

На правах рукописи

**Денисихина Дарья Михайловна**

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ВОЗДУХООБМЕНА И ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
В ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЯХ**

Специальность 2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование  
воздуха, газоснабжение и освещение

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Санкт-Петербург  
2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете»

Научный консультант: **Дацюк Тамара Александровна**,  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Аверкова Ольга Александровна**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Белгородский государственный  
технологический университет им.  
В.Г. Шухова», кафедра «Теплогасоснабжение  
и вентиляция», профессор

**Зиганшин Арслан Маликович**  
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО  
«Казанский государственный  
архитектурно-строительный университет»,  
кафедра «Информационные системы  
и технологии в строительстве», заведующий

**Сулин Александр Борисович**  
доктор технических наук, ФГАОУ ВО  
«Национальный исследовательский  
университет ИТМО», образовательный центр  
«Энергоэффективные инженерные системы»,  
ординарный профессор

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный  
архитектурно-строительный университет»

Защита диссертации состоится «17» июня 2025 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.03 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 220), тел. 8(812) 316-58-73, e-mail: rector@spbgasu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/denisihina-darya-mihaylovna>.

Автореферат разослан «20» марта 2025 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук,  
доцент



Виктор Алексеевич Пухал

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы диссертации.**

В настоящее время при строительстве общественных зданий особое внимание уделяется экологическим аспектам, обеспечению нормативных параметров микроклимата за счет рационального выбора системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (ОВиК). К важным факторам при этом относится корректная оценка воздухообмена и выбор схемы воздухораспределения.

**Теоретической базой исследования** послужили работы отечественных и зарубежных ученых: Г.Н. Абрамовича, В.В. Батурина, В.А. Бахарева, А.В. Гарбарука, А.М. Гримитлина, М.И. Гримитлина, Т.А. Дацюк, К.И. Логачева, А.М. Зиганшина, Л.Б. Успенской, Г.М. Позина, А.А. Рымкевича, Н.Н. Садовской, Е.М. Смирнова, М.Х. Стрельца, Ю.А. Табунщикова, М.Д. Тарнопольского, В.Р. Таурита, В.Н. Трояновского, В.М. Уляшевой, В.И. Ханжонкова, И.А. Шепелева, Р.Н. Шумилова, F. R. Menter, P. Nielsen, P.R. Spalart, D. C. Wilcox и других.

Традиционные методы расчета воздухообмена и воздухораспределения, основанные на использовании эмпирических и аналитических зависимостей, не позволяют для сложных объектов различного назначения получить всесторонне обоснованную информацию для анализа и выбора наиболее рационального варианта решений по системам ОВиК. При их использовании невозможен анализ пространственного распределения параметров микроклимата и уровня загрязнения  $\text{CO}_2$ , и, как результат, в проектные решения закладываются необоснованно завышенные/заниженные мощности систем ОВиК, что приводит либо к формированию некомфортного микроклимата, либо перерасходу энергоресурсов.

Использование дифференциальных трехмерных уравнений Навье-Стокса следует рассматривать как дальнейшее развитие традиционных интегральных методов расчета воздухообмена воздухораспределения для зданий разного типа.

В настоящее время использование методов численного решения уравнений Навье-Стокса применительно к расчету и проектированию систем ОВиК не нашло широкого применения, что, в частности, связано с отсутствием методологической базы для таких расчетов. Для активного внедрения численных методов в расчет и проектирование систем ОВиК необходимо **разработать научные основы создания математических моделей** для решения задач воздухообмена и воздухораспределения в общественных зданиях.

Настоящая работа будет способствовать внедрению методов численного моделирования в проектирование систем ОВиК, что позволит повысить уровень проектных решений, обеспечив выбор наиболее рациональных и энергоэффективных вариантов.

**Рабочая гипотеза** диссертационного исследования – использование методов численного 3D моделирования для помещений большого объема с неравномерно распределенными тепловлажностными и газовыми нагрузками для обеспечения нормируемых параметров микроклимата и качества воздуха.

**Цель и задачи исследования.**

*Цель исследования* – разработка научных основ постановки и решения численными методами задач обеспечения качества воздуха и параметров микроклимата, воздухообмена и воздухораспределения в общественных зданиях в условиях сложных смешанно-конвективных вентиляционных течений.

*Объект исследования* – вентилируемые и кондиционируемые объемы общественных зданий с неравномерно распределенными статическими и динамическими источниками тепло-, влаго- и газовыделений, в которых формируются сложные циркуляционные течения.

*Предмет исследования* – расчет воздухообмена и воздухораспределения на основе численного моделирования распределенных параметров микроклимата в объемах помещений общественных зданий (полей температуры, подвижности воздуха, концентраций вредности и т.д.) при работе приточно-вытяжных систем вентиляции в стационарных и нестационарных условиях.

*Задачи исследования:*

1) разработать научные основы реализации дифференциального подхода для решения задач воздухообмена и воздухораспределения общественных зданий на основе численного решения уравнений Навье-Стокса;

2) создать классификацию условий формирования вентиляционных течений и параметров микроклимата в помещениях большого объема при наличии разного типа источников тепло-, влаго-, газовыделений;

3) обосновать выбор моделей турбулентности, обеспечивающих получение достоверных результатов при расчете воздухообмена и воздухораспределения применительно к сложным смешанно-конвективным потокам в больших объемах;

4) разработать научные основы для учета воздействия человека, как источника влияния на микроклимат и качество воздуха в общественных зданиях с массовым пребыванием людей;

5) обосновать необходимость учета радиационного теплообмена;

6) разработать математические модели для решения задач организации воздушного режима помещений общественных зданий с источниками тепло-, влаго-, газовыделений и рекомендации к их применению;

7) обосновать достоверность применения численного моделирования для расчета вентиляционных течений путем сравнения результатов расчета с данными натурных и лабораторных экспериментов;

8) на базе разработанных научных основ применения математического моделирования провести исследования по организации воздушного режима помещений реальных объектов: ледовых арен, зрительных залов, бассейнов. Например, Ледовый дворец «Айсберг» в г. Сочи, ледовая арена в г. Екатеринбург и других уникальных объектов.

**Методологической основой** диссертационного исследования послужили основные положения теории тепломассообмена, аэродинамики вентиляции, методы математической статистики и планирования эксперимента, теория численного моделирования неизоотермических турбулентных течений.

**Методы исследования** представляют собой комплексный вычислительный эксперимент с применением сертифицированного программного кода *Simcenter STAR-CCM+*, натурные и лабораторные эксперименты на стендах завода «Арктос» и ФГБОУ ВО СПбГАСУ.

**Область исследования** соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение: п.1 «Исследования теплового, воздушного, влажностного режимов помещений, зданий и сооружений», п.4 «Разработка математических моделей, методов, алгоритмов, использование численных методов, с проверкой их адекватности, для расчета, конструирования и проектирования систем теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха».

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

1) разработаны научные основы реализации дифференциального подхода для решения задач вентиляции различных типов помещений общественных зданий на основе численного решения уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу;

2) обосновано применение двухпараметрических полуэмпирических моделей турбулентности при расчете сложных воздушных течений и пространственного распределения параметров микроклимата для помещений большого объема с источниками тепло-, влаго-, газовыделений на основе сравнения с результатами, полученными с использованием *LES*-подхода;

3) установлено влияние радиационного теплообмена на формирование параметров микроклимата в объеме помещений общественных зданий и показана необходимость его учета при численном моделировании;

4) разработаны научные основы для учета влияния человека, как источника тепло-, влаго-, газовыделений в общественных зданиях с массовым пребыванием людей

5) разработана и обоснована классификация условий формирования параметров микроклимата в помещениях большого объема при совместном действии конвективных потоков от различных источников, приточной и вытяжной вентиляции;

б) разработан комплекс математических моделей, представлены методические рекомендации по их применению для различных условий формирования воздушного режима при наличии разного типа источников тепло-, влаго-, газовой выделений для определения рациональных схем организации воздухообмена и прогнозирования пространственного распределения параметров микроклимата и концентрации углекислого газа, применительно к общественным зданиям с массовым пребыванием людей;

7) выявлены с применением разработанных математических моделей особенности формирования параметров воздушной среды в объеме крытых ледовых арен, зрительных залов, бассейнов, предложены зависимости для определения коэффициентов воздухообмена по температуре и  $\text{CO}_2$ , универсальные зависимости для расчета изменения температуры по высоте объектов в безразмерном виде.

#### **Теоретическая значимость состоит:**

1) в обосновании применения полуэмпирических моделей турбулентности, необходимых для замыкания уравнений Навья-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, обеспечивающих достоверность результатов расчетов воздухообмена и воздухораспределения для помещений общественных зданий с массовым пребыванием людей;

2) в разработке научных основ математических моделей для анализа проектных решений по организации воздухообмена и воздухораспределения в зданиях разного назначения с учетом действующих источников тепло-, влаго-, газовой выделений с целью выбора наиболее рационального варианта организации воздушного режима;

3) в разработке условий формирования параметров микроклимата в помещениях большого объема при совместном действии приточной вентиляции и конвективных потоков;

4) в обосновании достоверности разработанных математических моделей для расчета пространственного распределения параметров микроклимата и газообразных вредностей в общественных зданиях с массовым пребыванием людей;

5) в уточнении коэффициентов воздухообмена по температуре и концентрации  $\text{CO}_2$  для зрительных залов и крытых ледовых арен;

6) в получении универсальных зависимостей для вертикального распределения температуры в безразмерном виде для зрительных залов и крытых ледовых арен.

#### **Практическая значимость:**

1) разработан комплекс математических моделей для решения численными методами задач отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, а также определения пространственно-временного распределения параметров микроклимата на стадии разработки проектных решений;

2) для помещений с массовым пребыванием людей обоснована целесообразность функционирования вентиляционного оборудования в нестационарном режиме, что обеспечивает уменьшение типоразмеров оборудования и снижение энергопотребления объектов;

3) создана классификация разработанных моделей, ориентированная на решение практических задач, связанных с повышением качества воздушной среды при разработке проектных решений;

4) разработаны рекомендации по применению разработанных моделей для расчета и организации воздухообмена для помещений большого объема (таких как ледовые арены, зрительные залы) с источниками тепло-, влаго-, газовыделений;

5) результаты исследований подтверждены актами внедрения в практику проектирования уникальных объектов;

6) результаты работы внедрены в учебный процесс СПбГАСУ в виде учебного пособия;

7) разработано и реализовано на практике новое устройство для радиационного охлаждения помещений различного назначения. Изобретение подтверждено патентом РФ на изобретение № 2495333.

**Достоверность результатов** исследований подтверждается натурными и лабораторными экспериментами с применением поверенных средств измерений, сравнением с опубликованными результатами других авторов. Достоверность разработанных моделей подтверждается их физической непротиворечивостью, согласованием результатов расчета с экспериментальными данными, использованием сертифицированных программных средств.

