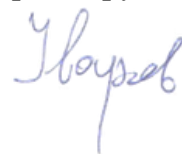


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Уваров Валерий Александрович

**СОЗДАНИЕ И ПОДДЕРЖАНИЕ МИКРОКЛИМАТА
В ПРАВОСЛАВНЫХ ХРАМАХ РЕГУЛИРУЕМЫМ
ВОЗДУХООБМЕНОМ**

2.1.3 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха,
газоснабжение и освещение

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., профессор,
член-корреспондент РААСН
Кочев Алексей Геннадьевич

Нижний Новгород – 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. АНАЛИЗ РАБОТ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ АВТОРОВ В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ И ПОДДЕРЖАНИЯ МИКРОКЛИМАТА ПРАВОСЛАВНЫХ ХРАМОВ РЕГУЛИРУЕМЫМ ВОЗДУХООБМЕНОМ	10
1.1. Обзор работ по созданию и поддержанию микроклимата в зданиях и сооружениях.....	10
1.2. Теоретические основы вычислительной гидродинамике в задачах создания и поддержания микроклимата	21
1.3. Анализ нормативной документации по созданию и поддержанию микроклимата в православных храмах	29
1.4. Анализ отечественных и зарубежных работ по созданию и поддержанию требуемых параметров микроклимата в православных храмах.....	34
1.5. Выводы по первой главе	46
2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА В ПРАВОСЛАВНОМ ХРАМЕ	48
2.1. Общая постановка задачи	48
2.2. Разностная схема для системы двумерных уравнений.....	54
2.3. Устойчивость разностной схемы	60
2.4. Особенности программной реализации	62
2.5. Численное исследование течения при конвекции газа в православных храмах.....	64
2.6. Расчет течения и теплообмена в слое газа. Влияние дискретизации на точность расчета.....	68
2.7. Выводы по второй главе	77
3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУШНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПРАВОСЛАВНЫХ ХРАМАХ	79
3.1. Численное моделирование в комплексе ANSYS Fluent	79

3.2. Поиск оптимальных углов открытия приточных и вытяжных фрамуг методом градиентного спуска.....	84
3.3. Компьютерная модель воздухообмена внутри церкви во имя святого благоверного князя Александра Невского	87
3.3.1. Разработка компьютерной модели.....	87
3.3.2. Поиск оптимальных углов открытия фрамуг	91
3.4. Компьютерная модель воздухообмена внутри собора Рождества Пресвятой Богородицы.....	94
3.4.1. Разработка компьютерной модели.....	94
3.4.2. Поиск оптимальных углов открытия фрамуг	97
3.5. Компьютерная модель воздухообмена внутри кафедрального собора святого благоверного князя Александра Невского	101
3.5.1. Разработка компьютерной модели.....	101
3.5.2. Поиск оптимальных углов открытия фрамуг	104
3.6. Выводы по третьей главе	107
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЗДУШНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПРАВОСЛАВНЫХ ХРАМАХ	109
4.1. Описание методики экспериментальных исследований и методов измерения	109
4.2. Планирование эксперимента	112
4.3. Анализ воспроизводимости экспериментальных исследований	113
4.4. Обработка экспериментальных данных и получение регрессионных зависимостей.....	117
4.5. Технико-экономическое обоснование	127
4.6. Выводы по четвертой главе	130
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	133
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	136
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	160
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	161
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	163

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность избранной темы. В России в последние годы одной из наиболее важных и значимых тенденций является национальная идентификация общества, заключающаяся в формировании чувства принадлежности и укреплении национальной самобытности граждан.

Ключевую роль в формировании данных идей занимают символы и памятники национальной культуры и истории, напоминающие о великих событиях и личностях, определяющих историю нации. Одним из таких символов, декларирующим значимость духовности для нашего общества, являются православные храмы. На сегодняшний день сохранность их в первоначальном состоянии является важной составной частью общей государственной и общественной политики в области культуры.

Данная задача является довольно обширной и включает в себя как антропогенные, так и природные факторы, но особое внимание необходимо уделить вопросу создания и поддержания необходимых параметров микроклимата, являющимся уникальными для каждого отдельного храма. Такая система должна быть оптимальна как с точки зрения создания условий для сохранения целостности и предотвращения разрушения или деградации внутреннего убранства, так и с точки зрения комфортных условия пребывания для посетителей и клира [146]. Осложняется решение данной задачи тем, что предлагаемая система должна быть интегрирована в помещение храма, не нарушая эстетику и архитектурную целостность.

Добиться требуемых параметров микроклимата, с учетом всех ограничений, возможно с помощью регулирования системы аэрации. Для этого необходимо отойти от инженерных расчетов, построенных на усреднённых эмпирических величинах, полученных для установившихся режимов и перейти к моделированию нестационарных и неоднородных в пространстве процессов, позволяющих учесть большое количество локальных параметров микроклимата [147].

Степень разработанности темы исследования. Многие работы базируются на принципах гидро-газодинамики и тепло-массообмена, представленные в работах таких авторов, как Л. М. Биберман, В. Н. Богословский, Б. Гебхарт, Й. Джалурии, А. А. Дородницын, Я. Б. Зельдович, А. В. Лыков, Р. Махаджан, О. Г. Мартыненко, Г. Л. Поляк, Б. Саммакий, Ю. А. Суринова, Н. А. Умов, Л. Л. Васильев, М. Ф. Широкови др.

Также стоит отметить и зарубежных исследователей, таких как V. Ciocan, J. E. Fromm, F. H. Harlow, E. I. Kurkin, J. W. Kurzrock, P. D. Lax, R. E. Mates, R. D. Richtmyer, A. A. Szewczyk, D. C. Thoman, E. F. Turcanu, M. Verdes, B. Wendroff и др.

Разработкой множеств решений, по теме моделирования микроклимата внутри помещений занимались Р. Г. Аржаников, К. В. Беляев, О. Ф. Гавей, Т. А. Дацюк, В. М. Уляшева, О. Н. Зайцев, К. И. Логачев, О. А. Аверкова, А. М. Зиганшин, Д. А. Никулин, Л. Г. Старкова, М. Х. Стрелец, И. И. Суханова и др.

Ряд положений нашли отражение в нормативной документации.

Цель исследования разработка методов создания и поддержания микроклимата в православных храмах регулируемым воздухообменом.

Для достижения поставленной цели следует решить следующие основные **задачи исследования:**

1. Проанализировать исследования, посвящённые вопросам создания и поддержания микроклимата в зданиях и помещениях, а также провести обзор литературы по теоретическим и численным методам моделирования процессов тепло- и массообмена.

2. Разработать математическую модель и её программно-алгоритмическую реализацию для расчета течений и теплообмена при конвекции идеального сжимаемого вязкого и теплопроводного газа внутри православного храма.

3. Разработать компьютерные модели течения и теплообмена воздуха внутри православных храмов различных архитектурных стилей с использованием программного комплекса вычислительной гидро-газодинамики – ANSYS Fluent.

Верифицировать полученные результаты путём сравнения с экспериментальными данными.

4. Провести экспериментальные исследования скорости и температуры воздуха в храмах с целью верификации разработанных моделей течения и теплообмена.

5. На основе экспериментальных данных определить закономерности изменения распределения скорости и температуры воздуха в храме в зависимости от изменения наружной температуры воздуха и положения по высоте и горизонтальной протяженности.

6. Предложить и обосновать метод поиска оптимальных углов открытия вытяжных и приточных фрамуг, направленный на обеспечение требуемых режимов работы системы регулируемого воздухообмена православных храмов, с учетом их архитектурных особенностей.

Объект исследования – микроклимат православных храмов.

Предмет исследования – регулируемый воздухообмен, обеспечивающий рекомендуемые параметры микроклимата в православных храмах.

Научная новизна исследования заключается в достижении следующих результатов.

1. В рамках модели идеального сжимаемого вязкого теплопроводного газа разработана математическая модель течения и теплообмена при конвекции в замкнутой области православного храма с заданным тепловым режимом границы, её программно-алгоритмическая реализация.

2. Предложены достоверные компьютерные модели течения и теплообмена с использованием программного комплекса вычислительной гидрогазодинамики – *ANSYS Fluent*.

3. На основе разработанного вычислительного алгоритма и компьютерной модели, построенной с использованием *ANSYS Fluent*, предложен метод поиска оптимальных углов открытия вытяжных и приточных фрамуг, направленный на обеспечение требуемых режимов работы системы воздухообмена храмов.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии методов математического моделирования течения и теплообмена внутри православных храмов.

Практическая значимость диссертационного исследования в разработанных методах направленных, на обеспечение требуемых режимов работы систем вентиляции и отопления для воздухообмена в православных храмах. Предложена к применению математическая модель позволяющая моделировать течение и теплообмен воздуха при конвекции в замкнутой области храма с заданным тепловым режимом границ и её программно-алгоритмическая реализация.

