностики течений в том числе реализован PIV-метод (Particle Image Velocimetry)

Цель научного исследования заключалась в определении характерных ветровых зон, формируемых в результате обтекания потоком воздуха модельных объектов, имитирующих внешне здания разной высоты с плоской кровлей: • куб $H \times L \times B$; • параллелепипед $2H \times L \times B$, где $H=L=B$ – высота, ширина, длина, соответственно, и равны 50 м. Рассмотрены варианты их одиночного и tandemного размещения. Объекты располагались друг от друга на расстоянии $l=H$. Скорость набегающего потока составляла 5 м/с (соответствующее число Рейнольдса $Re=1,55 \cdot 10^4$ при характерном размере, равном высоте меньшей модели H)

Результаты эксперимента приведены в виде визуализации турбулентных течений с помощью талька (рис. 1).

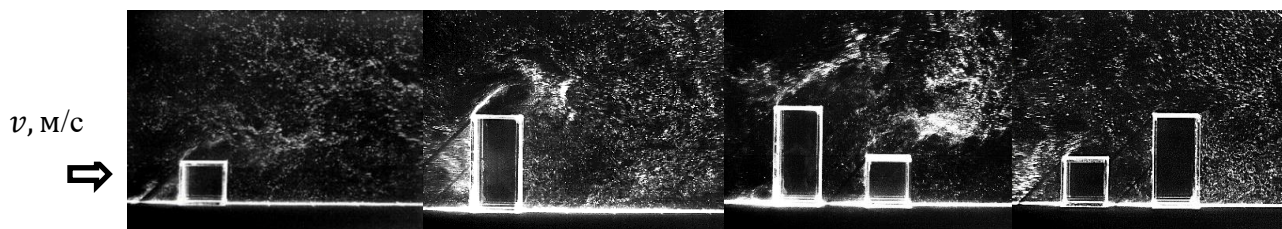


Рисунок 1 – Визуализация поведения ветрового потока при обтекании модельных объектов: продольное сечение

Используемый подход для визуализации течения, позволяет отследить динамику изменения турбулентного потока, а также качественно увидеть формирование областей с разными скоростными режимами. В ходе проведения наблюдений было установлено, что поведение ветрового потока характеризуется сложной вихревой структурой и носит постоянный колебательный характер. С течением времени было зафиксировано, что, при визуальном осмотре обтекания, наблюдается практически симметричное поведение потока, основные асимметрии возникают в результате специфики работы лопастного ротора и внешних факторов.

Количественная диагностика структуры течения осуществлялась с использованием PIV системы. На рис. 2 представлены осредненные по 500 парам кадров поля скорости и кинетическая энергия турбулентных пульсаций.

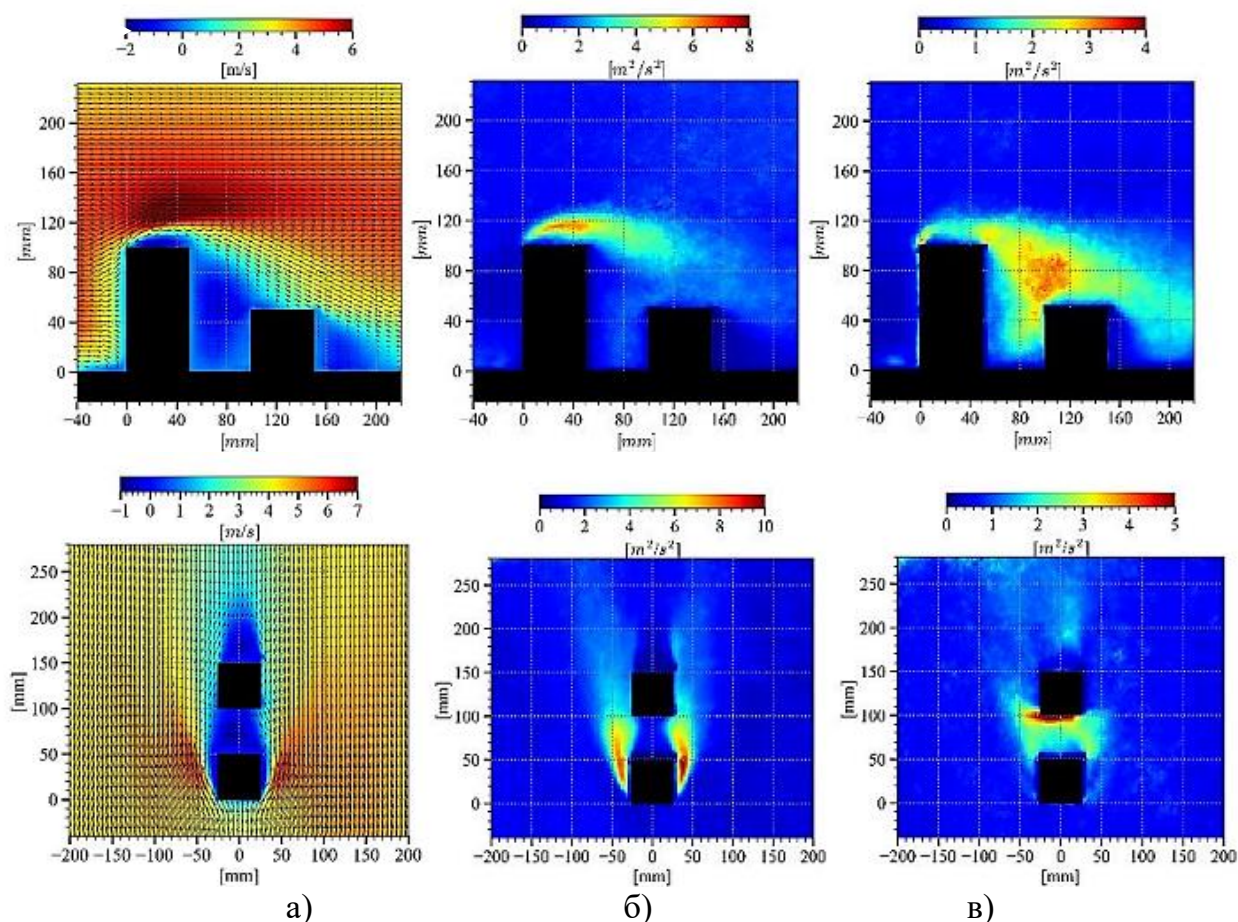


Рисунок 2 – Поле скорости (а) и кинетическая энергия турбулентных пульсаций: поперечная компонента (б) и продольная компонента (в)

Анализ результатов, полученных с помощью рассматриваемых методов исследования, демонстрирует идентичные картины поведения турбулентного

потока. Полученные качественные и количественные данные по продольной компоненте позволили наглядно увидеть образование угловых эффектов. В совокупности, реализуемые подходы демонстрировали схожий характер течения в качественном сопоставлении.