**Апробация результатов работы.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных конференциях, симпозиумах, форумах: Международный форум специалистов «Повышение эффективности работы систем тепло-, газо-, водоснабжения, отопления и вентиляции» HEAT & VENT`2006 (Москва, 2006); V Международная научно-практическая конференция «Вентиляция, Отопление, тепло-, газо-, водоснабжение жилых, промышленных и общественных зданий – пути повышения эффективности, экологической безопасности и энергосбережения» (Санкт-Петербург, 2006); Международные конференции «Воздух 2007», «Воздух 2010». Качество воздушной среды (Санкт-Петербург, 2007, 2010); Международная научно-практическая конференция STAR Russia: Компьютерные технологии решения прикладных задач теплопереноса и прочности (Н. Новгород, 2007, 2007, 2009, 2010, 2011, 2012); 61-я Международная научно-техническая конференция молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (Санкт-Петербург, 2008); Научные чтения, посвященные 80-й годовщине со дня рождения

д.т.н., профессора М.И. Гримитлина «Вентиляция общественных и промышленных зданий» (Санкт-Петербург, 2008); Третья Международная научно-техническая конференция «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции», посвящается 150-летию со дня рождения основоположника московской школы специальности ТГВ профессора В. М. Чаплина (Москва, 2009); Международная конференция NAFEMS NORDIC Conference 2012. Engineering Simulation: Best Practices, New Developments, Future Trends, 22-23 May 2012. Gothenburg, Sweden; II отраслевая конференция «Вентиляция, газоочистка и аэрозольный контроль на предприятиях атомной отрасли» (Санкт-Петербург, 2011); Международная конференция «Энергосбережение и «зеленые» технологии для центров обработки данных» (Москва, 2011); III-й Международный конгресс «Энергоэффективность. XXI век. Инженерные методы снижения энергопотребления зданий» (Санкт-Петербург, 2011); Международный конгресс, посвященный 180-летию СПбГАСУ «Наука и инновации в современном строительстве – 2012» (Санкт-Петербург, 2012); XIV-я конференция «Эффективные системы отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха и теплоснабжения» в рамках Международной строительной выставки и форума «Интерстройэкспо» (Санкт-Петербург, 2012); XVI-й Европейский АВОК – ЕНІ Симпозиум «Современное энергоэффективное оборудование для теплоснабжения, водоснабжения и климатизации зданий. Технологии зеленого строительства» (Москва, 2012); Международный форум высотного и уникального строительства 100+ Forum Russia (Екатеринбург, 2016, 2017, 2018, 2023); Всероссийская научно-практическая конференция «Экологически ориентированная архитектура высоких технологий» (Москва, 2022); Международная научно-практическая конференция «Архитектура – Строительство – Транспорт – Экономика» (Санкт-Петербург, 2023); Международная научно-практическая конференция «Математическое моделирование систем и процессов» (Псков, 2023).

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 38 научных публикациях, в том числе 16 опубликованы в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ. Получен патент РФ на изобретение.

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационной работы внедрены в практику проектирования 12 объектов строительства общественных зданий с массовым пребыванием людей. На базе разработанных автором математических моделей выполнены численные исследования, направленные на корректировку рассчитанных традиционными методами воздухообменов и выбора рациональных способов воздухораспределения, с целью обеспечения нормируемых параметров микроклимата и ка-



чества воздуха. Выполненные численные расчеты позволили также скорректировать нагрузку на системы ОВиК, обеспечив рациональное использование энергоресурсов. Результаты проведенных научных исследований были внедрены в АО «ГОРПРОЕКТ» (г. Москва), ООО «АТП ТЛП архитекторы и инженеры» (г. Москва), ООО «Метрополис» (г. Москва), ООО ТПО «ПРАЙД» (г. Москва), ООО Проектно-производственная фирма «Александр Колубков» (г. Москва), ООО «ММ-Технологии» (г. Санкт-Петербург), ООО «РУСЬЭНЕРГОМОНТАЖ» (г. Санкт-Петербург), ООО «Центр ОПСН» (г. Москва), ООО «ВЕНТКРАФТ» (г. Москва), ООО «Команда Аспект» (г. Москва), ООО «Арктос» (г. Санкт-Петербург), используются в образовательном процессе СПбГАСУ (г. Санкт-Петербург).

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 266 наименований работ отечественных и зарубежных авторов и приложений. Диссертация изложена на 353 страницах основного текста и 35 страницах приложений, содержит 200 рисунков и 58 таблиц.

*Во введении* сформулирована проблема и обоснована актуальность исследований, направленных на внедрение математического моделирования в практику проектирования систем ОВиК общественных зданий различного назначения, сформулированы цель и задачи, определена научная новизна, обоснованы теоретическая и практическая значимость полученных результатов работы.

*В первой главе* проведен анализ существующих методов расчета воздухообмена и воздухораспределения. Рассмотрены различные схемы подачи воздуха в помещение, принципы вытесняющей вентиляции, расчет характеристик конвективных потоков. Эти вопросы исследовали: Г.Н. Абрамович, И.А. Шепелев, В.Н. Талиев, А. Кестель, С.Н. Сыркин, М.И. Гримтлин, Д.Н. Ляховский, В.Н. Посохин, Л. Хеландер, В. Кливс, Л. Болтер, Р. Кнак, В.А. Бахарев, В.Н. Трояновский, М.Д. Тарнопольский, Л.А. Вулис, В.В. Батурин, С.Е. Бутаков, В. Базус, В. Кочова, В. И. Полушкин, В.Б. Кленов, Л.С. Лейбензон, М. Маскет, А.Е. Шейдеггер, В.Р. Таурит, И.Е. Идельчик, Т.А. Дацюк, С.М. Анисимов, А.М. Гримтлин, Н.Н. Садовская, О.Н. Тимофеева, Г.Я. Воловой, Л.В. Кузьмина, В.И. Бодров, М.В. Бодров, Л.Б. Успенская, Б.Н. Юрманов, Л.С. Клячко, В.И. Ханжонок, Г.М. Позин, В.В. Дерюгин, Элизабет Мундт, Питер Нильсен, Brohus Ryberg, Я.Б. Зельдович, Дж. Тернер, В.М. Эльтерман, В.Н. Богословский, Й. Джалурия, Д. Этеридж, М. Сандберг и др.

Применение известных расчетных зависимостей в случае сложных смешанно-конвективных потоков в больших объемах не позволяет прогно-

зировать при проектировании значения и особенности распределения параметров микроклимата в зданиях. Методы математического моделирования дополняют традиционные интегральные методы расчета и позволяют:

- уточнить воздухообмен, обеспечивающий нормативные параметры микроклимата, на основе анализа их пространственного распределения;
- учесть радиационную составляющую теплообмена для помещений большого объема с неравномерно распределенной тепловой нагрузкой.

Показана необходимость внедрения численных методов расчета в проектирование систем ОВиК современных общественных зданий.

*Во второй главе* представлены математические модели для численного моделирования тепловлажностного режима помещений общественных зданий. Рассмотрены основные подходы к численному описанию турбулентных течений на базе уравнений Рейнольдса и вихререзающих *LES, DES* подходов. Выполнен анализ применения полуэмпирических моделей турбулентности, рассмотрены области их применения и способы моделирования пристенных течений. Приведены модели для описания радиационного теплообмена.

*В третьей главе* разработаны научные основы численного моделирования параметров микроклимата в помещениях общественных зданий, представлено теоретическое обоснование использования численных методов для расчета воздухораспределения, разработана классификация условий формирования параметров микроклимата.

Рассмотрено влияние людей на формирование характеристик воздушной среды в общественных зданиях как основного источника тепло-, влаго- и газовыделений. В разделе 3.1 описана разработка математической модели человека, обоснованы необходимые и достаточные условия учета воздействия человека на параметры микроклимата при численных расчетах. Раздел 3.2 посвящен обоснованию необходимости решения уравнений радиационного теплообмена для ряда задач с источниками тепловыделений.

Показано, что математические модели, основанные на подробном описании характерных элементов систем ОВиК, таких как: конвекторы с естественной и вынужденной конвекцией, воздухораспределительные устройства, системы водяного напольного охлаждения – существенно усложняют расчеты и не применимы для практических целей.

Разделы 3.4 и 3.5 посвящены разработке упрощенных моделей на основе их сравнения с разработанными подробными моделями элементов систем ОВиК, доказана их работоспособность и вычислительная эффективность. Сравнение эффективности различных схем воздухораспределения предложено проводить на основе распределения индекса комфортности

Фангера, для реализации данного подхода написана специальная программа, подключаемая к коду *STAR-CCM+*. В разделе 3.7 создана классификация на основе комплекса разработанных математических моделей для численного моделирования распределенных параметров микроклимата и углекислого газа в помещениях общественных зданий, учитывающая особенности формирования воздушного режима, даны рекомендации по применению разработанных моделей.

*В четвертой главе* обоснована применимость полуэмпирических моделей турбулентности для численных расчетов задач воздухообмена и воздухораспределения (раздел 4.3) при сравнении результатов с применением *LES* метода. Доказана достоверность расчетов с использованием разработанных моделей на основе сопоставления с результатами лабораторных и натурных экспериментов (разделы 4.2, 4.4).

*В пятой главе* приведены результаты численных расчетов воздухообмена и воздухораспределения на базе разработанных моделей для ледовых арен, зрительных залов и бассейнов. Проанализированы проектные решения различных реальных объектов, получены зависимости изменения температуры воздуха с высотой. Также представлены результаты разработки с использованием численных методов отопительно-охладительного потолочного устройства, на которое получен патент РФ на изобретение.

*В шестой главе* выполнено экономическое обоснование применения численных методов при проектировании систем ОВиК. Выполнен экономический расчет. Показано, что при внедрении в проектирование численного моделирования стоимость разработки проекта увеличивается в среднем на 1 млн. руб., при этом затраты на устранение недостатков проекта, связанных с формированием некомфортного микроклимата, составят не менее 6 млн. руб.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ**

### **1. Разработана структурная схема решения задач воздухообмена и воздухораспределения численными методами.**

Каждый элемент представленной блок-схемы (рисунок 1) является частью общей математической модели и требует разработки математического описания. Для решения задач воздухообмена и воздухораспределения используется численное решение системы дифференциальных уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) &= 0, \\
\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) &= -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}} + \bar{\tau}_t) + \rho \vec{g}, \\
\frac{\partial \rho c_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho c_i \vec{V}) &= -\nabla \cdot (\bar{J}_i + \bar{J}_{it}), \\
\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V} [\rho E + p]) &= \nabla \cdot \left( \vec{V} \cdot [\bar{\bar{\tau}} + \bar{\tau}_t] \right) - \nabla \cdot (\bar{q} + \bar{q}_t) + S_r,
\end{aligned} \tag{1}$$

где  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  – время, с;  $\vec{V}$  – вектор скорости, м/с;  $p$  – давление, Па;  $\bar{\bar{\tau}}$  – тензор вязких напряжений, Па;  $c_i$  – массовая концентрация  $i$ -ой компоненты смеси;  $\bar{J}_i$  – диффузионный поток  $i$ -ой компоненты, кг/(м<sup>2</sup> · с);  $E$  – внутренняя энергия, Дж/кг;  $\bar{q}$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $\bar{\tau}_t$ ,  $\bar{J}_{it}$   $\bar{q}_t$  – неизвестные тензор турбулентных напряжений, турбулентный поток массы  $i$ -ой компоненты, турбулентная составляющая вектора плотности теплового потока, определяемые с помощью полуэмпирической модели турбулентности;  $S_r$  – источниковый член потока теплоты, Вт/м<sup>3</sup>. Величины в системе уравнений (1) являются осредненными по всему спектру турбулентных пульсаций воздушного потока.

## 2. Обоснована достоверность и выбор моделей турбулентности.

*Расчет характеристик струи для современных воздухораспределителей* показал, что необходимо корректно моделировать современные геометрически сложные устройства, которые формируют на выходе потоки с существенно неравномерным профилем скорости с разной степенью турбулентности. Для обоснования достоверности моделирования и анализа влияния различных моделей турбулентности выполнено сравнение результатов расчета истечения воздуха из многоконусного соплового воздухораспределителя *SMK 200* (фирмы «Арктос») с данными лабораторного эксперимента. Использовалась термоанемометрическая система с 8 сферическими датчиками, которыми измерялись поля скоростей на различных расстояниях от истечения. Для каждой замеряемой точки проводились параллельные измерения. Для проверки гипотезы однородности рассчитывалось отношение дисперсии воспроизводимости к суммарной, полученные значения сравнивались с критическим значением критерия Кохрена, равном 0,034 для уровня значимости 95%.