Методология и методы исследования. Методологической основой диссертационного исследования являются численные методы решения дифференциальных уравнений; методы математической статистики; оптимизации; анализа и обработки экспериментальных данных; визуализации движения потоков и теплообмен в них. Используются программные комплексы вычислительной гидро-газодинамики и разработанные программы для ЭВМ.

Положения, выносимые на защиту.

1. Математическая модель движения и теплообмена сжимаемого вязкого теплопроводного газа, находящегося в замкнутой области православного храма с заданным тепловым режимом границы, её программно-алгоритмическая реализация.
2. Достоверные компьютерные модели течения и теплообмена в рамках модели сжимаемого вязкого теплопроводного газа в программном комплексе вычислительной гидро-газодинамики – *ANSYS Fluent*.
3. Закономерности изменения распределения скорости и температуры воздуха в православных храмах в зависимости от изменения наружной температуры и положения по высоте и горизонтальной протяженности.
4. Результаты теоретических и экспериментальных аэродинамических и теплотехнических исследований, полученных для трех храмов Нижегородской области с различными архитектурными стилями и вариациями форм: храм в честь

святого благоверного великого князя Александра Невского (д. Березовка), собор Рождества Пресвятой Богородицы (с. Катунки), кафедральный собор святого благоверного князя Александра Невского (г. Нижний Новгород).

5. Разработка метода поиска оптимальных углов открытия вытяжных и приточных фрамуг обеспечивающих создание требуемых режимов работы системы воздухообмена православных храмов, с учетом их архитектурных особенностей.

Степень достоверности результатов обоснована использованием современных методов вычислительной гидро-газодинамики и математики. Представленные результаты подтверждаются согласованностью вычислительных и экспериментальных исследований автора и не противоречат известным данным.

Работа выполнена на основании исследований, проведенных автором в Нижегородском государственном архитектурно-строительном университете, а также в храмах Нижегородской области.

Апробация работы. Доклады по диссертации обсуждались в рамках следующих конференций: Научно-практическая конференция XIII Всероссийского фестиваля науки, г. Нижний Новгород, 2023 г.; VI Международная научно-практическая конференция Методология безопасности среды жизнедеятельности, г. Симферополь,, 2023 г.; XXI Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика РААСН В. Н. Богословского, г. Москва, 2023 г.; 75 Международная научная конференция Социотехническое строительство, г. Казань, 2024 г.; Международная научно-техническая конференция «Проблемы современной теплоэнергетики» посвященная 50-летию специальности «Промышленная теплоэнергетика» в ЛГТУ, г. Липецк, 2024г.

Результаты работы использованы при разработке комплекса мер и средств по обеспечению параметров микроклимата регулируемым воздухообменом в Соборе Всемилоственного Спаса и Происхождения Честных древ Животворящего Креста Господня по ул. Ярморочный проезд, Нижний Новгород и в Соборной церкви в честь Живоначальной Троицы по ул. Овражная, Нижний Новгород.

Внедрение. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (Приложение А диссертации). По результатам разработки комплекса мер и средств по обеспечению параметров микроклимата регулируемым воздухообменом в двух Нижегородских храмах, получены акты о внедрении результатов научно-исследовательской (опытно-конструкторской) работы (приложение Б, В диссертации).

Личный вклад автора состоит в формировании целей и задач диссертационного исследования, проведении литературного обзора, выборе объектов и методов исследований, разработке теоретических положений работы, проведении численных и натурных экспериментов, обработке экспериментальных данных, анализе и обобщении полученных результатов, подготовке и публикации материалов работы.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 7 научных работ, из которых 4 статьи опубликованы в научных журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень рецензируемых научных изданий).

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 2.1.3 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение: п.1 «Климатологическое обеспечение зданий. Тепломассообмен и гидроаэромеханика систем теплогазоснабжения и вентиляции, тепло и холодогенерирующего оборудования, ограждающих конструкций. Исследования теплового, воздушного, влажностного режимов помещений, зданий и сооружений»; п.4. «Разработка математических моделей, методов, алгоритмов и компьютерных программ, использование численных методов, с проверкой их адекватности, для расчета, конструирования и проектирования систем теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения и освещения, охраны воздушного бассейна, защиты от шума зданий и сооружений, повышения их надежности и эффективности».

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 253 наименований, изложена на 164 страницах основного текста, содержит 42 рисунка, 18 таблиц.

1. АНАЛИЗ РАБОТ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ АВТОРОВ В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ И ПОДДЕРЖАНИЯ МИКРОКЛИМАТА ПРАВОСЛАВНЫХ ХРАМОВ РЕГУЛИРУЕМЫМ ВОЗДУХООБМЕНОМ

1.1. Обзор работ по созданию и поддержанию микроклимата в зданиях и сооружениях

На протяжении всей истории нашей страны обеспечение и поддержание необходимых условий внутри помещений являлось критическим фактором выживания в экстремальных климатических условиях.

В связи с отсутствием альтернативных технологий на протяжении многих веков единственным и наиболее эффективным способом обогрева жилищ оставались дровяные печи, которые играли ключевую роль в поддержании минимально необходимых температур для проживания.

На начальных этапах печное отопление в России развивалось эмпирическим путём – основываясь на многовековом опыте и практических знаниях. Однако с развитием теории теплообмена в Европе, в нашей стране также начали формироваться научные школы, посвящённые изучению процессов передачи тепла и энергии.

Истоки отечественной теории теплообмена связаны с трудом М. В. Ломоносова под названием «Размышления о причине теплоты и холода» [165]. В этой работе ученый подверг критике популярную в то время теорию теплорода, подкрепляя свои доводы экспериментальными данными. В дальнейшем данные идеи были развиты академиками Г. В. Рихманом, В. В. Петровым и Я. Д. Захаровым [198] в рамках работ которых было положено начало основным методам в области калориметрии.

Одним из первых практических воплощений идей теории теплообмена в области отопления и вентиляции стали работы Н. А. Львова [169]. В своих исследованиях Николай Александрович изучал основы проектирования печей и систем печного отопления. Он предложил эффективные методы повышения

теплоотдачи каминов и печей, включая установку металлических труб для циркуляции и подогрева воздуха, поступающего снаружи. Он также разработал рекомендации по геометрии топливника, указывая на необходимость разворота боковых стенок и использования решетки (колосника) для сжигания топлива.

Существенный вклад в аналитическую теорию теплопроводности внес М. В. Остроградский. В своих исследованиях [180] он усовершенствовал метод разделения переменных, предложенный Фурье для решения однородных задач нестационарной теплопроводности. Кроме того, Остроградский вывел формулу, преобразующую тройной объемный интеграл в двойной интеграл по поверхности, что впоследствии стало основой для разработки теории теплопроводности в движущихся жидкостях. При этом ученый опирался на гипотезу о плотности теплового потока:

$$\bar{q} = -\lambda \text{grad}(T) + h\bar{w} \quad (1.1)$$

где q – вектор теплового потока, λ – коэффициент теплопроводности, h – коэффициент теплопередачи, $\bar{w}$ – вектор скорости движения жидкости.

В результате чего было получено дифференциальное уравнение энергии:

$$\frac{dT}{d\tau} = a\nabla^2 T + \frac{q_v}{c_p \rho} \quad (1.2)$$

где $\frac{dT}{d\tau}$ – температурное изменение по времени, a – температуропроводность, $\nabla^2 T$ – оператор Лапласа от температуры, описывающий диффузию тепла, q_v – удельная плотность внутренних источников тепла, ρ – плотность вещества, c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении.

В это же время в России начинается интенсивное развитие отечественной промышленности и, в частности, массовое строительство парового военного флота России, вследствие чего возникает необходимость в создании теории паровых котлов и теории теплообмена.

Выдающийся вклад в теорию паровых котлов внесли профессора И. П. Алымов, И. А. Вышнеградский, Н. П. Петров, А. П. Гавриленко, К. В. Кирша, В. И. Гриневицкий, А. И. Предтеченский, А. Погодин [66, 90, 184, 196, 93, 133]. Стоит отметить высокую прикладную значимость исследований В. И. Гриневицкого [105] с точки зрения вопросов создания микроклимата помещений, так как в них впервые описана зависимость коэффициентов теплоотдачи конвекцией и излучением от скорости газа и компоновки теплообменников.

Идеям конвективного теплообмена так же посвящены исследования профессора Н. А. Умова [238] в которых автор, развивая идеи М. В. Остроградского, записал уравнение энергии в самом общем виде:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \operatorname{div}(\bar{\sigma}) = 0 \quad (1.3)$$

где $\bar{\sigma} = T_{ik} \bar{v}$ – вектор потока энергии.

Еще один важный этап в развитии теории теплообмена в России связан с академиком М. В. Кирпичевым исследования которого посвящены созданию теории моделирования тепловых процессов привели к созданию научной школы отечественных теплофизиков, получившей международное признание [132].