Далее рассматриваемые подходы были применены для изучения аэродинамики обтекания модели микрорайона г. Красноярска. Был изготовлена 3D модель застройки из оргстекла в масштабе М1:650. На рис. 3 приведены результаты, которые представлены в виде полей скорости и значений кинетической энергии турбулентности в разных сечениях.

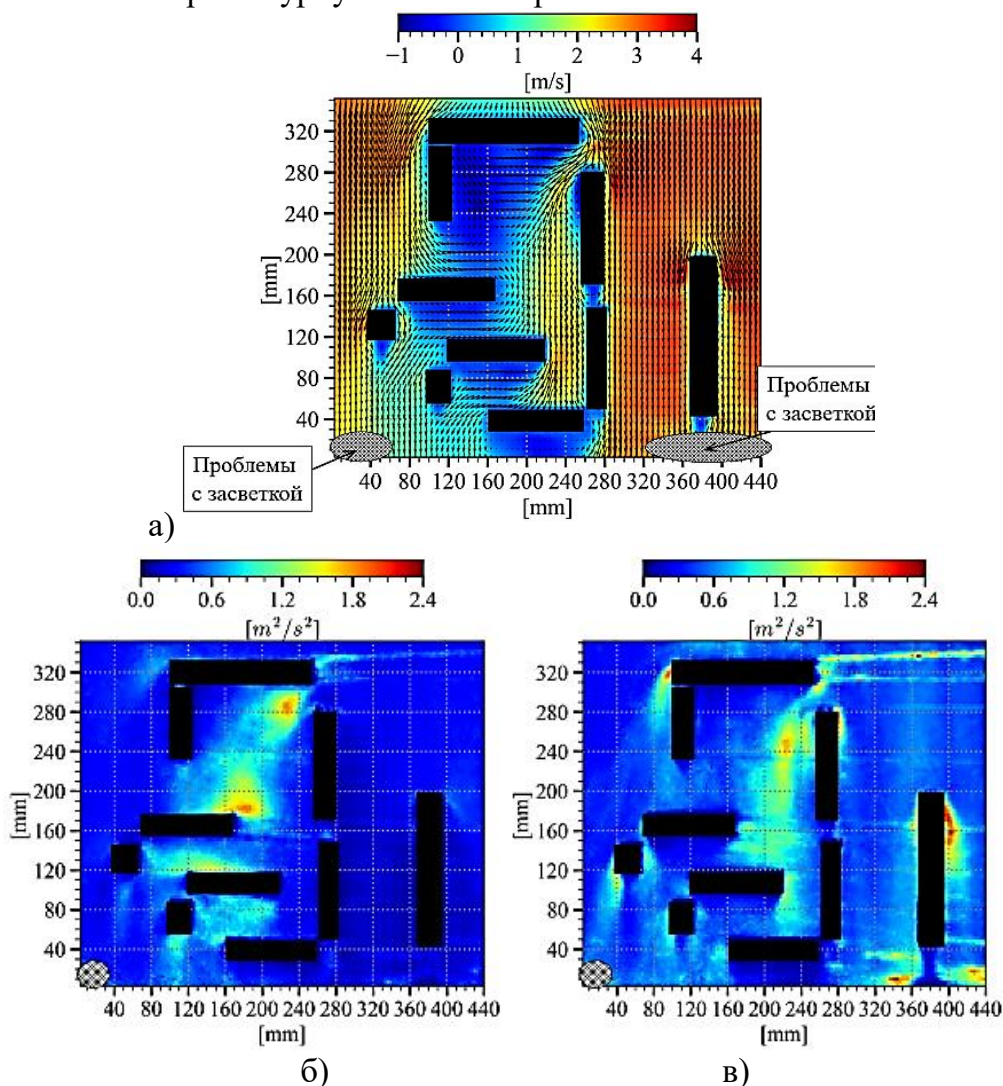


Рисунок 3 – Поле скорости (а) и кинетическая энергия турбулентных пульсаций: поперечная компонента (б) и продольная компонента (в)

Анализируя поля скоростей рассматриваемой модели микрорайона, было выявлено, что, при обтекании, за зданиями формируются устойчивые зоны с низкими скоростями ветра. В силу того, что морфотип застройки имеет Г- и П-образный контур, в центральной части наблюдаются скорости ветра, не превышающие 0,5 м/с. Данные условия, являются благоприятными для расположения мест отдыха и детских площадок, но требуют исключения возможности нахождения источников выбросов (например, автомобильный транспорт), так как движения воздуха в данной области минимально, что приведёт к накоплению загрязняющих веществ. Интенсивное движение воздуха наблюдается в

основном в прилегающей области к застройке и в локальных местах срыва вихрей – при обтекании боков зданий. Но фиксируемый скоростной режим находится в пределах нормы. Особое внимание стоит уделить пульсациям, так как они имеют локальный характер и, в местах их проявления человек будет испытывать максимальные неудобства в силу увеличения механического воздействия за счёт хаотичности поведения ветрового потока в результате образования различных вихревых структур.

В разделе 3 представлено описание используемой математической модели.

Для описания ветрового потока разработана микромасштабная метеорологическая модель, которая используется для изучения процессов, протекающих в атмосфере города. Математическая модель основывается на нестационарных осреднённых по Рейнольдсу уравнениях Навье—Стокса для несжимаемых течений с переменной плотностью и включает себя:

- уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0,$$

- уравнение движения

$$\frac{d\mathbf{U}}{dt} = -\nabla p + g \cdot \rho_{ref} \cdot \frac{(\theta_{ref} - \theta)}{\theta_{ref}} + \nabla[\mu(\nabla \mathbf{U} + \nabla \mathbf{U}^T)] + \nabla \cdot \mathbf{T}_t,$$

- уравнение сохранения энергии

$$\rho C_p \frac{d\theta}{dt} = \nabla \cdot \left[\left(\lambda + \frac{\mu_t C_p}{Pr_t} \right) \nabla \theta \right] + S_\theta,$$

где $\mathbf{U}$ – вектор скорости; ρ – плотность, θ – потенциальная температура; θ_{ref} и ρ_{ref} – потенциальная температура и плотность на высоте h в соответствии с начальным и граничным распределением; p – осреднённое давление, μ – динамическая вязкость, $\mathbf{T}_t$ – тензор рейнольдсовых напряжений; S_θ – дополнительный тепловой источник.

Для корректного расчёта температуры на поверхности реализована модель сопряжённого теплообмена, включающая одномерное уравнение теплопроводности для почвы и стен зданий. В качестве логарифмической пристеночной функции используется функция, согласованная с динамическим пограничным слоем.

Реализована модель переноса излучения. Поле излучения можно разделить на две составляющие: коротковолновое солнечное излучение и длинноволновое излучение атмосферы и земли.