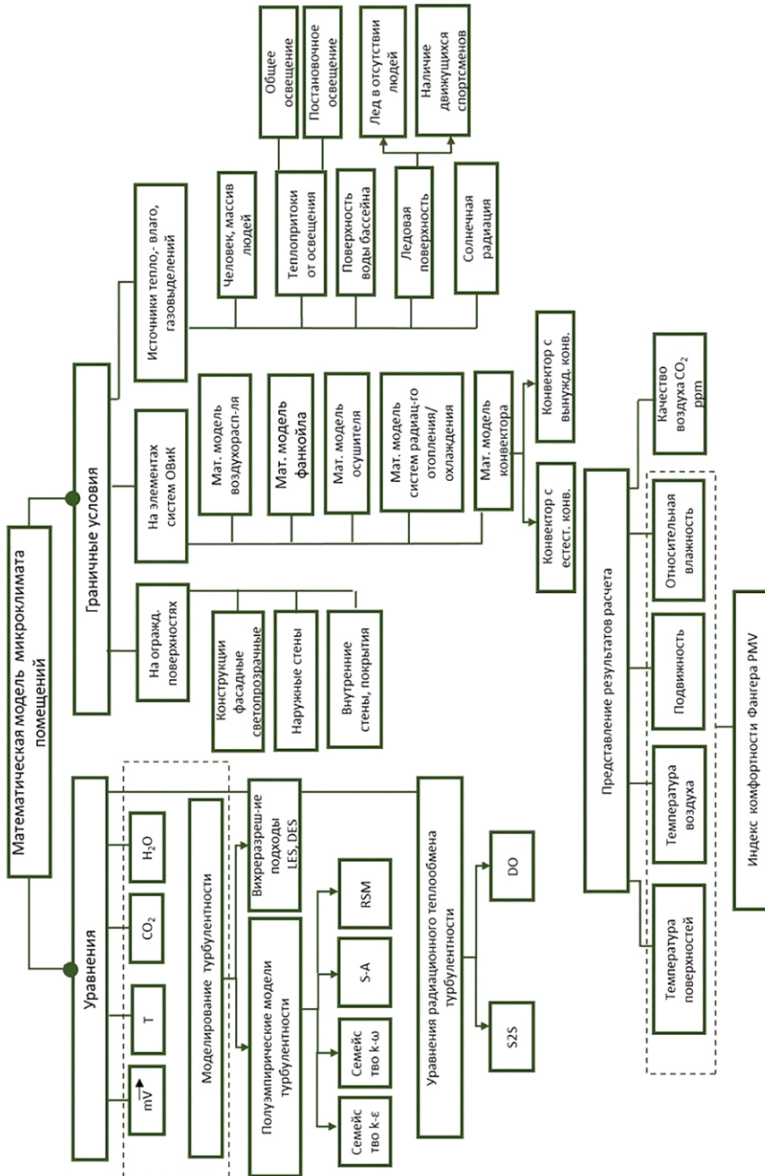


Рисунок 1 – Структурная схема постановки решения задач воздухообмена и воздухораспределения численными методами

Расчеты, связанные с использованием различных полуэмпирических моделей турбулентности, были проведены на сетке размерностью 4,2 млн. ячеек. Для проверки на сеточную сходимость было выполнено измельчение ячеек по всем направлениям в 2 раза.

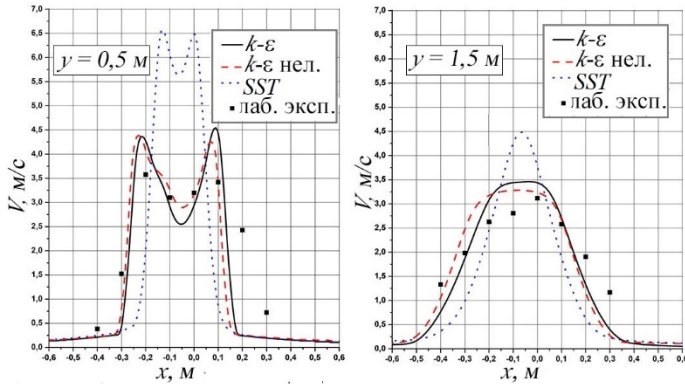


Рисунок 2 – Профиль модуля скорости

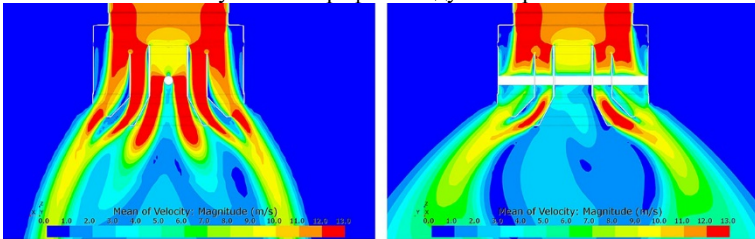


Рисунок 3 – Поле модуля скорости

Результаты показали, что модель турбулентности *SST* дает более высокие значения локальных максимумов неравномерного профиля струи (рисунок 3), по сравнению с полученными при использовании моделей турбулентности семейства *k-ε* и с данными лабораторного эксперимента (рисунок 2). По мере удаления от плоскости истечения различия между значениями скоростей, полученных для различных моделей турбулентности, становятся меньше (рисунок 2), начиная с 2,5 м их влияние не существенно. При этом наилучшую сходимость с данными лабораторного эксперимента демонстрирует расчет с использованием нелинейной *k-ε* модели турбулентности.

*Обоснование применимости полуэмпирических моделей турбулентности для расчета смешанных течений в помещениях большого объема.* Выполнен количественный анализ влияния двухпараметрических полуэмпи-

рических моделей турбулентности на особенности формирования пространственного распределения параметров микроклимата для помещений большого объема с источниками тепло-, газовойделений на основе сравнения с результатами использования *LES*-подхода. Для этих целей проведены расчеты микроклимата в помещении зрительного зала площадью 350 м<sup>2</sup> вместимостью 600 человек. Схема вентиляции – вытесняющая (в этом случае нет необходимости разрешать в рамках *LES* подхода турбулентные структуры приточных струй от диффузоров, что потребовало бы существенно более мелких расчетных ячеек и шага по времени).

Численные расчеты проведены при использовании моделей турбулентности *S-A*, стандартной *k-ε*, квадратичной *k-ε*, *k-ω*, *SST*. Размерность расчетной сетки для проведения моделирования с помощью *LES* подхода составила 12 млн. ячеек. Шаг по времени – 0,25 с. Для оценки разрешения инерционного интервала при использовании *LES* подхода были рассчитаны энергетические спектры пульсаций компоненты скорости. Получено, что спектры содержат участок с наклоном, близким к закону «- 5/3», что является одним из общепринятых критериев точности *LES* (рисунок 4).

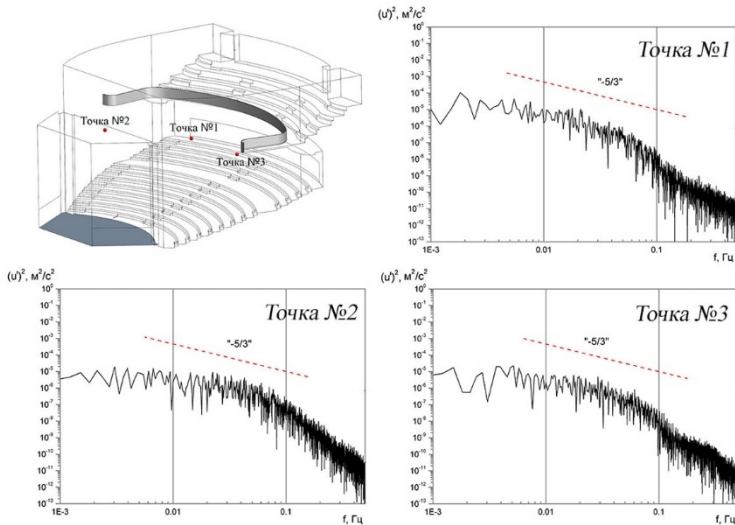


Рисунок 4 – Расположение характерных точек и энергетический спектр пульсаций величины  $u$ , построенный по результатам *LES* в этих точках

Для сравнения результатов расчета, полученных при использовании *LES* подхода и полуэмпирических моделей турбулентности (рисунок 5), нестационарные поля температуры, скорости, концентрации  $\text{CO}_2$  усреднялись за промежутки времени 1 ч.

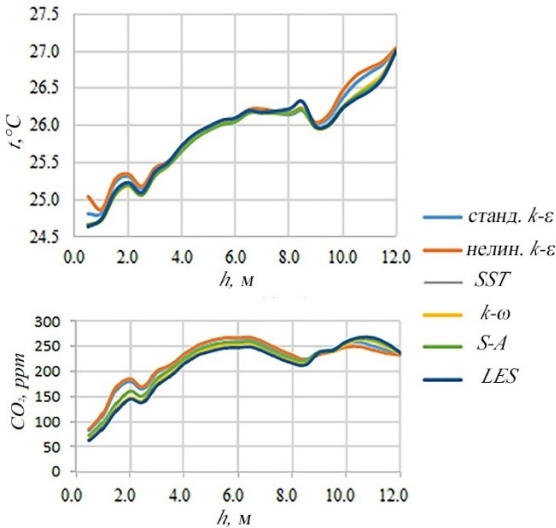


Рисунок 5 – Сравнение результатов, полученных с помощью полуэмпирических моделей турбулентности с результатами *LES* подхода

### 3. Обоснована необходимость учета радиационного теплообмена при расчете численными методами параметров микроклимата в объеме помещений общественных зданий.

Решение уравнения радиационного теплообмена дополнительно к системе уравнений (1) требуется для учета влияния инсоляции на параметры микроклимата и работу систем кондиционирования воздуха, а также при расчете температуры внутренних поверхностей светопрозрачных конструкций. На основании численных расчетов для помещений со светопрозрачными конструкциями *обосновано применение модели широкополосного излучения*, так как модель излучения серого тела предполагает постоянство коэффициентов поглощения и пропускания теплового излучения прозрачными поверхностями во всем диапазоне длин волн, что несправедливо для большинства светопрозрачных конструкций. Для корректного учета влияния солнечной радиации и нагретых внутренних поверхностей необходимо учитывать как проходящую энергию на длинах волн  $\lambda=10^{-7}$  –  $3 \cdot 10^{-6}$  м, так и поглощаемую стеклом длинноволновую часть инфракрасного излучения при  $\lambda > 3 \cdot 10^{-6}$  м. Сравнение результатов расчетов для двух моделей (излучение серого тела и широкополосное излучение) проведено для задачи кондиционирования помещения вестибюля. Для расчета падающего на фасад прямого и рассеянного излучения использовалась методика,

Получено, что полуэмпирические модели турбулентности позволяют описать характеристики вентиляционных течений, формируемых в больших объемах общественных зданий, с точностью до 5 – 15% в зависимости от используемой модели турбулентности.



приведенная в *ASHRAE* и интегрированная в программный комплекс *Simcenter STAR-CCM+*. Для замыкания уравнений Рейнольдса использовалась модель турбулентности нелинейная  $k-\epsilon$ . Размерность расчетной сетки – 1 830 000 ячеек.

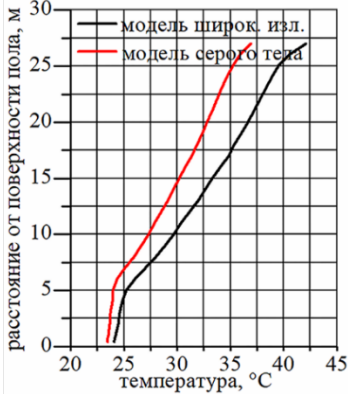


Рисунок 6 – Изменение температуры воздуха по высоте помещения при использовании двух моделей излучения

На рисунке 6 представлено сравнение результатов расчета температуры воздуха в вестибюле. Использование более простой модели излучения «серого тела» занижает температуру в разных зонах вестибюля на 1–5 °C. Максимальные различия в значениях температуры имеют место на вытяжных устройствах, что приводит к занижению требуемой холодопроизводительности рециркуляционной системы более, чем на 20%.

Обоснована необходимость учета радиационного теплообмена для помещений с системами напольного охлаждения/отопления.