Говоря о конвективном теплообмене, нельзя не отметить немецкого физика Людвига Прандтля, разработавшего теорию пограничного слоя и полуэмпирическую теорию пристенной турбулентности с известным логарифмическим распределением скоростей [195]. Эта теория позволяет упростить уравнение Навье-Стокса, представленное в векторной форме (1.4), до уравнений, в которых давление остается постоянным в направлении, перпендикулярном обтекаемой поверхности. При этом изменение давления вдоль поверхности определяется движением идеальной жидкости вне границ пограничного слоя:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f} \quad (1.4)$$

где v – скорость потока, ρ – плотность, p – давление, μ – динамическая вязкость, f – вектор внешних сил, $\nabla^2 v$ – оператор Лапласа от скорости, отвечающий за диффузию импульса.

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (1.5)$$

где u и v – компоненты скорости потока вдоль осей x и y , $\frac{\partial p}{\partial x}$ – изменение давления вдоль поверхности, ν – кинематическая вязкость, $\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$ – изменение скорости по нормали к поверхности.

Позднее в работах И. И. Никурадзе было получено экспериментальное подтверждение данной теории [179].

В то же время, развивая данные идеи, Г. Н. Кружилиным было получено интегрального уравнения энергии [153], которое лежит в основе всех современных интегральных методов расчета теплового пограничного слоя. На данном уравнении базируется большинство инженерных методов расчета конвективного теплообмена.

$$\frac{d}{dx} \int_0^\delta \left(1 - \frac{v}{v_0}\right) \frac{w_x}{w_0} dy = \frac{a}{w_x v_0} \frac{dv}{dy} \Big|_{y=0} \quad (1.6)$$

где δ – толщина пограничного слоя, x и y – координаты вдоль и перпендикулярно поверхности, v – продольная компонента скорости, v_0 – скорость потока на краю пограничного слоя, w_x – скорость продольного теплового потока, a – коэффициент теплопроводности или кинематической вязкости, $\frac{\partial v}{\partial y}$ – градиент скорости вдоль координаты y , который описывает изменение скорости внутри пограничного слоя, $\frac{\partial v_0}{\partial x}$ – градиент скорости на границе поперечного слоя, где $y = 0$.

Однако связь между теплообменом и трением, вытекающая из аналогии Рейнольдса, выявила ряд проблем при описании течения газа в каналах. Впервые, невозможность восстановить полное давление потока газа в условиях конвективного теплообмена, было продемонстрировано в исследованиях профессора А. А. Гухмана [107, 108], что стало важным аспектом для дальнейшего развития прикладных методов.

Позднее М. Ф. Широков [249] впервые показал, что известную аналогию Рейнольдса можно распространить и на течение сжимаемого газа, если коэффициент теплоотдачи определять по разности между равновесной температурой теплоизолированной стенки и температурой стенки

Также стоит отметить прикладную важность переменных, полученных А. А. Дороднициным [117], позволяющих преобразовать уравнение ламинарного пограничного слоя сжимаемого газа к классическим уравнениям несжимаемой жидкости, а также работы Я. Б. Зельдовича по обобщению опытных данных по теплообмену при естественной конвекции [125, 248]. Отдельно следует отметить прикладную значимость работы Я. Б. Зельдовича по свободным конвективным восходящим потокам [126], в которых были сформулированы предельные законы, описывающие их поведение, что особенно важно для расчётов теплообмена и моделирования естественной конвекции при создании и поддержании микроклимата в помещениях.

Одна из основных идей современных дифференциальных методов расчёта турбулентного пограничного слоя была разработана А. Н. Колмогоровым [137]. Его основная идея заключалась в том, что турбулентность можно рассматривать как каскад энергетических вихрей разного масштаба, где энергия передаётся от крупных вихрей к более мелким вплоть до диссипации.

$$E(k) = C\varepsilon^{2/3}k^{-5/3} \quad (1.7)$$

где $E(k)$ спектральная плотность энергии (энергия турбулентных вихрей на волновом числе k), k – волновое число, которое связано с размером

вихря, ε – удельная скорость диссипации турбулентной энергии, C – константа Колмогорова.

Одной из первых работ, где была применена эта теория стало исследование Г. С. Глушко [95].

Развитие дифференциальных методов расчёта позволило более точно описывать процессы в турбулентных потоках, однако задачи моделирования теплообмена усложняются при переходе к пористым средам. Здесь особое значение приобрели исследования А. В. Лыкова [167], касающиеся нестационарной теплопроводности и сопряжённых задач тепломассообмена, основанные на разработанных им критериях, а также его работы по тепломассообмену в пористых средах, которые позволяют учитывать влияние как теплопроводности, так и влажности на процессы теплообмена. В дальнейшем его идеи нашли продолжение в работах его учеников: академика О. Г. Мартыненко, исследовавшего свободную и смешанную конвекцию [171] и профессора Л. Л. Васильева изучавшего процессы тепло- и массообмена в теплопередающих устройствах [87]. Данные идеи имеют высокую прикладную значимость в задачах моделирования тепло- и влагообмена в строительных конструкциях

Важнейшими работами в теории радиационного теплообмена являются исследования Г. Л. Поляка [192], Ю. А. Суринова [224] и Л. М. Бибермана [75]. Особое значение с практической точки зрения имеет простая и надёжная формула Бибермана для учета совместного влияния радиации и конвекции. Сегодня данные идеи имеют особую значимость для разработки систем отопления, в которых лучистая энергия способствует равномерному прогреву поверхностей, минимизируя тепловые потери и улучшая общее качество микроклимата в помещениях.

Фундаментальные исследования в области теплообмена, заложили теоретическую основу для анализа сложных процессов теплопередачи в инженерных системах. Эти теории не только способствовали более точному моделированию и расчёту теплообменных процессов, но и позволили решать

прикладные задачи, касающиеся поддержания микроклимата в помещениях. Одной из таких задач является анализ естественно-конвективных течений, которые возникают вследствие температурных градиентов и играют ключевую роль в обеспечении эффективного распределения тепла в зданиях.

Данным вопросом посвящены работы Й. Джалурии [113] где автор подробно анализирует явление естественной конвекции. В своих работах он выводит приближенные уравнения, основанные на уравнениях Навье-Стокса, и описывает методы их решения. Особое внимание уделяется задачам, связанным с тепловой гравитационной конвекцией у твердых поверхностей, а также переходу от ламинарного течения к турбулентному режиму.

В других своих работах [114, 115] совместно с Б. Гебхартом, Р. Махаджаном и Б. Саммакией автор представляет детальный разбор приближений для уравнений пограничного слоя, а также анализ задач, касающихся естественной и смешанной конвекции.

С прикладной точки зрения особого внимания заслуживают работы В. Н. Богословского [79, 76, 81, 78, 80, 77]. В них исследуются особенности теплового режима помещений в различные сезоны, процессы стационарной и нестационарной теплопередачи через ограждающие конструкции, а также вопросы воздушного режима зданий и другие важные аспекты.

Фундаментальные теоретические исследования в области теплообмена, на протяжении многих десятилетий развивавшиеся в рамках отечественной и мировой научной мысли, сформировали прочную основу для решения прикладных задач, связанных с созданием и регулированием внутренней среды зданий. Эти знания стали базой для инженерных подходов к обеспечению микроклимата, в том числе в сооружениях с особыми эксплуатационными требованиями – таких как православные храмы. К середине XX века на стыке теплофизики, строительной климатологии и инженерных систем жизнеобеспечения оформилась междисциплинарная концепция микроклимата, в рамках которой внутреннее состояние помещений

стало восприниматься не как изолированный физический параметр, а как совокупный результат множества взаимосвязанных процессов.

В этой связи создание и поддержание микроклимата в помещениях стало одной из ключевых задач строительной теплофизики и инженерных систем жизнеобеспечения. На современном этапе развития данной дисциплины формирование внутренней среды зданий рассматривается как результат взаимодействия множества факторов – от характеристик внешнего климата до свойств строительных ограждений и принципов работы отопительных, вентиляционных и климатических систем.

Анализ микроклимата начинается с рассмотрения теплового и воздушного режимов. Основными аспектами в данном контексте являются процессы теплообмена между ограждающими конструкциями и внутренним объемом помещения, динамика воздушных потоков, а также параметры влажности и теплового комфорта. Температурное состояние внутренней среды определяется не только средней температурой воздуха, но и её вертикальной и горизонтальной неоднородностью, а также суточными и сезонными колебаниями. Существенное значение имеют также температурные характеристики внутренних поверхностей ограждений.

Влажностный режим оказывает критическое влияние как на самочувствие человека, так и на долговечность строительных материалов. Действующие стандарты и международные рекомендации акцентируют внимание на стабильности относительной влажности как ключевом факторе сохранения исторических интерьеров [16]. Оптимальный диапазон влажности варьируется в пределах 40–60%, однако для конкретных зданий более корректным считается соблюдение диапазона, сложившегося исторически, с минимальными отклонениями [67]. Превышение допустимых колебаний может приводить к образованию конденсата, ускоренному старению отделки, деформациям деревянных и оштукатуренных поверхностей.