В качестве граничных условий на входе задаются распределение скорости, потенциальная температура и турбулентные характеристики для нейтральной атмосферы ($\theta(h) = const$) [Louis J. F., 1979]:

$$u(z) = \frac{u_*}{K} \left(\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right), \quad u(z) = \frac{u_*^3}{K \cdot z}, \quad k(z) = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}}, \quad \varepsilon = \sqrt{C_\mu} k \frac{du}{dz}$$

где $K = 0,4$ – константа Кармана, u_* – динамическая скорость атмосферного пограничного слоя, константа $C_\mu = 0,09$.

Для моделирования переноса твердых частиц в виду их малого размера используется диффузионно-инерционная модель движения малоинерционных частиц, которая является упрощением двухжидкостной модели дисперсных потоков [Zaichik L. I., 2010]. Для замыкания турбулентных характеристик используется

двухслойная $k-\omega$ SST модель Ментора [Menter F. R., 1993]. Тензор турбулентных напряжений моделируется с использованием гипотезы Буссинеска. Для численного согласования полей скорости и давления применялась процедура SIMPLE-C. Дискретизация уравнения сохранения на расчетной области выполнена методом контрольного объема. Рассматриваемая микромасштабная численная модель была реализована в программном модуле «SigmaEco». Также в разработанный программный модуль были интегрированы уравнения температурных и сезонных биоклиматических индексов (табл. 1), с помощью которых осуществлялась оценка формирования условий комфорта в городских микрорайонах.

Также в третьем разделе представлены результаты верификации, рассматриваемой микромасштабной математической модели «SigmaEco» в сравнении с экспериментальными данными отечественных и зарубежных исследователей, а также данных собственного эксперимента.

Рассматривалось исследование аэродинамики обтекания одиночных моделей объекта в изотермической постановке задачи. Сравнение математической модели проводилось с результатами аэрофизического моделирования нестационарного трехмерного обтекания равномерным воздушным потоком прямоугольной призмы, установленной на горизонтальном поворотном столе в рабочей части аэродинамической трубы А-6 НИИ механики МГУ. Геометрические размеры объекта $1 \times 0.866 \times 2.75$. Число Рейнольдса, при ширине 1 м соответствует $Re = 4,3 \cdot 10^5$. На входе задавался ударный профиль скорости, интенсивность турбулентных пульсаций – 1%. Исследуемый объект располагался на расстоянии 8 м от входа, размер расчетной области составлял $60 \times 20 \times 15$ м. Для расчетов была построена многоблочная структурированная сетка. Безразмерное расстояние до первого узла сетки для нижней стенки $1 < y < 10$, для поверхности параллелепипеда $1 < y < 30$. Данная сетка позволяет разрешить турбулентные характеристики вблизи стенки только с использованием пристеночных функций.

Количественное сравнение с экспериментальными данными по распределению коэффициента давления вокруг параллелепипеда, представленное на рис. 4 демонстрирует, что в ходе верификации математической модели обтекании прямоугольной призмы результаты коррелируются с экспериментальными данными.

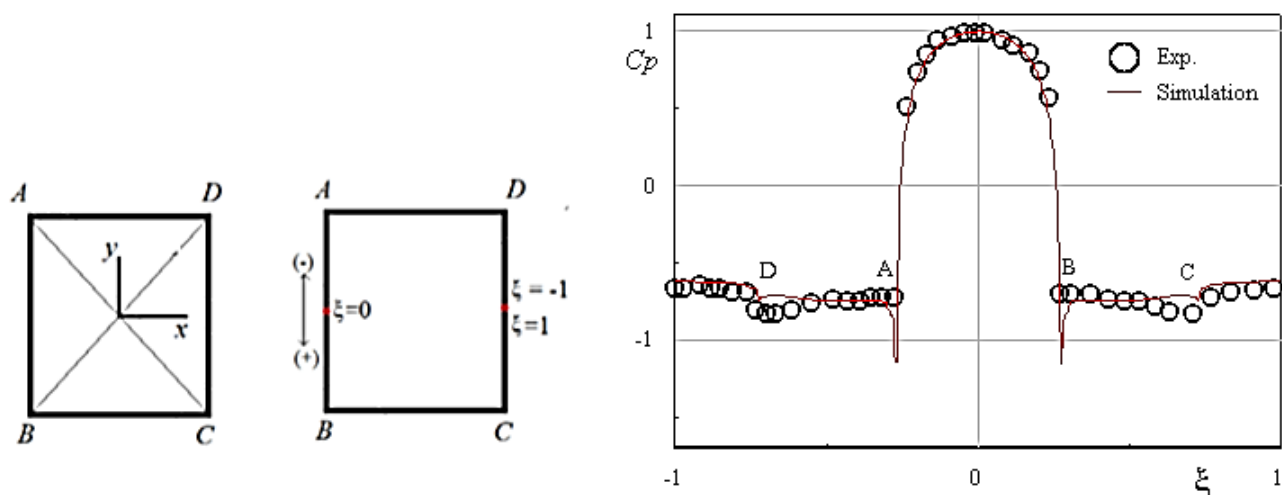


Рисунок 4 – Распределение коэффициента давления вокруг параллелепипеда

Также рассматривалась экспериментальная работа обтекания одиночного объекта длинной формы, имитирующего здание [Miyazaki T., 2003]. Характерные размеры объекта (здания) составляют $b \times 4b \times 4b$ при $b=50$ мм. На выходе соблюдались условия постоянства статического давления. Число Рейнольдса при $z=H=4b$ составляло около $7,2 \times 10^4$. Рассматривалось два варианта расчёта, отличающиеся разным количеством расчётных ячеек, а именно: $\sim 1,0$ млн. и $\sim 2,5$ млн. (рис. 5а).