Расчеты выполнены на примере помещения 200 м<sup>2</sup> с системой водяного напольного охлаждения. Рассмотрены два случая: наличие и отсутствие солнечного излучения. Теплопритоки от солнечного излучения в случае отсутствия учета радиационного теплообмена задавались в виде объемного источников члена в уравнении энергии.

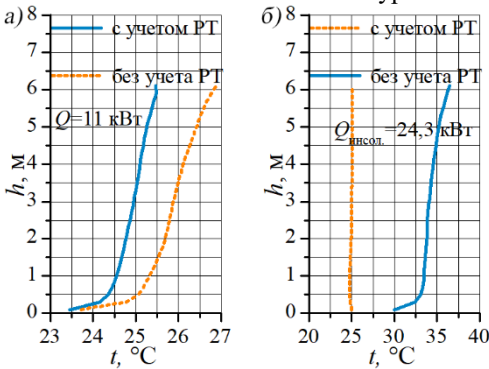
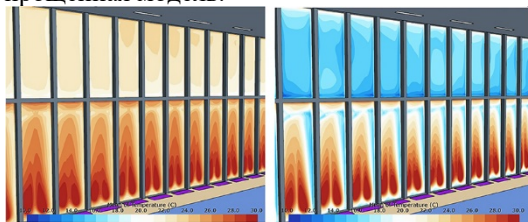


Рисунок 7 – Изменение температуры по высоте помещения: а – без инсоляции; б – с инсоляцией

Получено (рисунок 7), что при наличии солнечного излучения расчет без учета радиационного теплообмена приводит к завышению значений температуры воздуха в помещении на 5–10 °C, то есть не позволяет корректно описать работу систем напольного охлаждения.

Обоснована необходимость учета радиационного теплообмена для светопрозрачных фасадных конструкций в холодный период года.

Для оценки влияния радиационного теплообмена на распределение температуры по объему помещения и на внутренней поверхности светопрозрачных конструкций проведены расчеты микроклимата в помещении плавательного бассейна, площадь водной поверхности 391 м<sup>2</sup>. Вдоль фасада расположены внутрипольные конвекторы. Для замыкания уравнений Рейнольдса использовалась модель турбулентности нелинейная  $k$ - $\epsilon$ . Размерность расчетной сетки – 12,3 млн ячеек. Для учета в численном расчете работы внутрипольного конвектора была использована разработанная упрощенная модель.



а) б)

Рисунок 8 – Поле температуры на поверхности конструкции фасадной светопрозрачной:  
а) с учетом радиационного теплообмена,  
б) без учета радиационного теплообмена

Сравнение результатов показало, что отсутствие учета радиационного теплообмена приводит к занижению температуры внутренней поверхности фасадной конструкции на 4 – 7 °С, то есть будет завышаться требуемая производительность систем отопления.

Температуры в обслуживаемой зоне для сравниваемых вариантов практически одинаковы. Это связано с тем, что несмотря на более низкую температуру светопрозрачной конструкции, теплопотери помещения не увеличились, так как в модели учитывается только конвективная часть коэффициента внутренней теплоотдачи и не учитывается радиационная часть (вследствие отсутствия решения уравнений радиационного теплообмена).

Обоснована необходимость учета радиационного теплообмена при моделировании микроклимата ледовых арен.

Для учета влияния радиационного теплообмена на распределение температуры по объему чаши ледовой арены были проведены численные расчеты с заданными параметрами: вместимость арены 12 тыс. зрителей, площадь ледовой поверхности 1770 м<sup>2</sup>. Реализована вытесняющая вентиляция. Для замыкания уравнений Рейнольдса использовалась модель турбулентности  $k$ - $\epsilon$ . Размерность расчетной сетки – 9,2 млн ячеек. Результаты, полученные с помощью численной модели, включающей уравнение радиационного теплообмена, и с помощью численной модели без учета радиационного теплообмена приведены на рисунке 9.

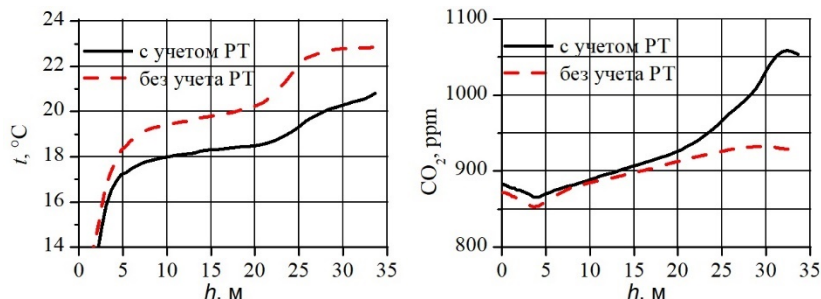


Рисунок 9 – Влияние учета радиационного теплообмена по поля распределения микроклимата и углекислого газа

Получено, что отсутствие в математической модели уравнения радиационного теплообмена приводит к завышению температуры воздуха в объеме чаши ледовой арены до 3 °С, а также к искажению характера изменения влагосодержания и  $\text{CO}_2$  по высоте помещения арены. Отметим, что для случая перемешивающей системы вентиляции влияние учета радиационного теплообмена будет меньше.

#### 4. Разработаны математические модели элементов систем отопления, вентиляции и кондиционирования.

Для моделирования практических задач микроклимата помещений общественных зданий, для которых характерна установка 10 и более конвекторов, не представляется возможным использование подробных моделей элементов систем ОВиК. Так, детальное математическое описание работы конвектора, включающее в себя расчет течения воды в трубках теплообменника, температурное поле в объеме и на поверхности ребер теплообменника, процесс теплоотдачи от поверхности теплообменника и трубок к воздуху, требует использование расчетных сеток 15 – 30 млн. ячеек для описания одного конвектора. Для возможности решения практических задач необходима разработка упрощенных математических моделей.

##### Разработана математическая модель конвектора с естественной конвекцией.

Для разработки упрощенной модели конвектора с естественной конвекцией предварительно были выполнены численные расчеты с применением подробной модели внутривольного конвектора, установленного вблизи светопрозрачного ограждения. Для замыкания уравнений Рейнольдса использовалась модель турбулентности SST, так как проводился расчет теплообмена вблизи поверхностей теплообменника и от горячей воды к трубам; размер пристенных ячеек подбирался таким образом, чтобы значения  $y^+$  не превышали 1. Разработка упрощенной модели конвектора состояла в замене геометрии реального теплообменника пористым телом, в

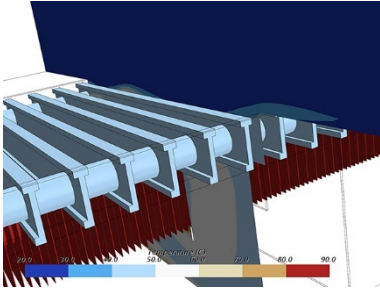


Рисунок 10 – Распределения температуры на поверхности пластин теплообменника, алюминиевой решетки

объеме которого происходит нагрев протекающего через него воздуха. Разработанный способ позволяет с хорошей точностью (таблица 1) описывать вклад работы конвекторов в результирующие поля температуры и скорости воздуха в помещении на расчетных сетках, пригодных для моделирования микроклимата помещений с большим количеством установленных конвекторов.

Таблица 1 – Сравнение численного моделирования с помощью подробной и упрощенной моделей внутрипольного конвектора с естественной конвекцией

Наименование варианта	Расчетная сетка, млн. ячеек	Теловой поток от конвектора в помещение, полученный в модели, Вт	Средняя температура в помещении	Средняя температура внутренней поверхности светопрозрачного фасада
Подробная модель	20,2	301	19,8	14,2
Упрощённая модель	1,8	303	19,9	14,6

Разработка математической модели конвектора с принудительной конвекцией.

Для разработки упрощенной метаматематической модели конвектора с вынужденной конвекцией также предварительно была разработана подробная модель внутрипольного конвектора. Результаты расчетов приведены на рисунке 11 и в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение численного моделирования с помощью подробной и упрощенной моделей внутрипольного конвектора с принудительной конвекцией

Наименование варианта	Расчетная сетка, млн. ячеек	Теловой поток от конвектора в помещение, Вт	Средняя температура в помещении	Средняя температура поверхности фасада
Подробная модель	20,0	1 960	20,1	16,9
Упрощённая модель	1,6	1 960	19,8	17,2

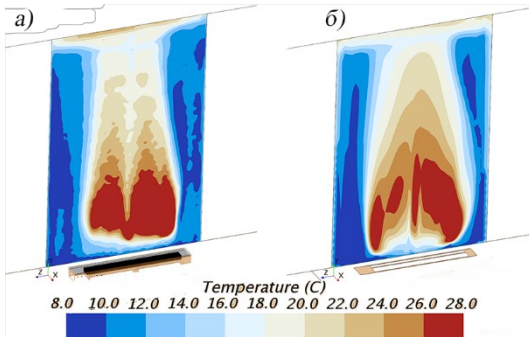


Рисунок 11 – Температура на поверхности окна:  
а) подробная модель; б) упрощенная модель

Разработка математической модели системы водяного напольного охлаждения.

Аналогично рассмотренным примерам получена упрощенная расчетная модель системы водяного напольного охлаждения. Разработка упрощенной модели состояла в замене геометрии труб, воды, стяжки, покрытия условным материалом. Значение термического сопротивления материала было подобрано на основе сравнения результатов расчета с полученными на подробной модели и составило  $0,1 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$ . При этом на внешней поверхности условного материала задавалось значение температуры, равное средней температуре воды в трубах, полученное при подробном моделировании ( $19 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Результаты сравнения приведены в таблице 3

Таблица 3 – Сравнение математических моделей

Наименование варианта	Расчетная сетка, тыс. ячеек	$Q_x$ пола, Вт/м <sup>2</sup>	$t$ поверхности пола, °C
Подробная модель	17 002	75,04	30,5
Упрощенная модель	327	74,5	30,3

**5. Научные основы учета влияния человека на формирование параметров микроклимата и качество воздуха в общественных зданиях с массовым пребыванием людей.**

Человек является неотъемлемой частью внутренней среды общественного здания. При разработке математической модели человека для учета его воздействия на параметры микроклимата необходимо определить достаточную детализацию описания фигуры человека, способ учета радиационной компоненты тепловыделений и влияния движущихся людей на турбулизацию воздуха и теплообмен у ледовой поверхности.

Разработанный способ также позволяет с достаточной точностью описывать вклад работы конвекторов в результирующие поля температуры и скорости в помещении на расчетных сетках, пригодных для практических задач

Для определения необходимой детализации при описании человека рассмотрено 4 варианта модели (рисунок 12), от наиболее подобной формы к самой простой.

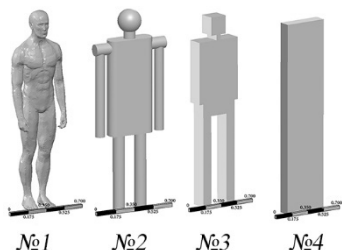


Рисунок 12 – Варианты геометрического описания человека

Таблица 4 – Средние значения параметров по объему обслуживаемой зоны.

Модель человека	$t_b$ , °C	$V$ , м/с	$\alpha_k$ , Вт/(м <sup>2</sup> · К)
№ 1	23,9	0,111	5,6
№ 2	23,9	0,109	5,6
№ 3	23,9	0,108	5,1
№ 4	23,9	0,109	5,1

Проведенные исследования (таблица 4) обосновали возможность использования модели № 4, требующей наименьших вычислительных ресурсов, так как отличие в средних по объему значениях температуры составило менее 0,5%, скорости – мене 3%, отличие в значениях коэффициента конвективной теплоотдачи с поверхности человека в среднем составило менее 10%.