Скорость движения воздуха также является существенным параметром. В холодный период года санитарные нормы ограничивают допустимую скорость перемещения воздушных потоков для исключения переохлаждения, а в тёплый сезон вентиляция способствует терморегуляции и снижению относительной влажности. Баланс между интенсивностью воздухообмена и необходимостью предотвращения переохлаждения, конденсации и сквозняков требует индивидуальной настройки в зависимости от назначения здания и характера его эксплуатации.

Теплопередача через наружные ограждающие конструкции оказывает значительное влияние на формирование микроклимата. Энергоэффективность ограждающих элементов, их слоистая структура, теплопроводность и паропроницаемость должны быть учтены при расчётах. Нарушение теплотехнической однородности ограждающих конструкций может привести к образованию зон охлаждения, увеличению теплопотерь и локальной конденсации водяных паров, особенно в зданиях с высокой влажностной нагрузкой [23, 218].

Дополнительную сложность формированию внутреннего климата придаёт нестационарный характер внешних климатических воздействий. Суточные и сезонные колебания температуры и влажности вызывают изменения в тепловом и влажностном режиме конструкций, что особенно важно в зданиях с большой тепловой инерцией. Такие условия могут приводить к развитию физико-химических процессов, вызывающих набухание, усадку и растрескивание материалов, особенно в случае циклического перехода через точку росы.

Понятие теплового комфорта в зданиях рассматривается с позиции физиологических реакций человека на микроклиматические параметры. Согласно подходу, предложенному В.Н. Богословским и уточнённому в современных международных рекомендациях, комфорт достигается при условии стабильности условий, при которых человек не испытывает ни перегрева, ни охлаждения [221, 6, 106, 79, 80]. При этом исследования

последних лет дополняют классические параметры, включая в расчёт уровни углекислого газа, тепловое излучение и интенсивность воздухообмена [112].

Особое внимание в научной литературе и инженерной практике уделяется культовым и историческим сооружениям, где микроклиматическая стабильность играет ключевую роль в сохранении архитектурного и художественного наследия [1, 71, 85]. Православные храмы, как тип пространственно сложных объектов, обладают рядом особенностей: значительная высота помещений, высокая теплоёмкость ограждающих конструкций, наличие подкупольных пространств, слабая инсоляция и ограниченное внутреннее тепловое излучение. Эти факторы определяют специфику воздушного и теплового режима.

Источники конца XIX – начала XX века содержат рекомендации по поддержанию микроклимата в православных храмах на уровне 10-15 °C и воздухообмене порядка 10-15 м³/ч на одного человека [221, 6, 245, 246]. В ряде рекомендаций подчёркивается, что фиксированные значения температур и влажности менее важны, чем сохранение стабильности параметров в пределах привычного «исторического климата» здания [67, 16].

Наблюдения в храмах показывают наличие ярко выраженных температурных и влажностных градиентов по высоте. Верхние части (купола, барабаны) часто демонстрируют зоны с повышенной влажностью и замедленным воздухообменом, что повышает риск образования застойных зон. Подобные явления фиксируются в помещениях с большим объёмом и ограниченным воздухообменом, особенно при отсутствии активной вентиляции или в зимнее время при непрерывной работе отопления [213].

Традиционная архитектура храмов изначально учитывала особенности естественной вентиляции. Проёмы, расположенные вдоль продольной оси здания (от западного входа к восточной части алтаря), а также вертикальные каналы и отверстия в барабанах куполов обеспечивали циркуляцию воздушных потоков. Методы аэродинамического моделирования позволяют

более точно оценить движение воздуха внутри храмов, учитывая влияние формы, высоты и размещения проёмов [163, 164, 240].

Формирование микроклимата в храмах сопровождается взаимодействием различных по температуре и направлению потоков воздуха, что подробно классифицировано в исследованиях по организации тепловых потоков в помещениях [120, 119]. При этом возможны три характерных режима: доминирование восходящего тёплого потока, равновесие потоков и доминирование ниспадающего холодного потока. Каждый из этих режимов оказывает различное влияние на распределение температуры в рабочей зоне и требует соответствующего расчёта и адаптации систем вентиляции.

В условиях высокой гигроскопичности строительных материалов (древесина, штукатурка, кирпич) влажностный режим приобретает критическое значение. Повышенная влажность, особенно в сочетании с пониженной температурой, может привести к капельной конденсации и миграции влаги внутрь конструкций, вызывая разрушение капиллярно-пористой структуры материалов. Методики расчета и прогнозирования этих процессов представлены как в современных так и более ранних рекомендациях по тепловлажностной защите зданий [138, 34, 145, 142].

Для оценки воздухообмена в помещениях сложной геометрии применяются численные методы на основе уравнений сохранения массы и импульса. CFD-моделирование, как показали исследования последних лет, позволяет построить точную модель распределения воздушных потоков в пространстве храма, выявить зоны застойного воздуха и определить оптимальные точки подачи и удаления воздуха [2, 59, 44]. Это особенно важно при проектировании комбинированных систем вентиляции, сочетающих естественный и механический воздухообмен.

В современных проектах регуляции микроклимата в храмах применяется подход, сочетающий фоновое низкотемпературное отопление и локальное подогревание зон пребывания людей (например, напольные панели, инфракрасные излучатели). В ряде случаев используются приточно-вытяжные

системы с адаптивным управлением, при которых подача воздуха осуществляется в нижнюю часть помещения, а удаление – через регулируемые отверстия в верхней зоне (барабаны, слуховые окна) [139, 140]. Такой принцип обеспечивает стратификацию воздушных масс с учётом их температуры и влажности, снижая тепловые потери и минимизируя воздействие на элементы интерьера.

Формирование микроклимата в православных храмах представляет собой многопараметрическую задачу, включающую в себя вопросы аэродинамики, тепло- и влагообмена, климатологии и сохранения культурного наследия. Для её решения необходимо учитывать сложную пространственную структуру, неравномерность распределения тепловых потоков и особенности эксплуатации помещений. В этой связи особое значение приобретают современные инструменты анализа, позволяющие интегрировать многочисленные физические процессы в рамках единой модели.

Одним из таких инструментов как раз являются методы вычислительной гидродинамики (CFD), обеспечивающие высокоточную визуализацию и количественную оценку процессов воздухообмена, теплопередачи и влагообмена в помещениях. CFD-моделирование позволяет исследовать влияние архитектурных решений на параметры микроклимата, выявлять застойные зоны, оптимизировать расположение вентиляционных элементов и снижать тепловые потери. Применение этих методов особенно актуально при анализе внутренней аэродинамики зданий со сложной геометрией и исторически ценной архитектурой, включая православные храмы.

1.2. Теоретические основы вычислительной гидродинамике в задачах создания и поддержания микроклимата

Начало вычислительной гидродинамики как самостоятельной научной дисциплины можно связать с публикациями Харлоу, Фромара и Макано [21, 36] в 1965 году. В этих работах исследователи впервые ясно определили

концепции численного моделирования и численного эксперимента, заложив основы нового направления.

В свою очередь, краеугольным камнем вычислительной гидродинамики стоит считать работу посвященную численному анализу дифференциальных уравнений в частных производных, представленную в 1910 году, Льюисом Фраем Ричардсоном [45]. В данной работе был исследован итерационный метод решения эллиптических уравнений, при котором на n -й итерации в каждом узле расчетной сетки поочередно выполняется конечно-разностное уравнение, использующее значения соседних узлов, рассчитанные на $(n-1)$ -й итерации. В 1918 году Генрих Либман показал, что использование «новых» значений в узлах может существенно ускорить процесс сходимости [18]. Это показало, что даже незначительные изменения в конечно-разностных аппроксимациях, итерационных схемах или подходах к граничным условиям способны существенно повысить эффективность метода.

До появления компьютеров основное внимание ученых было сосредоточено на исследовании эллиптических уравнений. Строгое доказательство сходимости и анализ погрешностей итерационного метода Либмана впервые были выполнены Филлипсом и Винером [43]. В 1928 году Курант, Фридрихс и Леви [9], опубликовали работу, которая стала основой для разработки методов получения конечно-разностных решений, определивших направление дальнейших исследований в этой области.

В тот же период Том Рене разработал и представил первое численное решение уравнений в частных производных, примененное к задачам гидродинамики вязкой жидкости [53].

С развитием ЭВМ интерес исследователей сместился в сторону уравнений параболического типа, так как появилась возможность вычисления нестационарных решений. Это стало значительным этапом в развитии одномерной нестационарной гидродинамики [47]. Такой прогресс стимулировал дальнейшее совершенствование методов, основанных на подходе Либмана, с внедрением идеи верхней релаксации, предложенной

Саусвеллом [50]. Кроме того, появилась возможность изучать асимптотические методы установления по времени, при которых стационарные решения достигаются путем интегрирования уравнений нестационарного течения.