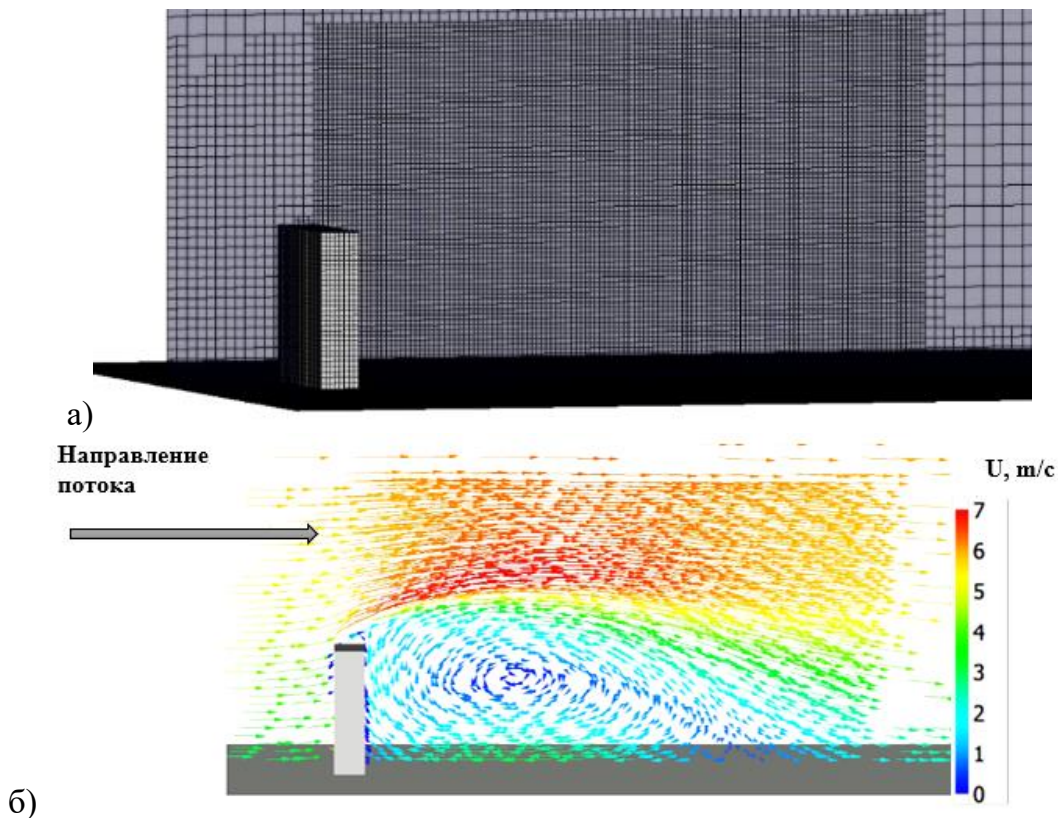


Рисунок 5 – Расчетная сетка (а) и поле скорости в продольном сечении (б)

В результате набегания потока к передней стенке здания происходит его торможение, которое приводит к появлению избыточного давления и, в итоге, к формированию зоны подпора (рис. 5б). На кромке верхней стенки происходит поджатие потока, что приводит к значительному увеличению средней скорости до 8 м/с, формируется зона локального ускорения. При обтекании боковых граней поток также укоряется, но, кроме этого, он прижимается к нижней поверхности. За зданием образуется аэродинамическая тень, протяженность которой практически в два раза больше его высоты ($L \sim 8b$). Основная особенность данной зоны заключается в понижении скорости потока до минимальных значений, что приводит к снижению энергии турбулентных пульсаций потока, особенно в центре циркуляционной зоны. Качественное сопоставление результатов численного исследования с экспериментальным демонстрирует хорошую сходимость.

Для верификации процессов теплообмена и оценки предсказательной адекватности распространения выбросов загрязняющих веществ, было численно воспроизведён эксперимент, проводимый исследователями Токийского политехнического университета в стратифицированной аэродинамической трубе. В качестве модельного объекта рассматривался параллелепипед с характерными размерами $h \times 0,5h \times 0,5h$ мм ($h=160$ мм). Были приняты условия неустойчивого

неизотермического состояния ($Rb=-0,10$). Точечный источник выброса находился за объектом исследования с подветренной стороны на расстоянии $0,25h$, в качестве индикаторного газа использовался 5% этилен (C_2H_4). Скорость ветрового потока на высоте объекта (160 мм) составляла 1,42 м/с. Температура выпускаемого газа была принята $\langle\theta_{gas}\rangle = 303,55$ К, температура здания равна $\langle\theta_{build}\rangle = 297,65$ К, температура окружающей среды – $\langle\theta_f\rangle = 318,95$ К.

Анализ результатов численного исследования показал, что за зданием расчетный профиль скорости и температуры имеет незначительные отклонения от эксперимента в области отрывного течения. Из полученных результатов видно, что поведение загрязняющего вещества в потоке определяется турбулентным течением. В подветренной зоне за объектом образуется область с заниженными скоростями, с циркулирующим движением, вследствие этого происходит унос вещества в данную область. Получаемое отклонение по компоненте скорости вызвано спецификой отработки модели турбулентности (рис. 6).

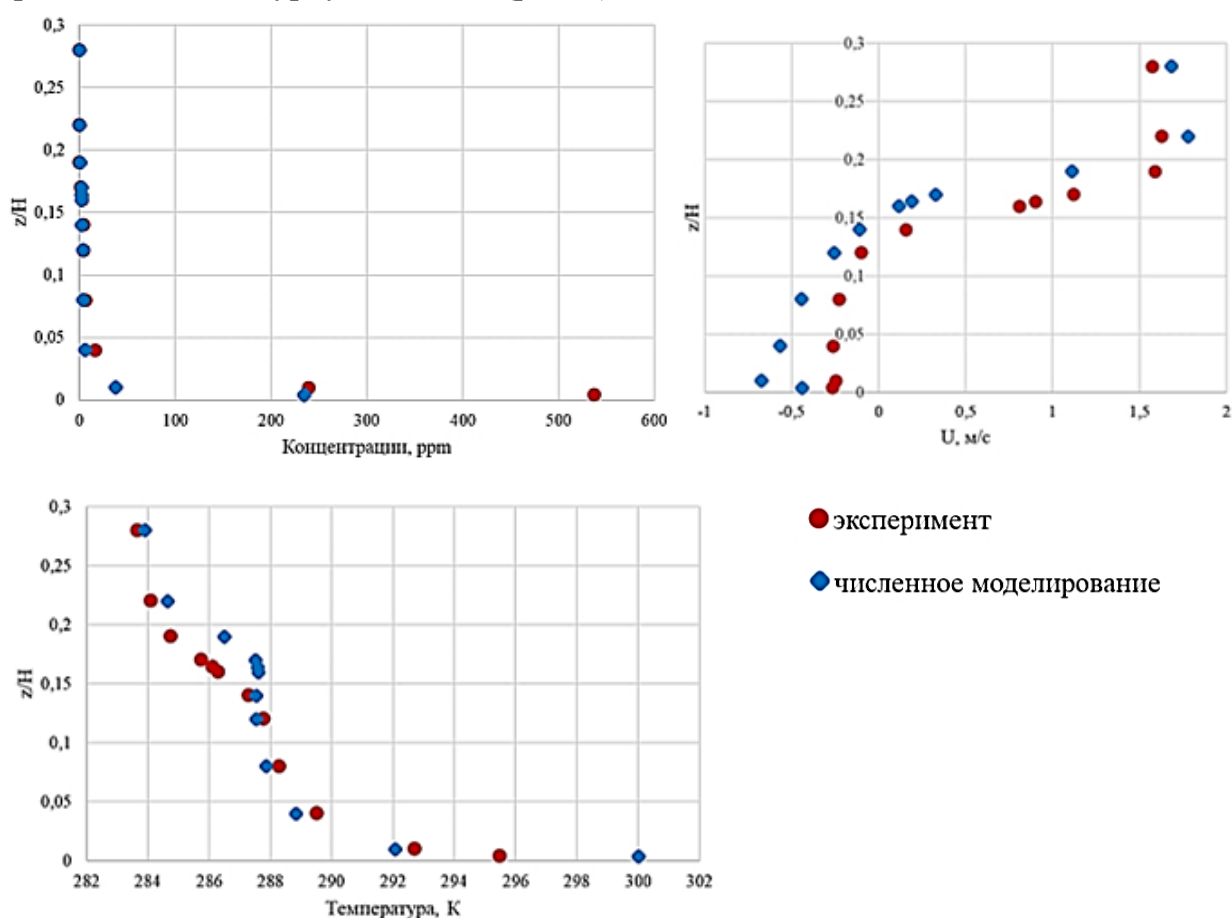


Рисунок 6 – Количественное сопоставление результатов эксперимента с результатами, численного моделирования в рассматриваемом сечении