*Необходимость и способ учета радиационной компоненты тепловыделений от человека.* На основе сравнения результатов моделирования с полной постановкой задачи, включающей решение уравнения радиационного теплообмена, обоснована возможность задания радиационной составляющей тепловыделений от человека с помощью объемного источников члена в уравнении энергии, что сокращает вычислительные ресурсы для задач вентиляции. Показано также, что исключение радиационной составляющей тепловыделений человека из баланса, либо задание всей явной теплоты в виде конвективной составляющей, приводит к заметному искажению результатов расчета.

*Разработан способ учета влияния движущихся людей* на тепломассобмен у ледовой поверхности. Формирование турбулентного следа с интенсивным перемешиванием воздуха, например, в области над ледовой поверхностью во время матча приводит к увеличению теплоотдачи от ледовой поверхности и снижению температура в зоне катания спортсменов.

Основная идея разработанного подхода (на примере  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентности) заключается в изучении на базе тестовых расчетов изменение параметров кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации, генерируемых в следе за движущимся спортсменом. В систему дифференциальных уравнений кинетической энергии турбулентности  $k$  и скорости ее диссипации  $\varepsilon$  вводятся источниковые члены  $Q_k$ ,  $Q_\varepsilon$ , генерирующие

турбулентность в зоне над ледовой поверхностью, имитируя движение спортсменов (2):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X_j} \left[ \rho u_j k - \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial k}{\partial X_j} \right] = \mu_t (p + p_B) - \rho \varepsilon + Q_k \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X_j} \left[ \rho u_j \varepsilon - \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_j} \right] = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t p + C_{\varepsilon 3} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t p_B - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + Q_\varepsilon$$

При этом значения источниковых членов выбираются таким образом, чтобы обеспечить в зоне ледового поля параметры турбулентности, схожие с аналогичными вследствие движущихся спортсменов.

Так как в реальных условиях при движении спортсмена неизвестна точная скорость движения, а, следовательно, и время затухания возмущений, то при возможности следует проводить калибровку разработанной модели для конкретных условий движения спортсменов (например, хоккейный матч, тренировка по шорт-треку, массовое, фигурное катание и пр.). Такая калибровка была проведена для ледовой арены «Айсберг» в условиях тренировки по шорт-треку. Были получены следующие результаты:

$$Q_k = 1,5 \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}^3}, \quad Q_\varepsilon = 22 \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}^4}.$$

Численные расчеты с учетом калибровки источниковых членов совпали с натурным экспериментом и показали, что при движении спортсменов температура над ледовой поверхностью снижается на 2 °С. Таким образом, при разработке модели влияние движущихся объектов на турбулизацию воздушной среды может быть учтено введением источниковых членов  $Q_k$ ,  $Q_\varepsilon$ , в уравнения кинетической энергии турбулентности  $k$  и скорости ее диссипации  $\varepsilon$ .

## **6. Разработана классификация условий формирования вентиляционных течений и параметров микроклимата в помещениях большого объема при наличии источников тепло-, влаго-, газовыделений.**

На основе совокупности разработанных математических моделей для численного моделирования распределенных параметров микроклимата и  $\text{CO}_2$  была создана классификация вентиляционных течений, характеризующая условия формирования параметров микроклимата в помещениях общественных зданий. Объекты общественных зданий анализировались с точки зрения необходимости учета радиационного теплообмена, характера источников тепло- и влагопоступлений, преобладания вынужденной или свободной конвекции, условий тепломассообмена вблизи твердых поверхностей. Классификация вентиляционных течений приведена в таблице 5. При проведении численного моделирования объектов общественных зданий следует выделять признаки рассматриваемых вентиляционных

течений согласно таблице 5 и выбирать соответствующие математические модели.

Например, набор моделей для плавательных бассейнов – 2, 5; ледовых арен со зрителями – 3, 4, 5, 6; зрительных залов – 3, 4 (таблица 5).

Таблица 5 – Классификация вентиляционных течений с точки зрения разработки математических моделей

№	Описание	Характеризующие параметры	Особенности математической модели
1	Вентиляционные течения в помещениях с незначительными тепло- и влагопоступлениями	$Ri < O(1)$ $Gr=O(10^8) - O(10^9)$ $q= O(1) \text{ Вт/м}^2$	Нет необходимости в решении уравнений радиационного теплообмена (УРТ)
2	Вентиляционные течения в помещениях с существенными теплопоступлениями	$Ri = O(1)$ $Gr=O(10^8) - O(10^{10})$ $q= O(10) \text{ Вт/м}^2$	Требуется решение УРТ, моделирование солнечной радиации
3	Вентиляционные течения в помещениях с массовым пребыванием людей	$Ri = O(1)$ $Gr=O(10^8) - O(10^{10})$ $q_{л}= O(100) \text{ Вт/м}^2$	Необходим отдельный учет радиационного и конвективного потоков от людей.
4	Вентиляционные течения в помещениях с существенными теплопотоками от постановочного освещения	$Ri = O(1) - O(10)$ $Gr=O(10^9) - O(10^{11})$ $q_{осв}= O(100) \text{ Вт/м}^2$	Раздельный учет коротковолновой и длинноволновой составляющих теплового излучения от освещения
5	Вентиляционные течения в помещениях с существенными влагопоступлениями	$M=O(10) \text{ г/(ч}\cdot\text{м}^2)$	Требуется решение уравнения переноса компоненты пара
6	Вентиляционные течения в помещениях при наличии ледовой поверхности	$Ri = O(1) - O(10)$ $Gr=O(10^9) - O(10^{11})$ $q_{рад}= O(10) \text{ Вт/м}^2$	Внесение источника генерации турбулентности вблизи ледового поля, решение УРТ

## 7. Определения коэффициентов воздухообмена по температуре и $CO_2$ для ледовых арен.

При проведении численных исследований формирования воздушного режима ледовой арены получены закономерности распределения параметров микроклимата и  $CO_2$  для различных схем воздухораспределения, в том числе в условиях применения вытесняющей вентиляции. Исходные данные для расчетов приведены в таблице 6, результаты моделирования – на рисунке 13 и в таблице 7.



Таблица 6 – Параметры на притоке и схемы подачи воздуха на ярусы трибун

Наименование схемы	Подача в зону ледового поля			Подача в зону зрителей			Подача в зону зрителей		
	$t_{пр}$ , °C	$d_{пр}$ , г/кг	$L_{пр}$ , М <sup>3</sup> /ч	$t_{пр}$ , °C	$d_{пр}$ , г/кг	$L_{пр}$ , М <sup>3</sup> /ч	1 ярус	2 ярус	3 ярус
№ 1.1	10	2	42 700	15	5	400 000	В	В	В
№ 1.2	20	2	42 700	13,9	5	400 000	В	В	В
№ 1.3	-	-	-	14,5	4,7	442 700	В	В	В
№ 2.1	10	2	42 700	15	5	400 000	В	В	П
№ 2.2	20	2	42 700	13,9	5	400 000	В	В	П
№ 2.3	-	-	-	14,5	4,7	442 700	В	В	П
№ 3.1	10	2	42 700	15	5	400 000	В	П	П
№ 3.2	20	2	42 700	13,9	5	400 000	В	П	П
№ 3.3	-	-	-	14,5	4,7	442 700	В	П	П
№ 4.1	10	2	42 700	15	5	400 000	П	П	П
№ 4.2	20	2	42 700	13,9	5	400 000	П	П	П
№ 4.3	-	-	-	14,5	4,7	442 700	П	П	П

Примечание – Здесь В – вытесняющая, П – перемешивающая.

На основании полученных результатов, рассчитаны коэффициенты воздухообмена для ярусов трибун при различных схемах подачи приточного воздуха, которые варьируется в диапазонах  $k_t$  от 1 до 3,2,  $k_{CO_2}$  от 1 до 2,1,  $k_d$  от 1 до 2,2 и приведены на рисунке 13.

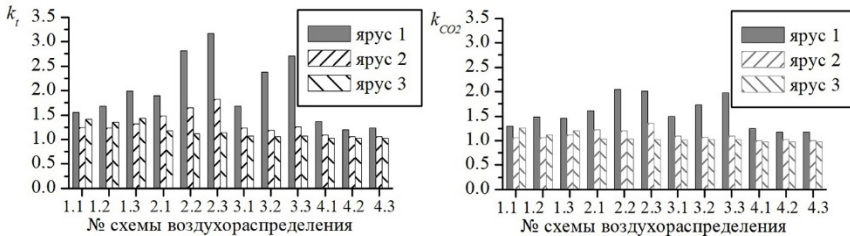


Рисунок 13 – Значение коэффициента воздухообмена по температуре, углекислому газу при различных схемах воздухоораспределения

Показано, что в объеме чаши арены формируется сложное турбулентное течение, с циркуляцией, определяемой как приточными струями, так и конвективными потоками нагретого массивом зрителей воздуха. Получено, что параметры в зоне ледового поля, в том числе на отметке 1,5 м (таблица 7), определяются не только работой систем кондиционирования воздуха (СКВ), обеспечивающих подачу воздуха в направлении поверхности льда, но зависят также от средних по объему значений температуры и влагосодержания, формирующихся в объеме чаши арены. Следова-

тельно, расчет параметров приточных систем ледовых арен, который предполагает, что СКВ зоны трибун и зоны ледового поля рассчитываются независимо друг от друга несправедлив.

Таблица 7 – Значение параметров на высоте 1,5 м над поверхностью ледового поля при различных схемах воздухораспределения

Наименование схемы	$t, ^\circ\text{C}$	$d, \text{г/кг}$	$\text{CO}_2, \text{ppm}$	Наименование схемы	$t, ^\circ\text{C}$	$d, \text{г/кг}$	$\text{CO}_2, \text{ppm}$
№ 1.1	14,4	5,4	911	№ 3.1	14,3	5,4	864
№ 1.2	12,5	5,3	787	№ 3.2	11,3	5,3	784
№ 1.3	12,5	5,5	877	№ 3.3	11,4	5,2	753
№ 2.1	13,9	5,3	876	№ 4.1	14,4	5,5	886
№ 2.2	11,3	5,2	718	№ 4.2	14,1	5,5	892
№ 2.3	11,6	5,2	757	№ 4.3	14,1	5,6	897

Для обоснования достоверности численных расчетов воздухообмена и воздухораспределения в объеме арены был проведен натурный эксперимент в отсутствие зрителей и спортсменов, но при работающих системах вентиляции и кондиционирования воздуха и включенном общем освещении. Сравнение результатов численного и натурального эксперимента показало, что разброс в данных по полям температуры составил менее 5%, а по полям влагосодержания менее 10%.

## 8. Обобщающие зависимости для расчета изменения безразмерных значений температуры для крытых ледовых арен.

На основе разработанных математических моделей организации воздушного режима ледовых арен с массовым пребыванием людей были выполнены расчеты параметров микроклимата (поля температуры, влагосодержания, скорости) и углекислого газа в объеме чаши 5 ледовых арен. Исходные данные для расчетов приведены в таблице 8, результаты моделирования – в таблице 9 и на рисунках 14, 15.