В середине 1950-х годов в работах Ракфорда, Писмена и Дугласа [41, 12] были предложены эффективные неявные методы переменных направлений, которые стали широко применяться в задачах о течении несжимаемой жидкости. Эти методы используют уравнение переноса вихря, описанное О'Брайеном, Хайменом и Капланом [39].

Позже на основе формулировки задач вязкого течения с помощью функции тока и завихренности Ф. Х. Харлоу [21] разработал явный метод прямой разницы во времени.

Вычислительная устойчивость всех вышеупомянутых временных решений была ограничена сверху значением числа Рейнольдса. Однако в 1966 году Томан и Шевчик в своем исследовании поперечного обтекания цилиндра [54] достигли неограниченной вычислительной устойчивости. Это стало возможным благодаря особому вниманию к граничным условиям и использованию разностей против потока для представления конвективных членов. Их работа изменила взгляд на значимость формального порядка ошибок аппроксимации в конечно-разностном представлении дифференциальных уравнений в частных производных. Позже этот вывод был подтвержден исследованием Римона и Ченга [48], посвященным равномерному обтеканию сферы.

В качестве еще одного важного достижения 50-60-х годов стоит отметить открытия в направлении решения уравнений течения невязкой сжимаемой жидкости.

Долгое время одной из главных трудностей в решении подобных задач был процесс преобразования кинетической энергии, высвобождаемой при снижении скорости на ударной волне, во внутреннюю энергию, обусловленную случайными столкновениями молекул. Для решения этой

проблемы была разработана концепция «размазывания» скачка на несколько ячеек расчетной сетки. Этот подход предусматривал явное или неявное введение искусственной вязкости, которая не влияла на решение на определенном удалении от ударных волн. Этот подход был подробно описан в работе фон Неймана и Рихтмайера [60]. Кроме того, значительный вклад внесли исследования, посвященные анализу влияния высоких значений физической вязкости, представленные в труде Ладфорда, Полячека и Зегера [35].

Со временем для сглаживания скачка вместо явного введения искусственной вязкости стали использовать неявную вязкость, которая естественным образом возникает в конечно-разностных аппроксимациях. Этот подход получил широкое распространение и был реализован в ряде методов. Среди них – популярный метод крупных частиц (PIC), разработанный Эвансом и Харлоу [17], а также его модификация EIC, созданная Мадером в 1964 году [37]. Кроме того, идея нашла применение в методе Лакса [27], в схеме Лакса-Вендроффа [28] и её двухшаговой модификации – схеме Рихтмайер [46].

Хотя в ранних методах моделирования течения вязкой несжимаемой жидкости расчетными переменными были завихренность и функция тока, в конце шестидесятых годов началось моделирование с использованием примитивных переменных (составляющих скорости и давления). Первую работу в этом направлении провели Харлоу, Уэлч и Амсен [19, 20] в результате которой представили явные переходные алгоритмы, такие как MAC и SMAC.

В результате улучшения физических моделей и увеличения производительности решателей, начало 70-х годов ознаменовалось развитием коммерческих программ в области вычислительной гидродинамики. Так в 1972 профессор и основатель компании CHAM Ltd. Д. Б. Сполдинг совместно с С. В. Патанкар на основе работ Александра Чорина [7] посвященных методу искусственной сжимаемости для потока вязкой несжимаемой

жидкости, разработали успешную неявную формулировку в терминах примитивных переменных (SIMPLE) [40]. В будущем на основе этого хорошо известного алгоритма и его более поздних усовершенствований (SIMPLER, SIMPLEC), было смоделировано множество многомерных течений вязкой несжимаемой жидкости.

В последующее два десятка лет значительный интерес был проявлен к методам управления потоками произвольной формы. Были предложены методы преобразования сложных геометрий в простое описание данных методов представлены в книге Дж. Ф. Томпсона, С. Варси и К. В. Мастина [55].

Милован Перич предложил общий решатель потоков, основанный на применении законов сохранения к неортогональным контрольным объемам [42]. Исследования этих методов все еще проводятся.

В нашей стране направление вычислительной математики, особенно в области гидродинамики, на протяжении многих лет активно развивалось. В частности, в работах С. К. Годунова, В. С. Рябенского и А. В. Филиппова [100, 101, 202] были достигнуты значительные результаты, касающиеся устойчивости разностных схем, применяемых для линейных и квазилинейных уравнений параболического и гиперболического типов.

Особого внимания заслуживает общая теория, разработанная А. А. Самарским [203, 204, 205], в основе которой лежат энергетические неравенства и априорные оценки. Эта теория была направлена на изучение устойчивости разностных аналогов уравнений параболического и гиперболического типов. Одним из ключевых достижений стало создание метода сквозного счета для таких уравнений в классе разрывных коэффициентов, разработанного совместно с академиком А. Н. Тихоновым [228]. Кроме того, Л. В. Канторович и Г. П. Акилов [131] внесли существенный вклад в численное решение интегральных уравнений, изучив широкий спектр операторных уравнений. На их основе была создана теория аппроксимации и

сходимости, построенная с использованием обобщенных подходов функционального анализа.

Значительный вклад в теорию сходимости внес С. Л. Соболев, который разработал теорию замыкания вычислительного алгоритма [212]. Данный подход получил широкое применение при теоретическом обосновании приближенных методов решения задач математической физики.

Обобщив исследования в областях аппроксимации, устойчивости и сходимости, ученые заложили надежную основу для разработки эффективных разностных схем, применяемых в решении уравнений гидродинамики. Одним из основных направлений стали методы построения консервативных разностных схем, основанных на законах сохранения, присущих большинству физических процессов.

Первые консервативные разностные схемы сквозного счета, применяемые в гидродинамике, были разработаны в нашей стране С. К. Годуновым [98], на основе явных разностных аппроксимаций. В дальнейшем А. Н. Тихонов, Ю. П. Попов и А. А. Самарский [227, 194] представили вычислительные алгоритмы, которые на дискретном уровне сохраняли законы сохранения, заложенные в исходных дифференциальных моделях. Особое значение здесь имеет принцип сохранения монотонности численного решения [99].

Метод интегральных соотношений, предложенный А. А. Дородницыным [118] и впоследствии усовершенствованный О. М. Белоцерковским и П. И. Чушкиным [73], сыграл значительную роль в решении задач гидродинамики. Основой метода является частичная разностная аппроксимация уравнений в дивергентной форме с использованием метода прямых. Эти разработки существенно повлияли на концепцию построения разностных схем для квазилинейных уравнений и стали важным этапом в развитии вычислительных методов.

Развитие численных методов для решения уравнений движения во многом было продиктовано необходимостью выполнения гидродинамических

и газодинамических расчетов. Общие подходы к интегрированию таких уравнений были изложены в работах К. И. Бабенко, В. В. Русанова [200, 201] и В. Ф. Куропатенко [155].

Важным этапом в разработке методов решения нестационарных двумерных задач гидродинамики [173] стал метод попеременных направлений, основанный на однородной аппроксимации. Дальнейшее развитие этих методов связано с применением методов расщепления, которые чаще всего используют неоднородные разностные аппроксимации исходной задачи.

Для явных аппроксимаций метод расщепления был предложен К. А. Багриновским и С. К. Годуновым [70], для неявных Н. Н. Яненко [250], Е. Г. Дьяконовым [121] и А. А. Самарским [206]. Данные методы стимулировали дальнейшее формирование более общего подхода на основе метода слабой аппроксимации [208, 251]. Условия, при которых имеет место сходимость решения для метода слабой аппроксимации, сформулированы в теореме Яненко – Демидова [253] и в работах В. И. Лебедева и Е. Г. Дьяконова [122].

Схема предиктор-корректор Лакса – Вендрофа, хотя и обладает условной устойчивостью, нашла широкое применение в задачах гидродинамики благодаря своей простой реализации. В этой схеме предиктор реализован в виде явной разностной аппроксимации. Различные модификации этого метода, основанные на неявных разностных аппроксимациях, были разработаны советскими учеными И. Д. Софроновым [214], Г. И. Марчуком и Н. Н. Яненко [172].

В работах В. Ф. Дьяченко [123], О. М. Белоцерковского и Ю. М. Давыдова [72], Н. Н. Яненко, Н. Н. Анучиной, В. Е. Петренко, Ю. И. Шокина [252], Ведешкина К. А., Левина З. Ф., Ломнева С. П., Прудковского Г. П., Растопчина Т. В., Рубенова Г. В., Юрченко [88] были предложены различные усовершенствования метода крупных частиц. Эти модификации предназначались для моделирования многомерных гидродинамических течений, характеризующихся значительными деформациями жидкости,

крупными относительными перемещениями и соударениями поверхностей раздела. Улучшения позволили существенно снизить флуктуации плотности и давления, присущие методу крупных частиц, а также повысить «запас устойчивости». Кроме того, в указанных исследованиях подробно анализировались различные подходы к реализации метода.