Также в данном разделе рассмотрено исследование обтекания тандема зданий (куб/параллелепипед). Используемые данные для верификации были получены в ходе проведения собственного эксперимента. Было выполнено качественное и количественное сопоставление картин течения, которое показало, что имеют схожий характер и отображают формирование всех своеобразных зон в результате взаимодействия потока с исследуемыми объектами (рис. 7).

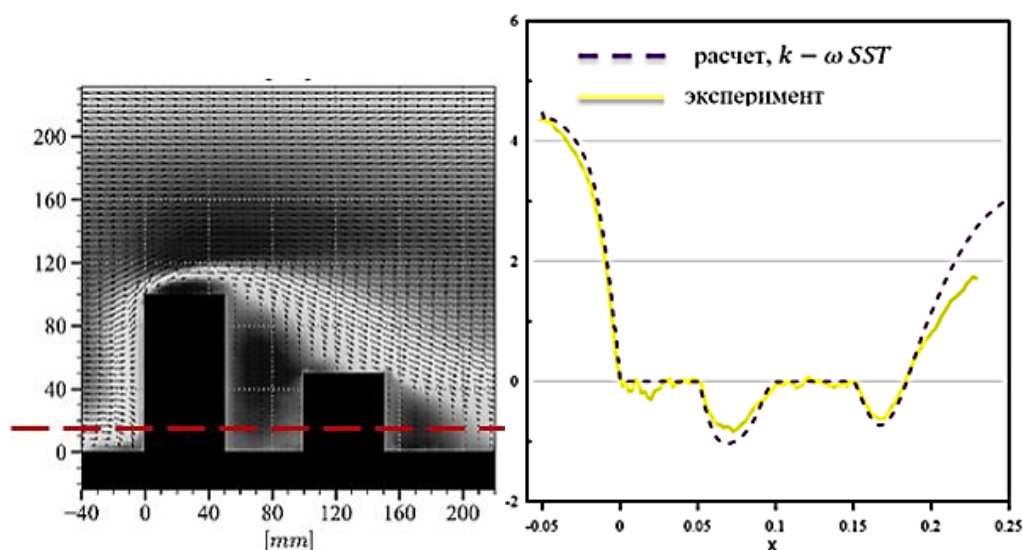


Рисунок 7 – Сравнение результатов численного моделирования с результатами эксперимента на высоте $\frac{1}{2}H$ мм

Была рассмотрена модельная задача по изучению механизмов обтекания ветровым потоком группы объектов, имитирующих застройку. Экспериментальные исследования проводились в Архитектурном институте Японии [AIJ, 2015]. Предполагалось, что малоэтажный городской район имеет площадь 40 м и высоту 10 м для имитации состояния, при котором малоэтажный дом полностью зажат. Высотное здание имеет площадь 25 м и высоту 100 м. Между зданиями условно расположены дороги шириной 10, 20 и 30 м (рис. 8а). Для проведения численного моделирования были построены несколько неструктурированных гексогональных сеток с различной детализацией (рис. 8б).

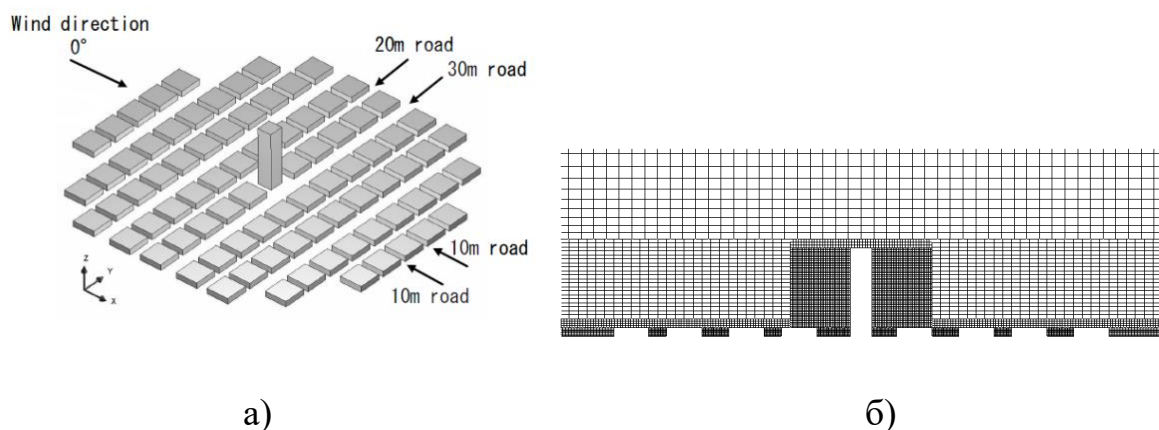


Рисунок 8 – План эксперимента (а); расчетная сетка (б)

Математическое моделирование позволяет явно увидеть структуру вихревого потока, которая формируется при обтекании зданий (рис. 9). Анализируя картину течения видно, что за высотным зданием образуется вихревая зона. Максимальная скорость течения возникает в области срыва вихрей с острых боковых гранений здания и составляет около 5 м/с. Плотное расположение малоэтажных объектов приводит к образованию зон рециркуляции с низкими скоростями ветра, где

происходит задержание ветрового потока с дальнейшим затруднением выноса его за территорию застройки.

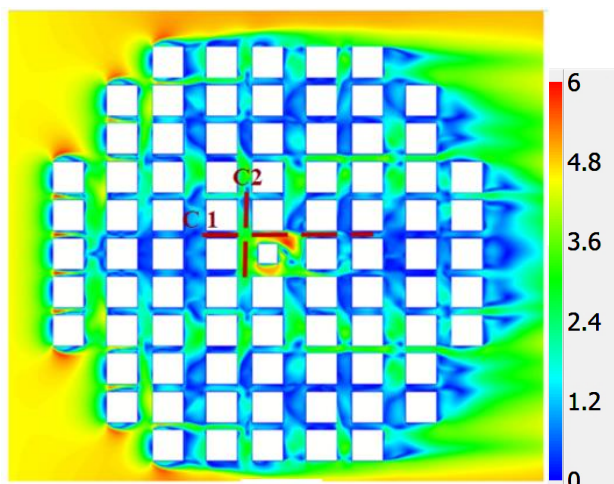


Рисунок 9 – Поле скорости на высоте 2 м, м/с

На рис. 10 представлено сравнение расчёта с данными эксперимента по скорости потока вдоль линии, расположенной на высоте 2 м.