Таблица 8 – Характеристики рассчитанных ледовых арен

Наименование арены	Объем чаши арены, $\text{м}^3$	Высота, м	Количество зрителей	Нагрузки от освещения, Вт	Температура льда, $^\circ\text{C}$	Кратность воздухообмена, 1/ч
№ 1	266 938	36	12 000	355 000	-6	1,09
№ 2	295 617	40	12 000	352 000	-5	0,88
№ 3	284 099	40	12 240	380 142	-6	1,52
№ 4	245 761	34	12 000	208 000	-5	1,79
№ 5	451 042	50	17 600	329 000	-6	1,22

Таблица 9 – Значение параметров микроклимата и CO<sub>2</sub> для ледовых арен

Наименование арены	$t$ средняя температура воздуха в чаше, °C	$t$ на вытяжке, °C	$d$ среднее в чаше, г/кг	$d$ на вытяжке, г/кг	CO <sub>2</sub> среднее в чаше, ppm	CO <sub>2</sub> на вытяжке, ppm
№ 1	20,45	21,36	6,07	6,21	1 378	1 417
№ 2	21,81	22,16	7,34	7,43	1 313	1 340
№ 3	20,23	20,68	6,51	6,92	1 260	1 308
№ 4	19,90	20,63	5,98	6,22	967	1 052
№ 5	18,74	19,21	6,27	6,43	1 306	1 362

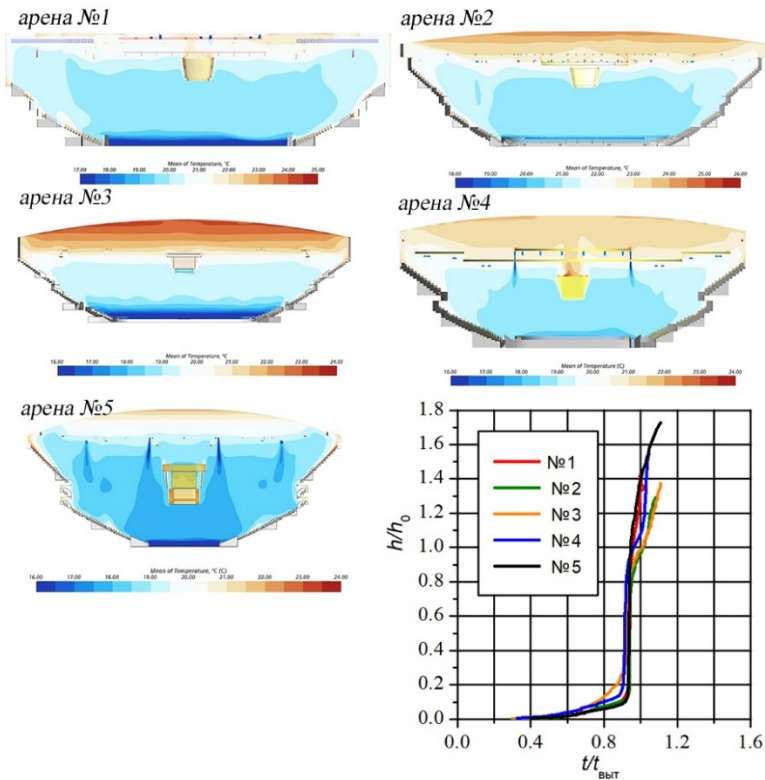


Рисунок 14 – Поля температуры для арен № 1 – 5; изменение температуры с расстоянием до ледовой поверхности

Для всех рассмотренных случаев получено, что над ледовым полем формируется область постоянных параметров, начиная от отметки высоты бортов и заканчивая, как показали исследования, на высоте расположения

источников освещения. В связи с этим при построении графиков изменения параметров микроклимата и  $\text{CO}_2$  по высоте помещения использована безразмерная высота  $h_o$ , которая определяется (3):

$$h_0 = \frac{\sum_1^n h_i N_i}{\sum_1^n N_i} \quad (3)$$

где  $n$  – количество светотехнических приборов,  $h_i$  – высота расположения  $i$ -ого прибора,  $N_i$  – мощность  $i$ -ого прибора.

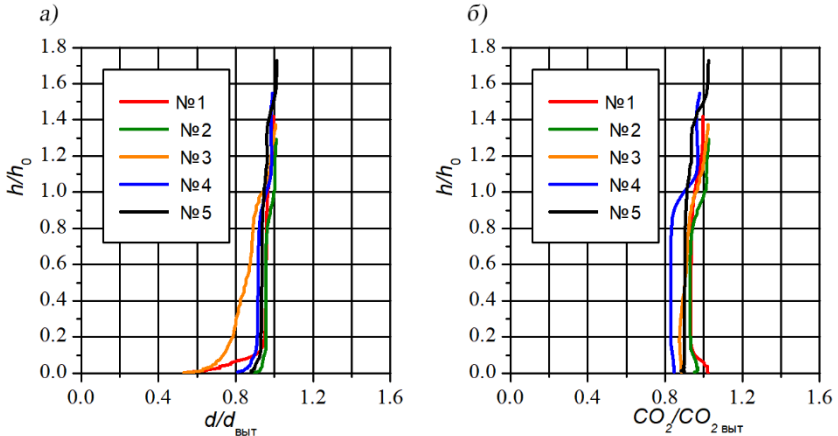


Рисунок 15 – Изменение с расстоянием до ледовой поверхности:  
а) влагосодержания; б)  $\text{CO}_2$

В результате обработки результатов моделирования для пяти рассчитанных ледовых арен получены обобщающие зависимости для вертикального распределения температуры воздуха. Выполнен статистический анализ полученных зависимостей. Коэффициенты детерминации 0,98 – 0,97.

Зависимость, описывающая поведение температуры по всей высоте арены для  $0 < h/h_0 < 1,4$  имеет вид  $\ln(t/t_{\text{выт}}) = a + b(h/h_0)^{0.5}$ . Коэффициенты варьируются в диапазонах  $a = [0.041 - 0.104]$ ,  $b = [-0.107 - 0.069]$ .

Анализ полученной зависимости показал, что по характеру изменения значений температуры по высоте можно выделить 3 однотипных зоны, для которых также получены безразмерные зависимости:

– на высотах  $0 < h/h_0 < 0,1$ :  $\ln(t/t_{\text{выт}}) = a + b \ln(h/h_0)$ , диапазонах изменения коэффициентов  $a = [0,286 - 0,434]$ ,  $b = [0,200 - 0,290]$ ;

– на высотах  $0,1 < h/h_0 < 1,0$ :  $\ln(t/t_{\text{выт}}) = a + b(h/h_0)^3$ , диапазонах изменения коэффициентов  $a = [-0,094 - -0,069]$ ,  $b = [0,028 - 0,086]$ .

Для значений  $h/h_0 > 1,0$  (верхняя зона арен) температура воздуха зависит от мощности освещения и будет индивидуальна для каждой арены.

### 9. Решение трехмерной нестационарной задачи для оценки пространственно-временного распределения параметров микроклимата в объеме помещений с массовым пребыванием людей.

Получены зависимости для оценки пространственно-временного распределения параметров микроклимата в объеме помещений с массовым пребыванием людей при решении трехмерной нестационарной задачи.

Решение нестационарной задачи трудоемко, однако, дает возможность по результатам численного расчета оценить временной характер изменения температуры, влагосодержания и углекислого газа в объеме арены при действии нестационарных нагрузок, таких как изменение количества зрителей, нагрузки от освещения, влаговыделений от заливки льда. Например, из рисунка 16 видно, что значения температуры и концентрация  $\text{CO}_2$  не успевают достигнуть за время хоккейного матч величин, рассчитанных с применением балансового метода, что позволяет снизить проектную производительность систем.

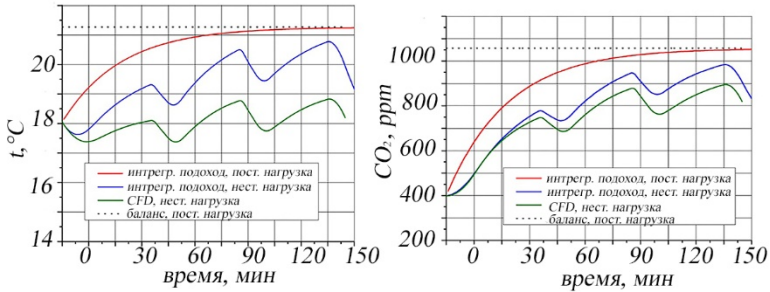


Рисунок 16 – Графики изменения параметров воздушной среды в объеме ледовой арены со временем при численном моделировании и интегральных подходах

Как результат расчета нестационарной задачи для схемы вытесняющей вентиляции, воздухообмен может быть уменьшен на 25% от величины, рассчитанной с помощью балансового метода.

### 10. Получены закономерности распределения параметров микроклимата для различных схем воздухораспределения зрительных залов, в том числе в условиях применения вытесняющей вентиляции.

На основе разработанных математических моделей выполнены расчеты температуры, скорости и углекислого газа в объеме 4-х зрительных залов. Исходные данные для расчетов приведены в таблице 10, результаты моделирования на рисунках 17, 18.

Таблица 10 – Характеристики рассчитанных зрительных залов

Наименование зала	Объем зала, м <sup>3</sup>	Объем сцены, м <sup>3</sup>	Высота зала, м	Количество зрителей	Освещение, кВт	Кратность воздухообмена, ч <sup>-1</sup>	$L_{нар}$ на 1 чел., м <sup>3</sup> /ч
Зал № 1	7321	623	10,0	600	160	6,08	39
Зал № 2	4216	3026	14,6	600	48	3,35	30
Зал № 3	22698	5373	18,0	2 350	224	4,99	60
Зал № 4	3064	435	12,4	600	18	13,43	56

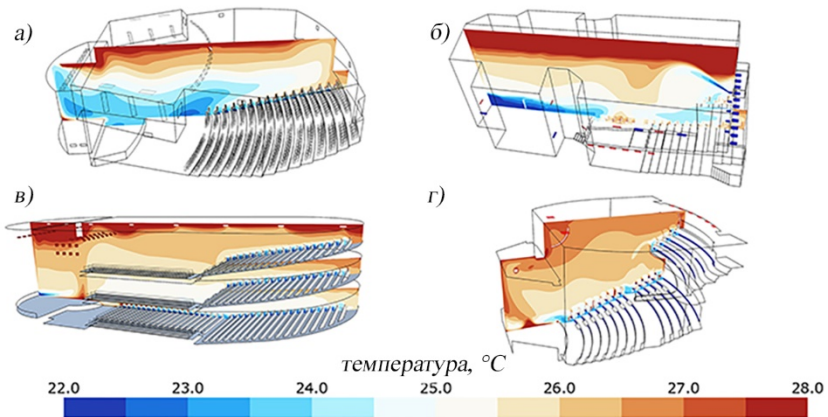


Рисунок 17 – Поле температуры в поперечном сечении театров:

а) зал №1; б) зал № 2; в) зал № 3; г) зал № 4

На рисунках 22 и 23 приведены безразмерные вертикальные распределения температуры и  $CO_2$ . Безразмерная высота определялась согласно (3).

Как видно из рисунка 22 при отношении  $h/h_0 > 1$  изменения температуры воздуха по высоте существенно отличаются для различных зрительных залов, так как в верхней зоне значения температуры будут определяться мощностью сценического освещения, которая различна для рассмотренных вариантов.

Анализ численных расчетов распределения параметров микроклимата для **четырёх** зрительных залов показал, что для изменения температуры воздуха по высоте для зоны  $0 < h/h_0 \leq 1$  также может быть использована универсальная безразмерная зависимость.

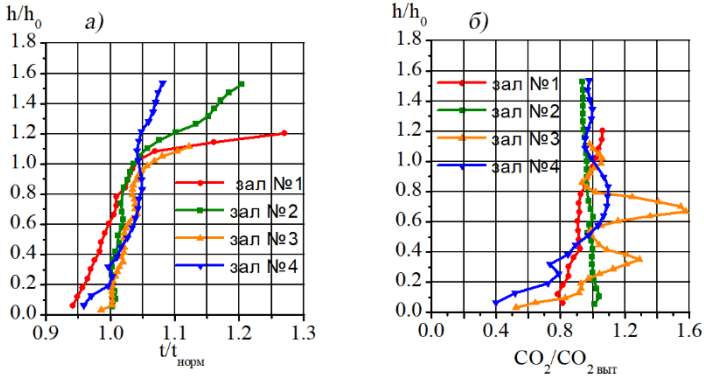


Рисунок 18 – График изменения по высоте зрительного зала:  
а) температуры; б) углекислого газа

Предложенная зависимость, описывающая изменение температуры по высоте зрительного зала в зоне  $0 < h/h_0 \leq 1$ , имеет линейный вид  $y = a + bx$ . Изменение коэффициентов для 4-х залов лежит в диапазонах  $a = [0.94-1.00]$ ,  $b = [0.03-0.10]$ , коэффициенты детерминации  $0,97 - 0,98$ .