Дальнейшее развитие вычислительной гидродинамики в нашей стране было во многом связано с внедрением нелинейных разностных методов второго порядка аппроксимации по пространству и времени. Эти методы, обладающие повышенной устойчивостью на разрывных решениях, продемонстрировали высокую эффективность при решении большинства гидродинамических задач.

Одним из таких методов является W-метод [86], который был разработан как модификация известного метода Годунова [99]. Ранее основной идеей большинства схем была консервативная корректировка потоков через границы ячеек на основе известной линейной схемы первого порядка. Однако нелинейный характер поправок в W-методе, а также переменный шаблон их вычисления позволили обойти ограничение, наложенное теоремой Годунова, и добиться сочетания второго порядка точности схемы с её монотонностью.

С начала XX века активно развиваются нелинейные методы более высокого порядка аппроксимации, охватывающие как пространственные, так и временные координаты. Большинство из этих методов являются полудискретными [3, 24, 29, 38], что подразумевает выполнение аппроксимации дифференциальных уравнений в частных производных поэтапно, в два шага.

В последние годы в России был предложен новый подход [103], который можно рассматривать как альтернативу методу Годунова. Этот подход, основанный на использовании локальных римановых инвариантов гиперболических уравнений, получил название «схема КАБАРЕ». Несмотря на многочисленные преимущества, метод имеет и определенные ограничения,

связанные с применением на расчетных сетках. В частности, до сих пор не удалось адаптировать его для работы с треугольными и тетраэдральными сетками, которые остаются крайне востребованными в ряде приложений.

Большое количество работ посвящённых формулировкам таких основных уравнений гидро- и газодинамики потоков, как уравнения неразрывности, уравнения сохранения импульса, уравнение сохранения энергии, уравнение состояния, которые являются основой любого исследования в области вычислительной гидродинамики, а также обилие методов решения систем нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка, составляемые на основе вышеперечисленных уравнений, говорит о сложности и разносторонности проводимых исследований.

1.3. Анализ нормативной документации по созданию и поддержанию микроклимата в православных храмах

На сегодняшний день нормативная база в области проектирования и строительства православных храмов является довольно бедной. За последние 25 лет было выпущено всего несколько документов содержащие требования к зданиям и сооружениям богослужебного назначения и их инженерному оборудованию.

Первым нормативным документом по храмостроительству стал СП 31-103-99 «Здания, сооружения и комплексы православных храмов» [220], выпущенный ГУП ЦПП и утвержденный в 2000 г. Госстроем России.

Из-за особенностей нормативного документа, требования, изложенные в данном своде правил, оказались недостаточно полными, особенно в аспекте создания и поддержания микроклимата. В связи с этим, для более полного раскрытия темы, в 2003 году Архитектурно-художественный центр «Арххрам» разработал пособие в трех томах МДС 31-9.2003 «Православные храмы» [174, 175, 176].

В первой книге под названием «Идея и образ» [174] были собраны исследования отдельных авторов, посвященные взглядам на храмовое

строительство через призму канонических традиций. Собранные материалы в меньшей степени затрагивают вопросы теории архитектуры, но прослеживают неразрывную связь становления и развития архитектурных форм храма с догматикой, литургическим действием и исторической традицией.

Вторая книга, озаглавленная «Православные храмы и комплексы» [175], охватывает широкий спектр практических вопросов. Она включает аспекты создания архитектурно-художественных решений, информацию о системе декорации православных храмов, а также конструктивные и инженерные решения, которые представляют наибольший интерес в контексте рассматриваемой темы.

В разделе 2.3 «Инженерные решения» данной работы собрано множество рекомендаций, направленных на создание и поддержание комфортных условий для прихожан и церковного клира, а также на обеспечение благоприятной среды для сохранности внутреннего убранства храма. В частности, настоящий раздел содержит информацию об особенностях материалов и конструкций вентиляционных каналов и вытяжных шахт, по размещению и конструкции вытяжных отверстий, по организации притока воздуха и другим аспектам организации воздухообмена.

Третья книга под названием «Примеры архитектурно-строительных решений» [176] является хорошо иллюстративным графическим дополнением ко второму тому и посвящена примерам проектных решений православных храмов, собранным из различных источников прошлой и современной практики храмостроительства, что в конечном итоге может стать ориентиром для поиска оригинальных решений в новых проектах.

При создании раздела 2.3, посвященного вопросам теплоснабжения, отопления и вентиляции храмов, авторы МДС 31-9.2003 [174, 175, 176] опирались на отраслевой стандарт, разработанный творческим коллективом Некоммерческого Партнерства «Инженеры по отоплению, вентиляции, кондиционированию воздуха, теплоснабжению и строительной теплофизике» (НП «АВОК») [65].

В данном стандарте впервые были представлены допустимые и оптимальные параметры внутреннего воздуха храма, приведены справочные данные для расчета теплового баланса и воздухообмена помещений храма с учетом выделения тепла, влаги и CO₂ от свечей, приведен пример расчета сопротивления теплопередаче стены центральной части храма. Данные рекомендации были подкреплены большим количеством ссылок на нормативную документацию, в соответствие с которой следовало проектировать инженерные системы православных храмов.

В 2017 году, опираясь на актуальные к тому времени исследования, авторский коллектив ООО «Институт общественных зданий» разработал свод правил СП 391.1325800.2017 «Храмы православные. Правила проектирования» [219]. Основой для этого документа послужили СП 31-103-99 «Здания, сооружения и комплексы православных храмов» [220], а также положения Федерального закона от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [241]. При этом учитывались требования СП 118.13330.2012 «СНиП 31-06-2009 Общественные здания и сооружения» [216].

В настоящее время данный свод правил сохраняет актуальность и используется при проектировании новых, реконструируемых или капитально ремонтируемых зданий, сооружений и комплексов православных храмов, не имеющих статуса объектов культурного наследия. Кроме того, он применяется для проектирования помещений домовых церквей, встроенных в здания с другими функциональными назначениями.

Документ состоит из девяти разделов, которые содержат требования к размещению храмовых комплексов и прилегающих участков, а также к естественному и искусственному освещению, звукоизоляции, шумозащите и акустическим характеристикам помещений. В нем также регламентированы системы отопления и вентиляции, хозяйственно-питьевого и наружного противопожарного водоснабжения, канализации и водоотведения. Особое

внимание уделено нормам, регулирующим освещение и электрооборудование, включая электросиловые установки.

Девятый раздел данного документа посвящен расчетным параметрам внутреннего воздуха, включая показатели температуры, влажности и подвижности, а также кратность его обмена. Эти параметры определены для теплого, холодного и переходных периодов года, а также для различных зон и помещений храма: притвора, алтаря, ризницы, крещальни, диаконского предела, средней части храма и прочих служебных помещений.

Кроме того, в этом разделе в таблице 9.3 приведены ориентировочные значения расхода свечей в зависимости от общего числа гнезд на столешницах, что также учитывается при проектировании.

Данный свод правил не содержит четких рекомендаций по выбору системы организации воздухообмена. Вместо этого авторы предлагают учитывать индивидуальные архитектурно-структурные и объемно-планировочные особенности храмов, а также режим их эксплуатации. При этом в документе представлены общие положения по отдельным аспектам, связанным с воздухообменом.

Для удаления воздуха из помещений храмов рекомендуется использовать вытяжные отверстия, расположенные в барабанах глав и куполах, либо заполнения световых проемов в верхней части храма. При этом необходимо предусмотреть меры, исключающие проникновение атмосферной влаги внутрь здания.

Для вытяжных отверстий, расположенных в барабанах глав, рекомендуется оснащение заслонками с электроприводом и дистанционным управлением. Также следует устанавливать «незадуваемые» козырьки или специальные аэрационные устройства, которые обеспечат эффективное функционирование системы.

В многопридельных храмах рекомендуется организовывать зональное распределение приточного воздуха для каждого придела. В помещении алтаря,

в зонах розжига и подвески разожженного кадила, следует предусмотреть местную систему вытяжной вентиляции.

Во время проведения праздничных богослужений, с учетом сезона, рекомендуется использовать естественное проветривание, открывая существующие оконные проемы.

Рекомендации по размещению и конструктивным особенностям аэрационных устройств сводятся к необходимости учитывать объемно-пространственную композицию здания, его внешнюю аэродинамику, розу ветров, особенности конструкции оконных рам и другие важные факторы.

Таким образом, подавляющее большинство представленных в СП 391.1325800.2017 [219] рекомендаций сводятся к необходимости анализа огромного количества параметров при создании и поддержании микроклимата православных храмов.

С целью обеспечения пожарной безопасности при проектировании, строительстве вновь строящихся и реконструируемых зданий, сооружений и помещений объектов религиозного назначения в том же 2017 году был введен СП 258.1311500.2016 «Объекты религиозного назначения. Требования пожарной безопасности» [217].

В данном документе рассматриваются вопросы противопожарной защиты и устанавливаются требования пожарной безопасности к объектам религиозного назначения религиозных организаций, зарегистрированных на территории Российской Федерации в установленном порядке. Для некоторых конфессий приведены дополнительные требования, учитывающие специфику строения зданий и проведения религиозных обрядов.