В результате проведенных исследований сходимости в случае изменения детализации начальной расчётной сетки были найдены оптимальные варианты расчёта с минимальными отклонениями от экспериментальных данных.

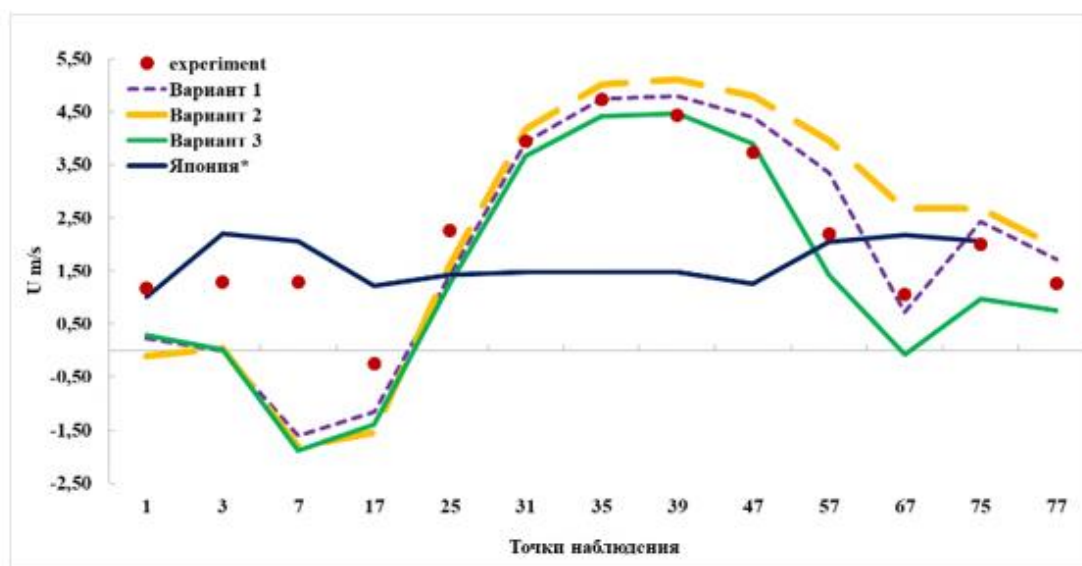


Рисунок 10 –Результаты сопоставления численного моделирования с экспериментальными данными в сечении C1

В результате проведенных исследований сходимости в случае изменения детализации начальной расчётной сетки были найдены оптимальные варианты расчёта с минимальными отклонениями от экспериментальных данных.

В четвертой главе представлены результаты апробации микромасштабной математической модели на реальных микрорайонах Красноярского края. В качестве модельной задачи рассматривается микрорайон смешенного морфотипа, состоящий из комбинации зданий различного морфотипа: точка, линия, Г- и П-образная (рис.

11). В качестве источника антропогенного воздействия рассматривается автомобильная дорога. Моделируется динамика распространения диоксида углерода (CO_2) и твёрдой дисперсной фазы – взвешенные вещества (2.5 мкм). Также учитываются источники антропогенного тепла от автомобильной дороги и зданий. Оценка комфортности среды выполняется для разных метеорологических условий.

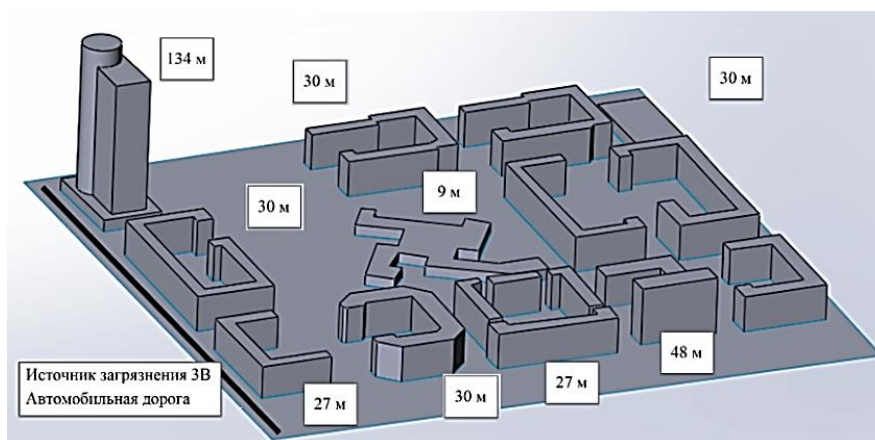


Рисунок 11 – Геометрия исследуемого района с характерными размерами высот зданий

В зависимости от рассматриваемых условий, варьировались теплофизические характеристики как материалов (стен и крыш зданий), так и подстилающей поверхности (Земли). В осенний период значения альбеда поверхности Земли и стен зданий равны, в то время как в зимний период – $\alpha_{\text{поверхности}} > \alpha_{\text{стен}}$, а в летний – $\alpha_{\text{поверхности}} < \alpha_{\text{стены здания}}$. Также в зависимости от времени года изменялось распределение по высоте потенциальной температуры.

Полученные результаты позволили определить, что образование зон застоя с рециркуляционным характером движения потока во дворах п-образной формы и между зданиями близко расположенных по отношению к друг другу в зависимости от учета или отсутствия теплообмена приводит к трансформации площади их формирования, изменяя при этом протяженность и интенсивность. Наблюдается изменение в поведении устойчивых вихревых структур (рис. 12).

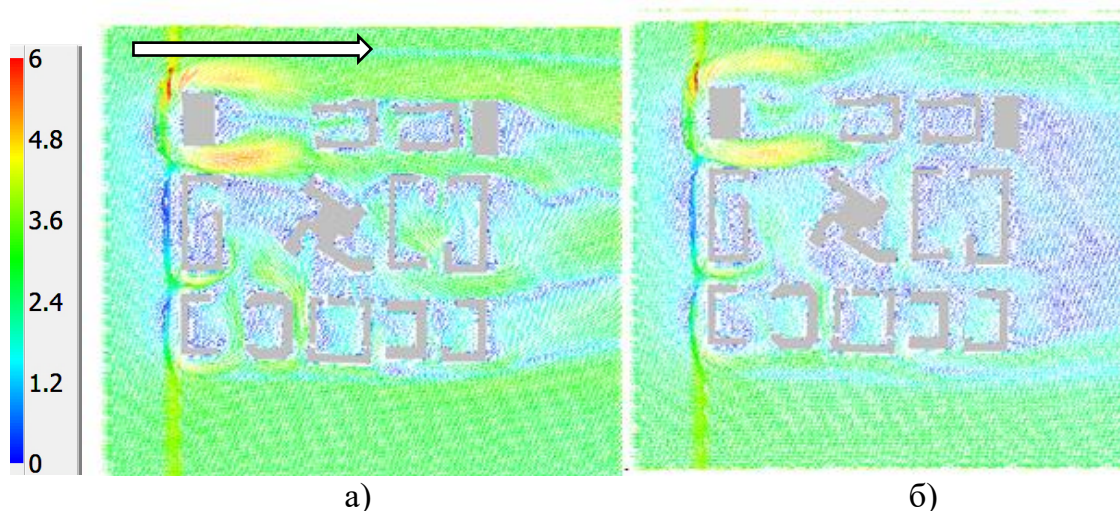


Рисунок 12 – Векторное поле скорости в поперечном сечении на высоте 2 м (м/с): с учётом теплообмена (а), без учёта теплообмена (б)