### 11. Особенности распределения влагосодержания в объеме помещений плавательных бассейнов при различных схемах воздухораспределения.

Рассмотрены 4 схемы воздухораспределения (рисунок 19) для помещения бассейна с водной поверхностью площадью  $391 \text{ м}^2$ . Для всех рассмотренных схем суммарный расход приточного воздуха составляет  $26\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Суммарные влаговыделения с поверхности зеркала бассейна и водных дорожек составили  $198 \text{ кг}/\text{ч}$ . Влагосодержание приточного воздуха  $4,6 \text{ г}/\text{кг}$ . Сопротивление теплопередаче КФС  $R_o = 0,99 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)}$ . Температура наружного воздуха минус  $24^\circ\text{C}$ . Результаты представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Влияние схем воздухораспределения на параметры микроклимата в помещении бассейна

Контролируемые параметры	Схема № 1	Схема № 2	Схема № 3	Схема № 4
$d$ на вытяжке, г/кг	10,9	10,9	10,9	10,9
$d$ в объеме помещения, /кг	11,7	10,4	10,7	9,2
$d$ вблизи фасада	9,2	13,2	12,3	7,7
$t$ в объеме	30,0	29,7	29,9	30,1
$t$ на вытяжке, $^\circ\text{C}$	29,9	30,1	29,9	29,9
$t$ на фасаде, $^\circ\text{C}$	22,8	24,1	24,1	23,5
$\phi$ вблизи фасада, %	53%	70%	66%	44%

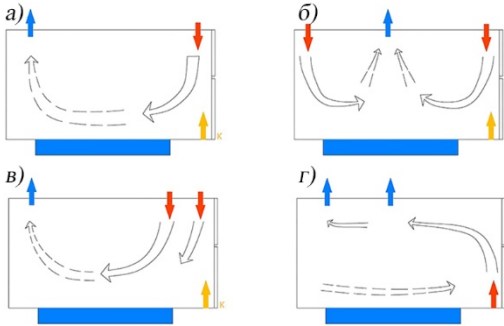


Рисунок 19 – Схема циркуляции потоков в помещении бассейна:

а) схема № 1; б) схема № 2;  
в) схема № 3; г) схема № 4

Получено, что распределение влагосодержания по объему помещения бассейна существенно зависит от схемы воздухораспределения и определяется циркуляцией воздуха в помещении, в частности значение влагосодержания вблизи фасада может быть, как больше, так и меньше, чем на вытяжных устройствах.

## 12. Разработано новое отопительно-охладительное потолочное устройство для помещений различного назначения.

Подача воздуха в помещение осуществляется через излучающее потолочное устройство. Изобретение подтверждено патентом РФ на изобретение № 2495333. Решение реализовано в аудитории СПбГАСУ.

Численные расчеты и натурный эксперимент показали, что температура воздуха на выходе из воздухораспределителей в помещении на 6 – 8 °С градусов выше температуры на выходе из кондиционера. Предложенный способ раздачи воздуха позволяет обеспечить более равномерные поля температуры и скорости воздуха в помещении. Получено, что поверхностью потолка снимается 2,6 кВт (50 Вт/м<sup>2</sup> поверхности потолка), то есть 40% от общих тепловыделений в помещении, а оставшиеся 60% компенсируются за счет воздуха, поступающего в помещение через воздухораспределительные устройства.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Общие выводы

1. Проанализированы известные в литературе методы расчета воздухообмена и воздухораспределения, отмечены недостатки традиционных методов применительно к расчету сложных течений, формируемых в условиях естественной и вынужденной конвекции при решении задач ОВиК в больших объемах с неоднородной геометрией и наличием источников тепло-, влаго- и газовыделений.

2. Выполнен анализ применимости известных моделей турбулентности для замыкания уравнений Навье-Стокса осредненных по Рейнольдсу,



показано их влияние на точность результатов расчёта распределения параметров микроклимата в турбулентных потоках.

3. Обоснована необходимость при решении задач ОВиК для объектов с тепловыделениями, особенно при наличии светопрозрачных фасадов, учитывать радиационный теплообмен. Показано, что неучёт радиационного теплообмена в математической модели приводит к существенным (10-50% в зависимости от задачи) ошибкам в определении параметров микроклимата.

4. Разработана математическая модель, учитывающая воздействие человека (в статическом и динамическом режимах) на характеристики потоков при расчете воздухораспределения, обоснованы необходимые и достаточные условия его геометрической детализации, сформулированы граничные условия, учитывающие влияние большого количества людей на формирование воздушных потоков, предложен метод оценки теплового комфорта с использованием функции комфортности PMV, предложенной О. Фангером.

5. На базе многочисленных численных исследований создана классификация условий формирования параметров микроклимата в помещениях общественных зданий, реализованная в комплексе математических моделей, который позволяет на стадии проектных решений прогнозировать характер 3D распределений параметров микроклимата и концентраций CO<sub>2</sub>, корректировать нагрузку на системы ОВиК, обеспечив рациональное использование энергоресурсов.

6. Предложен ряд упрощенных моделей, приемлемых для практических расчетов, разработаны рекомендации по их использованию для численных расчетов задач определения воздухообмена и воздухораспределения различных объектов.

7. Для классических схем вентиляционных течений при сохранении расчетных схем воздухораспределения получено совпадение результатов расчета воздухообмена с использованием классических методов и методов численного моделирования. Расхождение результатов составляет 4–6%.

8. Обоснованы применимость и достоверность результатов численных расчетов воздухообмена и воздухораспределения (с учетом радиационной составляющей) при сравнении с данными натурального эксперимента, выполненного в чаше ледовой арены г. Сочи, расхождение результатов не превышает 10%.

9. Продемонстрировано применение разработанных моделей для расчета воздухообменов и воздухораспределения общественных зданий большого объема: крытых ледовых арен, зрительных залов, бассейнов и др.

10. На основе выполненных численных расчетов 5 ледовых арен получены коэффициенты воздухообмена для ярусов трибун при различных схе-

мах подачи приточного воздуха, значения которых соответствуют диапазонам по температуре  $k_t = 1 - 3,2$ , по концентрации  $\text{CO}_2$   $k_{\text{CO}_2} = 1 - 2,1$ , по влажностному содержанию  $k_d = 1 - 2,2$ .

11. На основе выполненных численных расчетов для 4 зрительных залов получено, что коэффициенты воздухообмена  $k_t$  и  $k_{\text{CO}_2}$  зависят от конкретной схемы воздухораспределения, однако, эта зависимость существенно меньше при перемешивающей вентиляции, чем для вытесняющей.

12. По результатам расчёта для ледовых арен и зрительных залов получены универсальные зависимости в безразмерных величинах для вертикальных распределений температуры, выполнен статистический анализ полученных результатов.

13. Автором на основании численных расчетов предложен новый способ радиационного охлаждения помещения (холодный потолок), который реализован в аудитории кафедры ТГВ СПбГАСУ и получен патент.

14. Показано на примерах, что численный метод расчета параметров микроклимата общественных зданий со сложными циркуляционными течениями, которые характерны для таких объектов как театры, бассейны, ледовые арены, атриумы позволяет скорректировать проектное решение по воздухообмену и воздухораспределению, обеспечив требуемые параметры микроклимата, а также корректно определить необходимую мощность вентиляционных и холодильных установок.

15. Обосновано, что использование численных методов решения дифференциальных трехмерных уравнений Навье-Стокса для расчета и проектирования систем ОВиК следует рассматривать как дальнейшее развитие классических интегральных подходов.

16. Выполнен экономический расчет. Показано, что при внедрении в ПИР численного моделирования стоимость разработки проекта увеличивается в среднем на 1 млн. руб. Корректировка работы системы воздухораспределения составляет не менее 6 млн. руб.

17. Результаты диссертационных исследований были внедрены в практику разработки ПИР объектов, которые уже эксплуатируются, получено 12 актов внедрения. Ориентировочно экономия средств, связанная с исправлением дефектов проектирования, при эксплуатации объектов составит 50–70 млн. руб.

**Предлагаются следующие рекомендации при анализе проектных решений численными методами.**

На основе проведенных исследований для решения задач определения воздухообменов и особенностей воздухораспределения объектов с массовым пребыванием людей методом численного моделирования предложен комплекс математических моделей и сформулированы следующие рекомендации:

1) объекты, для которых рекомендуется методами математического моделирования выполнять корректировку значений воздухообмена и анализ особенностей воздухораспределения параметров воздушной среды, полученных при расчете с применением традиционных методов проектирования, являются:

- а) помещения с массовым пребыванием людей;
- б) крытые ледовые арены;
- в) плавательные бассейны и аквапарки;
- г) помещения с большой площадью светопрозрачных фасадных конструкций;
- д) многосветные помещения, в том числе атриумы;
- е) помещения, в которых несколько функциональных зон объединены одним объемом;
- ж) помещения, в которых предусмотрена вытесняющая схема вентиляции.

2) в качестве первого приближения при задании граничных условий целесообразно использовать результаты расчетов, полученные с применением традиционных методов (схемы вентиляции, воздухообмен, условия воздухораспределения и др.);

3) необходимо включать уравнение радиационного теплообмена в решаемую систему дифференциальных уравнений (1) в следующих случаях:

- а) наличие систем радиационного охлаждения и/или отопления;
- б) наличие ледовой поверхности;
- в) помещения со светопрозрачными фасадными конструкциями.

4) не допускается исключать из рассмотрения радиационную составляющую явных тепловыделений от человека, а также задавать теплопритоки, равные сумме радиационного и конвективного потока, только в виде конвективной составляющей;

5) для помещений, не относящихся к п.3, допускается не решать уравнения радиационного теплообмена, а тепловыделения в размере радиационной части теплопоступлений от человека, источников освещения задавать в виде равномерного объемного источника в помещении;

6) при численном моделировании параметров микроклимата, формируемых вытесняющей системой вентиляции, не допускается задание равномерных тепловыделений от людей в обслуживаемой зоне, вместо локального расположения людей и задания теплового потока с их поверхности, даже в случае помещений с массовым пребыванием людей;

7) для помещений со светопрозрачными фасадными конструкциями при расчете радиационного теплообмена необходимо использование широкополосной модели излучения с заданием соответствующих селективных свойств остекления;

8) если в помещении, для которого разрабатывается проектное решение, нет светопрозрачных фасадных конструкций, то для сокращения вычислительных затрат при расчете радиационного теплообмена допускается использовать приближение серого тела;

9) не допускается автоматически исключать из рассмотрения сточно-ригельную систему, описывая в математической модели светопрозрачную конструкцию со стороны помещения гладкой поверхностью. Такое упрощение может привести к существенному искажению параметров воздушной среды вблизи фасада и температуры на поверхности;

10) при численном моделировании помещений с большим числом воздухораспределительных устройств следует:

а) разработать подробную 3D математическую модель используемого в проекте воздухораспределительного устройства. Выполнить численные расчеты с заданием расходов воздуха, соответствующих проектным значениям;

б) выполнить серию тестовых расчетов с целью замены подробной модели воздухораспределителя упрощенной, обеспечивающей аналогичный темп затухания скоростей, форму результирующей струи;

в) на основе сравнения с расчетом на подробной модели, проверить разработанную упрощенную модель на адекватность описания неизотермичного течения при избыточной температуре, характерной для рассматриваемого проектного решения. При необходимости скорректировать разработанную упрощенную модель.