Настоящий документ содержит раздел 8.3 «Инженерные системы пожарной безопасности. Отопление, вентиляция и противодымная защита», состоящий всего из трех пунктов в которых ссылаются на СП 7.13130 «Отопление, вентиляция и кондиционирование. Требования пожарной безопасности» [215].

Анализ нормативной базы в области создания и поддержания микроклимата православных храмов показывает, что текущие нормативы, в большей степени, содержат только представления по отдельным конструктивным вопросам, связанным с отоплением и вентиляцией, что обусловлено тем, что окончательные решения необходимо принимать на основании индивидуальных архитектурно-структурных и объемно-планировочных особенностей храмов ввиду их неординарной структуры и режима использования.

1.4. Анализ отечественных и зарубежных работ по созданию и поддержанию требуемых параметров микроклимата в православных храмах

Вопросы создания и поддержания микроклимата в различных типах помещений, включая промышленные и общественные здания, давно занимают важное место в исследованиях как отечественных, так и зарубежных ученых.

Значительный вклад в исследование вопросов аспирации и математического моделирования систем вентиляции внес К. И. Логачев, который в своих работах изучает особенности отрывных течений в различных конструкциях вентиляционных отсосов, предлагая методы повышения их эффективности за счёт оптимизации геометрии [64, 162, 160]. Особое внимание уделяется моделированию вихревых зон, возникающих у всасывающих отверстий, что позволяет существенно улучшить конструкцию вентиляционных систем. Эти разработки могут быть особенно полезны при создании вентиляционных систем для православных храмов, где стабильность воздушного потока и поддержание оптимальных климатических условий играют важную роль в сохранении внутреннего убранства и комфорта прихожан.

В рамках данного направления выполнен ряд совместных исследований с участием А. М. Зиганшина [30, 31, 33, 63], в которых особое внимание уделяется разработке и численной реализации математических моделей

отделяющихся потоков воздуха на входе в вытяжные устройства. В одной из таких работ [33] предложен метод дискретного вихревого моделирования, позволяющий строить трёхмерную вихревую структуру потока на входе в прямоугольный вытяжной патрубок. Разработан алгоритм определения границ вихревой зоны и распределения скоростей, результаты которого подтвердили высокую корреляцию с экспериментальными и расчётными данными. Предложенный подход позволяет существенно повысить эффективность захвата загрязнений, снизить аэродинамическое сопротивление и энергозатраты, а также улучшить акустические характеристики вентиляционных систем. Эти аспекты находят продолжение и в других работах А. М. Зиганшина [127, 128], сосредоточенных на повышении энергоэффективности вентиляционных систем за счёт профилирования фасонных элементов и оптимизации течений в сложных участках воздуховодов, в том числе вентиляционных тройниках. Численное моделирование, проведённое им, позволило выявить ключевые факторы, влияющие на потери давления и распределение воздушных потоков, что особенно актуально для зданий со сложной архитектурной структурой, таких как православные храмы.

Наряду с исследованиями, посвящёнными вентиляционным системам, большой интерес вызывают работы, направленные на моделирование микроклимата в жилых и общественных зданиях. Одним из таких авторов является Т. А. Дацюк, которая провела детальное исследование влияния различных типов отопительных приборов на параметры температурного и скоростного полей в помещениях [112]. Исследование показало, что выбор отопительных приборов существенно влияет на равномерность распределения тепла и комфорт микроклимата. Конвекторы, в отличие от радиаторов, обеспечивают более равномерное распределение температуры и скорости воздуха, что способствует созданию комфортных условий при естественной вентиляции.

Значительный интерес представляет работа по совершенствованию принципов расчёта систем обеспечения микроклимата зданий [110, 111], где были предложены усовершенствования расчётных методов для повышения точности моделирования, на основе которых, в дальнейшем, в совместной работе с коллегами Тамара Александровна предложила новую технологию проектирования систем обеспечения микроклимата, которая ориентирована на улучшение энергоэффективности и поддержание стабильных температурных условий [109]. Эти работы позволяют улучшить методы расчёта микроклимата, применимые как к жилым зданиям, так и к православным храмам.

Развитие данного направления также отражено в исследованиях В. М. Уляшевой, которая сосредоточила свои усилия на численном моделировании процессов тепло-, воздухо- и массообмена, что имеет ключевое значение для поддержания микроклимата в различных типах помещений. Так в одной из своих работ [231] она рассматривает различные модели турбулентности, такие как модель Спаларта-Аллмареса (SA) и $k-\epsilon$, в контексте их применения для исследования воздушных потоков в помещениях с источниками тепловыделений. В результате анализа показано, что модель SA сокращает трудоемкость расчётов, обеспечивая при этом достаточную точность для практических задач, связанных с распределением температур и скоростей потоков воздуха. Это исследование подчеркивает значимость выбора модели турбулентности для адекватного описания микроклимата в помещениях с нестационарными потоками.

В другой работе Вера Михайловна исследует параметры воздуха в помещениях с источниками тепловыделений [236]. Исследование направлено на анализ распределения температуры и скорости воздушных потоков, что является важным для поддержания комфортных условий микроклимата. В работе используется численное моделирование, с помощью которого выявлены особенности циркуляции воздуха и температурных расслоений в помещениях. Результаты работы, могут помочь в анализе воздушных и

тепловых потоков в храмах для более точного расчёта микроклимата. Например, исследование поведения воздушных потоков вблизи источников тепла (свечей) может выявить зоны температурных расслоений и помочь в разработке систем вентиляции, которые будут минимизировать тепловые дискомфорт и обеспечивать комфортные условия для прихожан, а также сохранение внутреннего убранства храма.

Помимо вышеприведённых исследований, В. М. Уляшева активно занимается моделированием микроклимата в различных специфических помещениях [234], что позволяет существенно расширить практическое применение численных методов в данной области. В ряде своих работ она уделяет внимание особенностям обеспечения параметров микроклимата в плавательных бассейнах [233], а также режимам работы пластинчатых рекуператоров, которые используются в системах вентиляции и кондиционирования воздуха [232]. Важно отметить её вклад в исследования по созданию климатических систем для объектов, расположенных в экстремальных климатических условиях, где особое внимание уделяется вопросам сохранения энергии и эффективности работы систем ОВК [235, 237].

Все эти работы демонстрируют возможность адаптации методов численного моделирования к различным условиям и задачам, что особенно актуально для создания стабильного микроклимата в самых разных типах зданий и сооружений.

Высокий прикладной характер имеет исследование О. Н. Зайцева [124] посвященное тому, как тепловая инерционность стен и отопительных систем влияет на стабильность температурных условий в помещении. Эта работа важна для понимания процессов поддержания комфортного микроклимата, особенно при изменении внешних условий и использовании различных типов отопительных приборов.

Исследования данных авторов предоставляют важные методологические подходы и практические рекомендации, которые могут

быть адаптированы для решения задач по созданию и поддержанию микроклимата в православных храмах.

Одной из важных работ в области математического моделирования микроклимата именно в православных храмах, является проведенное с 2006 по 2007 год в рамках договора между ГУК «Государственный музей-памятник Исаакиевский собор» и ФГАОУ ВО СПбПУ им. Петра Великого, расчетно-экспериментальное исследование аэродинамики и процессов теплопереноса для смешанно-конвективных воздушных потоков в помещении собора [223].

В ходе осуществления данного исследования была построена компьютерная модель Исаакиевского собора, воспроизводящая все его основные характеристики: геометрию здания и размещенных в нем объектов, теплофизические свойства материалов, мощность осветительных приборов, а также температуры и скорости воздуха на выходах из системы воздушного отопления.

Разработанная компьютерная модель была реализована с использованием программного комплекса COOLIT. Программный продукт, разработанный компанией DAAT Research Corp. в сотрудничестве с лабораторией «Вычислительная гидроакустика и турбулентность» ФГАОУ ВО СПбПУ, был изначально создан для решения задач, связанных с охлаждением электронных устройств. Однако, как утверждают авторы, его математическая модель, а также встроенные графические препроцессор и постпроцессор, могут эффективно использоваться для решения задач в области отопления, вентиляции и кондиционирования (ОВК).

Для верификации расчетов, полученных с помощью разработанной модели, были проведены измерения скорости и температуры воздушного потока помещений собора в переходный (при работе системы теплоснабжения в режиме вентиляции) и в холодный отопительный периоды. В частности, были измерены скорость и температура в точках, расположенных в пространстве между душниками, по периметру аттиковой галереи, вблизи

кромки отверстия внутреннего купола, в алтарной части, а также на рециркуляционных решётках и душниках.

На основании полученных результатов авторы приходят к выводу о корректности созданной модели, а также о её пригодности для выявления причин неудовлетворительного функционирования существующей системы ОВК собора. Кроме того, модель может быть эффективно использована для оценки предложенных мер по её совершенствованию.