В задачах с теплообменом за застройкой образуется один устойчивый вихрь, в то время как без учета в тех же зонах наблюдается распад одного более крупного вихря на несколько меньших по размерам. В целом же рассматривая скоростной режим в зоне пребывания человека, нагрев поверхности за счет солнечной энергии и дополнительных источников антропогенного тепла приводят к формированию устойчивых конвективных движений способствующих росту средней скорости, сокращая при этом области формирования низкоскоростных областей (< 0.5 м/с) (рис. 10).

Результаты численного исследования показали, что максимальное значение суммарного потока тепла достигается в летний период, минимальное же значение наблюдается зимой. На общий теплообмен в микрорайоне помимо величины солнечного излучения, которое зависит от времени года, также влияет и расположение Солнца на небосклоне.

В зимний период времени появляются дополнительные антропогенные источники тепла в атмосферу от стен зданий. Результаты численного исследования позволили выявить, что в рассматриваемый период на незатенённых поверхностях стен зданий наблюдается максимальная температура, так как они находятся практически под прямым солнечным излучением. В летний и осенний период, наблюдается обратная ситуация. Основные поверхности, которые воспринимают солнечное излучения – земля и крыши зданий. Поступление антропогенного тепла от стен в атмосферу становится меньше из-за незначительной разности температур с окружающей средой.

Интенсивность суммарной солнечной радиации на стенах зданий различной ориентации имеет ярко выраженный суточный ход. В зимний период времени максимальная температура наблюдается на незатененных поверхностях стен зданий. Обратная ситуация наблюдается в летний и осенний период, то есть в качестве основных поверхностей, которые воспринимают солнечное излучение являются земля и крыши зданий, а вклад стен в нагрев атмосферы существенно меньше.

На основании выполненных расчетов, было также выявлено, что эффект «городского острова тепла» способствует более интенсивному вертикальному движению загрязняющих веществ вверх по потоку, поднимая частицы на большую высоту, в то время как, без учета процессов теплообмена наблюдается более интенсивное движение взвешенных веществ вблизи поверхности земли, приводя к аккумуляции загрязнений в низкоскоростных зонах с практически полным отсутствием процесса рассеивания.

Диагностика внешней среды рассматриваемого микрорайона по температурным и сезонным биоклиматическим индексам позволила определить теплоощущение и нагрузку, испытываемые человеком. Анализировался уровень комфорта, формируемый в летний и зимний период времени, оценки выполнялись согласно шкалам комфортности для каждого рассматриваемого параметра.

Показательным индексом является эквивалентно-эффективная температура (ЭЭТ, °C), так как учитывает силу ветра, температуру и влажность (рис. 13).

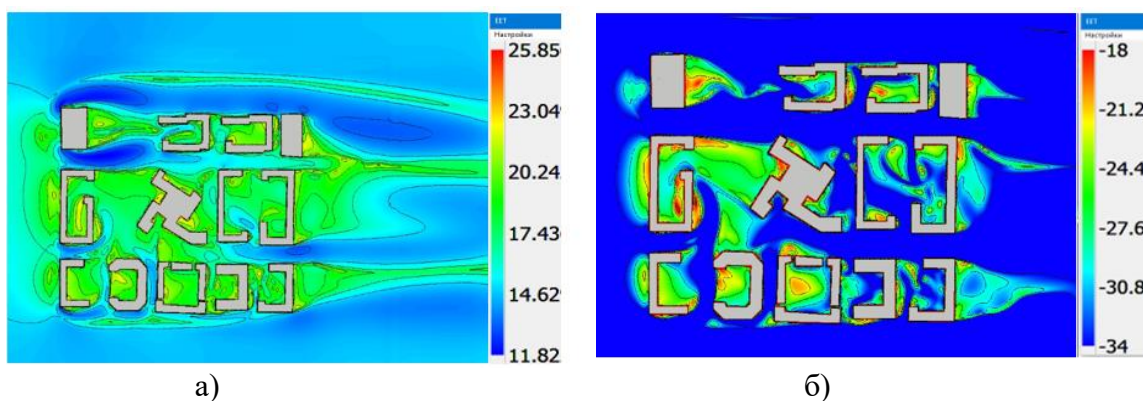


Рисунок 13 – Распределение поля эквивалентно-эффективной температуры, Б.А. Айзенштата (ЭЭТ, °C): лето (а); зима (б)

В летний период в зонах, где наблюдается локальные зоны ускорения ветрового потока, особенно при обтекании высотного здания, внешняя среда воспринимается человеком как «прохладно», формируются условия «условного комфорта». На дворовых территориях показатель ЭЭТ варьируется в пределах +18... +20, °C, что приводит к смене восприятия и ощущается как «умеренное тепло». В зимний период времени на прилегающей территории складываются условия с крайне опасной холодовой нагрузкой, ощущается как «крайне холодно», формируются «дискомфортные» условия. По всей территории застройки условия «дискомфорта» сохраняются, но смягчаются условия восприятия холода, следовательно, нагрузка на организм становится меньше. Условия комфорта возрастают с увеличением температуры, которая наблюдается вблизи зданий в результате теплообмена с окружающей средой, вследствие теплопотерь.

Биологически активная температура включает максимальное количество показателей окружающей среды и позволяет дать основную характеристику внешних условий в летний период времени. Во дворах, особенно тех, которые имеют морфотоп Г и П-образный, а также в зонах, где аэрационный режим замедлен, в летний период времени образуется сильная тепловая нагрузка на человека, воспринимается как «жара», что приводит к формированию «условного дискомфорта» (рис. 14).