11) при анализе проектных решений, включающих использование внутрительных конвекторов, разрабатывать упрощенную математическую модель на основе данных производителя о конструкции, величине тепло-, холодопроизводительности;

12) при анализе проектных решений, включающих использование систем напольного, потолочного охлаждения не допускается фиксировать температуру или тепловой поток на их поверхности. Фактическая холодопроизводительность таких систем будет зависеть от конкретных условий в помещении, температуры окружающих поверхностей, подвижности воздуха, наличия прямого солнечного излучения;

13) использование значений индекса комфортности Фангера, рассчитанного по средним по обслуживаемой зоне параметрам воздушной среды, малоинформативно. Для анализа теплового комфорта следует на основе локальных значений параметров воздушной среды и радиационной температуры вычислять распределение индекса комфортности по объему обслуживаемой зоны;

14) рекомендуется при использовании внутренних солнцезащитных устройств (шторы, жалюзи) напрямую их учитывать в математической модели;

15) рекомендуется избегать постановки граничных условий первого рода по температуре. В противном случае следует использовать низкорейнольдсовы версии  $k-\omega$  или  $SST$  полуэмпирических моделей турбулентности с соответствующим разрешением сеточной структуры у твердых поверхностей ( $y^+ < 1$ );

16) если граничные условия по температуре задаются как условия 2 или 3 рода рекомендуется использование полуэмпирических моделей турбулентности семейства  $k-\epsilon$  для расчета параметров микроклимата в помещении.

#### **Перспективы дальнейших исследований:**

– расширение разработанных научных основ решения численными методами задач вентиляции и кондиционирования на производственные помещения;

– создание базы данных численных моделей основных типов воздухо-распределителей (вихревых, конических, щелевых диффузоров, сопел, решеток), конвекторов (в т.ч. с подводом наружного воздуха) с разработкой упрощенных моделей для каждого из них;

– накопление данных о распределении параметров микроклимата и углекислого газа для различных помещений общественных зданий, их анализ и разработка рекомендаций по проектированию систем ОВиК для помещений большого объема, в том числе в условиях существенной инсоляции.

#### **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:**

##### **Публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Анисимов, С. М. Решение задачи турбулентного переноса импульса, тепла, примеси в объеме "чаши" Ледовой Арены / С. М. Анисимов, Д. М. Денисихина, В. И. Полушкин // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 5(34). – С. 149–155.

2. Денисихина, Д. М. Численное исследование нового способа кондиционирования помещений / Д. М. Денисихина // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – С. 15.

3. Денисихина, Д. М. Особенности численного моделирования поведения воздушных потоков в объемах концертных и театральных залов / Д. М. Денисихина // Интернет-журнал Науковедение. – 2014. – № 3(22). – С. 98.

4. Денисихина, Д. М. Численное моделирование неизотермических турбулентных течений в помещениях плавательных бассейнов / Д. М. Денисихина // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – № 3(44). – С. 189–194.

5. Денисихина, Д. М. Конвективно-радиационный теплообмен человека в задачах математического моделирования распределенных параметров микроклимата в помещениях / Д. М. Денисихина // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2014. – № 38(57). – С. 143–150.

6. Денисихина, Д. М. Исследование различных схем воздухораспределения ледовых арен / Д. М. Денисихина // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2015. – № 5(677). – С. 38–48.

7. Денисихина, Д. М. Оценка теплового комфорта в помещениях на основе анализа результатов математического моделирования / Д. М. Денисихина // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 3(50). – С. 183–193.

8. Денисихина, Д. М. Модель человека в задачах расчета распределенных параметров микроклимата в помещении / Д. М. Денисихина // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 2(32). – С. 192–199.

9. Денисихина, Д. М. Непостоянство кинематического коэффициента при истечении из современных воздухораспределительных устройств / Д. М. Денисихина, К. В. Кочарьянц // Научное обозрение. – 2017. – № 10. – С. 40–47.

10. Денисихина, Д. М. Численное моделирование истечения из современных воздухораспределительных устройств / Д. М. Денисихина, Ю. В. Иванова, В. В. Мокров // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 2(49). – С. 200.

11. Денисихина, Д. М. Изменение параметров микроклимата в течение хоккейного матча в зале крытой ледовой арены / Д. М. Денисихина, С. В. Рузаков // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2019. – № 6. – С. 26–37.

12. Денисихина, Д. М. Численное исследование закономерностей распределения CO<sub>2</sub> в общественных зданиях / Д. М. Денисихина // Инновации и инвестиции. – 2023. – № 5. – С. 368–372.

13. Денисихина, Д. М. Расчет коэффициента воздухообмена методами математического моделирования параметров микроклимата / Д. М. Денисихина // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2023. – № 4(66). – С. 337–345.

14. Денисихина, Д. М. Расчет воздухообмена и воздухораспределения в объеме зрительных залов театров / Д. М. Денисихина, В. К. Аверьянов,

А. В. Цыганков // Промышленное и гражданское строительство. – 2024. – № 3. – С. 23–28.

15. Денисихина, Д. М. Разработка математических моделей для численного моделирования приточной струи из низкоскоростных воздухораспределителей / Д. М. Денисихина, К. А. Копылов, К. В. Кочарьянц // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 9. – С. 515–518.

16. Денисихина, Д. М. Численное исследование работы системы напольного водяного охлаждения / Д. М. Денисихина // Вестник евразийской науки. – 2024. – Т. 16, № 3. – С. 52.

#### **Патенты**

17. Патент № 2495333 С2 Российская Федерация, МПК F24F 7/02. Отопительно-охлаждающее потолочное устройство : № 2011152436/12 : заявл. 21.12.2011 : опубл. 10.10.2013 / В. С. Бурцева, Д. М. Денисихина, Д. В. Королев; заявитель Закрытое Акционерное Общество "БЮРО ТЕХНИКИ".

#### **Монографии:**

18. Гримитлин, А. М. Математическое моделирование в проектировании систем вентиляции и кондиционирования: монография / А. М. Гримитлин, Т. А. Дацюк, Д. М. Денисихина. – Санкт-Петербург: Изд-во «АВОК Северо-Запад», 2013. – 190 с.

#### **Публикации в других изданиях:**

19. Денисихина Д.М. Численное исследование процесса вентиляции частично открытой прямоугольной полости воздушной струей // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Труды XV Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева, Калуга, 23–27 мая 2005 года. – Калуга, 2005. – С. 59–62.

20. Денисихина Д. М. Эффективные воздухораспределители и методы исследований / Д. М. Денисихина, С. И. Бурцев // Вентиляция, отопление, тепло-, газо-, водоснабжение жилых, промышленных и общественных зданий – пути повышения эффективности, экологической безопасности и энергосбережения: сборник статей. – Санкт-Петербург: АВОК Северо-Запад, 2005. – С. 6–8.

21. Денисихина Д.М. Ячейка со встречно направленными потоками, как элемент новых эффективных воздухораспределителей / Д. М. Денисихина, М. Л. Соколенко // Повышение эффективности работы систем тепло-, газо-, водоснабжения, отопления и вентиляции: Сборник материалов международного форума молодых специалистов. – Москва, 2005. – С. 47–49.

22. Бурцев С. И. Математическое моделирование процессов турбулентного переноса в профессиональной практике техники вентиляции и кондиционирования воздуха / С. И. Бурцев, Д. М. Денисихина. – АВОК:

Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2006. – №5. – С. 40–49.

23. Баль С.В. Опыт применения пакета STAR-CD к задаче вентиляции офисов Бизнес-Центра / С. В. Баль, Д. М. Денисихина, О. С. Хрустова // Инженерные системы. АВОК – Северо-Запад. – 2006. - №2(22). – С. 32.

24. Д.М. Денисихина. Математическое моделирование турбулентных течений в проекте реконструкции Национального академического Большого театра оперы и балета Республики Беларусь / Д. М. Денисихина, А. В. Худов. – Инженерные системы. АВОК – Северо-Запад. – 2007. – № 2(28). – С. 32-38.

25. Эффективное распределение воздуха с помощью “генератора комфорта” / Л. Я. Баландина, С. И. Бурцев, Д. М. Денисихина и др. – Инженерные системы. АВОК – Северо-Запад. – 2007. - №4(31). – С. 68–71.

26. Денисихина Д. М. Численное моделирование вытесняющей вентиляции // Качество воздушной среды : V Международная конференция «Воздух 2007» : материалы конференции, Санкт-Петербург, 05–07 июня 2007 года. – Санкт-Петербург: Инфо-да, 2007. – С. 214–216.

27. Гримитлин, А. М. Математическое моделирование течения в объеме чаши стадиона для холодного периода года / А. М. Гримитлин, Д. М. Денисихина, А. В. Зузо // Актуальные проблемы современного строительства : сборник научных трудов. Ч. 3. – СПб. : [б. и.], 2008. – С. 70–74.

28. Математическое моделирование в технике вентиляции и кондиционирования воздуха / Денисихина Д. М., Бурцев С. И., Полушкин В. И. // Вестник МАНЭБ. – 2008. – Том13, №1. – С. 38–46.

29. Д. М. Денисихина. Численное решение задач вентиляции пористых сред с источником теплоты / В. Р. Таурит, Д. М. Денисихина // Доклады 66-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета. В 5 ч. Ч II. / Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2009. – С. 124–126.

30. Денисихина, Д. М. Повышение качества воздушной среды Использование методов математического моделирования / Д. М. Денисихина, М. В. Самолетов // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2010. – № 6. – С. 68–73.

31. Денисихина Д. М. Методология построения математических моделей для задач вентиляции и кондиционирования воздуха / Д. М. Денисихина // Качество воздушной среды - потребление, здоровье, экономика : VI Международная конференция "Воздух-2010", 9-11 июня 2010 года : материалы конференции / ред. Битколов Н. З. и др. – Санкт-Петербург: [б. и.], 2010. – 220 с.

32. Математическое и физическое моделирование подачи воздуха в чистую зону / А. М. Гримитлин, Р. Б. Знаменский, Д. М. Денисихина



и др. // Качество воздушной среды – потребление, здоровье, экономика : VI Международная конференция "Воздух-2010", 9–11 июня 2010 года : материалы конференции / ред. Битколов Н. З. и др. – Санкт-Петербург: [б. и.], 2010. – 220 с.

33. Justification of air change reduction using numerical simulation methods / Denisikhina D., Lukanina M., Samoletov M., Zuzo A, and others // Roomvent : proceeding of The 12th International Conference on Air Distribution in Rooms. – 2011. – p. 103.

34. Денисихина, Д. М. Математическое моделирование микроклимата в помещениях серверных / Д. М. Денисихина, М. В. Самолетов // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2011. – № 8. – С. 78–85.

35. Денисихина, Д. М. Математическое моделирование микроклимата в помещениях бассейна / Д. М. Денисихина, М. А. Луканина, М. В. Самолетов // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2012. – № 6. – С. 56–61.

36. Денисихина, Д. М. Анализ проектного решения систем вентиляции и кондиционирования воздуха ледовой арены г. Сочи методами математического моделирования // Инженерно-экологические системы: материалы международной научно-практической конференции 10–12 октября 2012 г. / Под общ. ред. Т. А. Дацюк. – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2012. – С. 107–111.

37. Денисихина Д. М. Численные исследования воздухораспределения тесненными струями / Д. М. Денисихина, К. В. Кочарьянц // Актуальные проблемы строительства: материалы 69-й Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов «Актуальные проблемы современного строительства» 6–8 апреля 2016 года: в 3 ч. Ч. 3 / М-во образования и науки Рос. Федерации, С.-Петербург. гос. архитектур.-строит. ун-т. - СПб.: [б. и.], 2016. – С. 181–188.

38. Datciuk, T. A. Predicting air quality in underground structures / T. A. Datciuk, D. M. Denisikhina, E. A. Anshukova // Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations : Proceedings of the International Conference on Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations, GFAC 2019. – Saint Petersburg: Taylor & Francis Group, 2019. – P. 54–58. (0,5 п.л., авторский вклад 30%)

39. Datciuk, T. A. Results of studying chilled ceiling unit operation / T. A. Datciuk, D. M. Denisikhina // Proceedings of the 12th International Conference on Contemporary Problems of Architecture and Construction, ICCPAC 2020. – Saint Petersburg, 2021. – P. 335–338. (0,4 п.л., авторский вклад 50%)

Компьютерная верстка *В. С. Весниной*

Подписано к печати 07.03.2025. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 150 экз. Заказ 27.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.  
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А