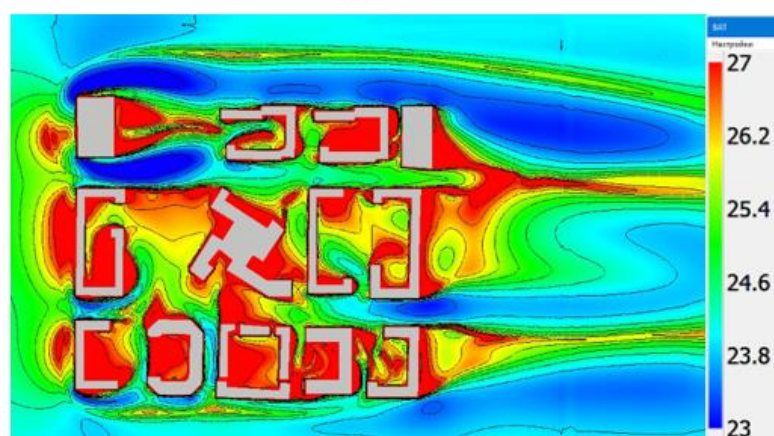


Рисунок 14 – Распределение поля биологической активной температуры воздуха, Е. В. Циценко

Для оценки суровости погоды рассматриваются сезонные индексы. Согласно уравнению Сайпла-Пассела аэрационный режим застройки в зимний период рассматривается как «очень холодно» ($WCIs \geq 1000$). Рассматривая ветровое охлаждение с учётом влажности среды, преимущественно формируются условия «относительного комфорта». В зонах локального ускорения уровень комфорта сменяется на «относительно дискомфортный». Согласно балльной системе Бодмана, наблюдается мало-и умеренно-суровая зима (рис. 15).

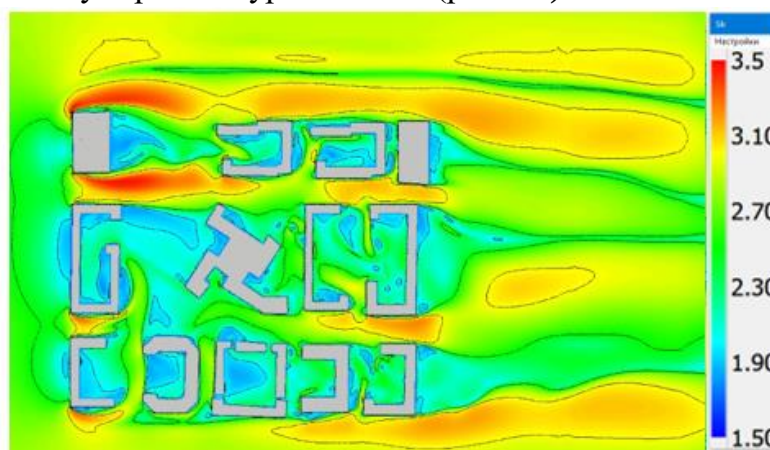


Рисунок 15 – Оценка «суровости» зимних условий, балл

Полученная оценка биоклиматического комфорта с помощью микромасштабной численной модели прогнозирования уровня комфорта коррелирует с результатами оценки городской среды, выполненной на основании данных с региональных постов мониторинга и результатов натурных наблюдений. Общие тенденции уровня внешней среды сохраняются, только при детальном рассмотрении микрорайона можно подойти к грамотному планированию как самого морфотипа застройки, так и места отдыха в дворовых пространствах.

В заключении представлены основные выводы по диссертационному исследованию в которых отмечено, что предложенные подходы и методы позволят качественно подойти к вопросу решения проблем, связанных с анализом уровня комфорта в городских микрорайонах. С помощью экспериментально-численного исследования становится возможным проводить анализы различных конфигураций зданий и их расположения по отношению друг к другу, а также оперативно изменять морфотип исследуемой застройки. Численное исследование позволяет оценить складываемые условия не только с учётом топологии, морфотипа застройки и внешних природных факторов, а также выполнить оценку теплового баланса через учёт теплофизических свойств материалов и солнечной радиации. Реализация биоклиматических критерий позволяет определять условия внешней среды, для выявления различных зон комфорта и дискомфорта.

Рассматриваемый комплексный подход необходимо применять в градостроительстве на этапе разработки проектной документации для обоснования тех или иных технологических решений.

Список публикаций автора по теме диссертации

1. **Мешкова В.Д.**, Дектерев А.А., Филимонов С.А., Литвинцев К.Ю. SigmaFlow как инструмент исследования ветрового комфорта в условиях городской среды // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2022. – 15(4) – С. 490–504. DOI: 10.17516/1999-494X-0398 (входит в перечень ВАК).
2. **Мешкова В.Д.**, Дектерев А.А., Литвинцев К.Ю., Филимонов С.А., Гаврилов А.А. Роль городской застройки в формировании «острова тепла» // Вычислительные технологии. – 2021. – 5. – 26. – С 4-14 (входит в перечень ВАК и базу цитирования Scopus).
3. **Meshkova V. D.**, Filimonov S. A. and Shebelev A. V. (2018) Computational modeling of architectural and construction aerodynamics problems // Journal of Physics: Conference Series. – p 7, DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012079 (база цитирования Scopus и Web of Science).
4. **Meshkova V.**, Dekterev A., Filimonov S. (2020). Investigation of the airflow conditions at the city residential areas // Journal of Physics: Conference Series. – p 7, DOI: 1565. 012090. 10.1088/1742-6596/1565/1/012090 (база цитирования Scopus).
5. **Meshkova V.**, Dekterev A., Gavrilov A., Filimonov S. (2020). Calculation of wind flows in residential areas and assessment of their impact on pedestrian comfort // Journal of Physics: Conference Series. – p. 7, DOI: 012020. 10.1088/1742-6596/1677/1/012020 (база цитирования Scopus).
6. **Meshkova V.**, Dekterev A., Gavrilov A., Litvintsev K. (2020). SigmaFlow CFD code as a tool for predicting the wind environment around a group of buildings // Journal of Physics: Conference Series. – p 8, DOI: 012119. 10.1088/1742-6596/1675/1/012119 (база цитирования Scopus).
7. **Meshkova V.**, Dekterev A., Gavrilov A., Filimonov S. (2020). Modeling the influence of the river on the wind pattern of Krasnoyarsk // Journal of Physics: Conference Series. – p 7, DOI: 10.1088/1742-6596/1565/1/012023 (база цитирования Scopus).
8. **Meshkova V.**, Dekterev A., Litvintsev K. (2021). Representativeness of monitoring station readings in the context of urban environment. // Journal of Physics: Conference Series. – p. 8, DOI: 012132. 10.1088/1742-6596/2057/1/012132 (база цитирования Scopus).
9. **Meshkova V.**, Dekterev A. A. (2021) Computational fluid dynamics as a method for studying wind comfort // Journal of Physics: Conference Series. – p. 6, DOI: 10.1088/1742-6596/2119/1/012155 (база цитирования Scopus).
10. **Meshkova V.**, Dekterev A., Dekterev D., Lobasov A. (2022). Experimental studies of the formation of zones resulted from air flow around a system of model buildings // Journal of Physics: Conference Series. – p. 7, DOI: 2150. 012030. 10.1088/1742-6596/2150/1/012030 (база цитирования Scopus).