Для обеспечения требуемого температурного режима поверхности интерьера в стационарных условиях был выполнен поиск максимально простых решений, оказывающих минимальное воздействие на существующую систему теплоснабжения. На основе предварительных результатов численного моделирования были сформулированы следующие выводы, которые легли в основу технического задания на проектирование системы ОВК:

- Обеспечить удовлетворительный температурный режим внутренней поверхности собора только за счёт изменения количества работающих тепловых установок не представляется возможным;
- Обеспечить термостатирование внутренней поверхности интерьера путем подачи воздуха с температурой, соответствующей оптимальным условиям хранения, невозможно без проведения масштабной реконструкции системы воздухораспределения;
- Нормативное состояние всей поверхности интерьера может быть обеспечено существующей системой теплоснабжения, при условии нанесения теплоизоляционного покрытия на пол чердачного помещения и поверхности малых куполов;
- Разработан алгоритм управления системой ОВК, учитывающий как стационарные, так и нестационарные погодные условия.

Реконструкция системы ОВК в Исаакиевском соборе, с учетом результатов данного исследования, проводилась с 2010 по 2016 год. Описание всех технических аспектов реконструкции представлены в статье Аржаникова Р. Г [69].

В 2021 все тот же коллектив «Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики» ФГАОУ ВО СПбПУ им. Петра Великого представил исследование, посвященное оптимизации воздухораспределения и параметров микроклимата в храме Рождества Христова в Санкт-Петербурге на Пискаревском проспекте [74].

Основной проблемой, решаемой в рамках данной работы, стало образование нестационарных воздушных потоков у пола молельного зала, характеризующихся наличием большого числа вихревых струй, формирующихся в результате взаимодействия нескольких течений: течение холодного воздуха из алтарной части, нисходящее течение около холодных поверхностей, вихревые ячейки над теплым полом (конвекция Рэлея-Бенара). Образующиеся воздушные потоки приводят к тепловому дискомфорту, а также вызывают колебания пламени церковных свечей, что в конечном итоге приводит к выделению большого количества копоти.

В данной статье авторы не приводят информации о используемой математической модели, лишь сообщают что практическая реализация была проведена на базе программного комплекса COOLIT.

С целью оценки степени влияния конвекции Рэлея-Бенара на воздушный поток у пола, было проведено сравнение модуля скорости воздушного потока в точке, где находится главный подсвечник храма, до и после отключения теплого пола.

В результате отключения исчезли вихревые структуры, что существенно уменьшило частоту колебаний модуля скорости и его среднее значение, а также повысилась однородность поля температуры. Еще одним подтверждением итогов расчета может выступать увеличение времени горения свечи без копоти.

В качестве решения проблемы существующего перемещения холодных воздушных потоков по направлению от иконостаса к западной стене храма предложено создать систему отбора воздуха в полу алтарной части. Данное решение способствует уменьшению среднего значения модуля скорости и

частоты его колебания, что в конечном итоге приводит к стабилизации пламени свечи.

На основе данных предложений в 2020 году была проведена реконструкция системы ОВК. Дальнейшие наблюдения показали соответствие характеристик воздушной среды расчетным значениям.

Для полного понимания степени изученности проблемы создания и поддержания микроклимата в православных храмах стоит рассмотреть статьи О. Ф. Гавейя и Л. Г. Старковой [91, 92] посвящённые анализу этих проблем и теоретическим путям их решения.

В их статьях рассмотрены некоторые проблемы создания и поддержания микроклимата православных храмов и предложены теоретические пути их решения.

В своих работах в качестве основных проблем авторы выделяют: нестандартные и оригинальные архитектурно-планировочные решения православных храмов, неравномерность посещения служб, сажу и копоть, образующуюся в результате горения свечей.

Для решения данных проблем предлагается применять систему воздушного отопления, а в частности вариант с использованием приточных нагретых струй, комбинируя вертикальную подачу из напольных щелевых решеток и горизонтальное настиление на пол.

К сожалению, в работе не представлены результаты экспериментальных исследований, а большая часть проблем и решений уже были описаны в существующих на тот момент нормативных документах.

Позднее Л. Г. Старкова совместно с коллегами по кафедре управления недвижимостью и инженерных систем, Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова опубликовали результаты работы, посвященной оптимизации микроклимата в православном храме методом числового моделирования воздушных потоков [222].

В качестве объекта исследования выступил кафедральный собор Вознесения Христова в г. Магнитогорске, потерявший часть живописности

внутреннего убранства в результате покрытия поверхности стен, колон, фресок и росписей внушительным слоем копоти, образовавшейся в результате адсорбции мелкодисперсных частиц сажи и иных продуктов горения свечей.

В рамках данной работы с помощью программного комплекса SolidWorks с подпрограммой Simulation, была построена модель скоростей тепловоздушных потоков, на основании которой были сделаны следующие выводы:

- С целью защиты поверхности стен от налипания сажи в холодный период года, совместно с притоком воздуха через окна и двери необходимо использовать пристенный поток путем организации подачи воздуха через механическую вентиляцию;
- Рекомендуется уменьшить скорость подачи воздуха системой вентиляции и воздушного отопления с целью достижения ламинарного течения потока;
- Рекомендуется оборудовать окна, расположенные в подкупольном барабане, вентиляционными проемами;
- Основные теплопотери рекомендуется компенсировать воздушным отоплением, а для поддержания минимально допустимой температуры воздуха – водяное отопление;
- В виду отсутствия естественного воздухообмена во всем объеме храма, не рекомендуется использовать герметичные окна с пластиковыми рамами;

К сожалению, в данной работе не представлена информация о математической модели, использованной для описания процессов конвективного и кондуктивного теплопереноса, на основе которой выполнялись численные исследования. Также не представлены данные об экспериментальной оценке точности использованной математической модели.

Интересным является исследование, проведенное Сухановой И. И. в области численного моделирования микроклимата и качества воздуха в храме Рождества Христова в городе Санкт-Петербург [52].

В рамках исследования была создана 3D-модель храма, учитывающая архитектурные особенности помещений, расположение вентиляционного и отопительного оборудования, а также распределение свечей и прихожан. Расчет полей температуры, скорости и концентрации CO_2 были выполнены с использованием гидродинамического вычислительного комплекса STAR-CCM+. С целью максимально точно воссоздать реальные условия богослужения, выполняется моделирование нестационарных процессов в храме (люди постепенно приходят, долго находятся внутри, затем покидают храм после окончания службы).

На основе полученных данных автор делает вывод что при наличие максимального количества прихожан температура воздуха может превышать допустимые значения, а концентрация CO_2 остаётся допустимой.

К сожалению, данная работа не содержит информации о используемой математической модели, а также практических рекомендаций по созданию и поддержанию микроклимата в православных храмах.

Полученные в ходе исследования результаты не верифицированы с помощью реальных данных, поэтому работа носит больше теоретический характер.

Так как православие является преобладающей конфессией преимущественно в России, некоторых странах СНГ и части стран Балканского полуострова, тема создания и поддержания микроклимата православных храмов в зарубежной литературе освещена недостаточно подробно. Куда чаще встречаются исследования, посвящённые моделированию систем ОВК в католических храмах. Но далеко не все результаты данных работ, виду конфессиональных особенностей католической архитектуры, справедливы для православных храмов.

Поэтому достаточно важной является работа сотрудников Технического университета Георге Асачи во главе с Turcanu Florin-Emilian, посвященная моделированию теплового комфорта храма Успения Пресвятой Богородицы расположенного в города Яссы, Румыния [57].

В рамках данного исследования проводится анализ существующей системы отопления с целью выявления её недостатков, обусловленных частыми колебаниями температуры и относительной влажности внутри помещения. Эти изменения негативно сказываются на сохранности здания и произведений искусства, находящихся внутри, ускоряя их старение и разрушение.

Для решения данной проблемы был проведен CFD-анализ, в процессе которого с помощью Ansys Fluent была разработана модель для решения уравнений движения потока, непрерывности и энергии. В опубликованной работе [57] имеется краткое описание данной модели.

На основе полученных результатов авторы делают вывод о негативном воздействии существующего механизма циркуляции воздуха и существующего режима работы системы отопления. Данные факторы, в конечном итоге, провоцируют ряд проблем: преждевременное высыхание всех предметов, с которыми соприкасается воздух; подъем, перенос и осаждение пыли в зонах с холодными «термомостами», образование конденсата на поверхностях с низкой температурой.

В данном исследовании верификация построенной модели на реальных данных не проводилась, однако авторы подчёркивают необходимость её выполнения в будущем.

Еще одной работой данного коллектива является изучение теплового комфорта для различных систем отопления с использованием CFD-модели внутри Митрополичьего собора (собор Сретения Господня и Святого Мученика Георгия) в Яссах [8].

Целью данной работы является сравнение двух различных систем отопления (панельное отопление и теплый пол) с точки зрения теплового комфорта и соответствия требованиям микроклимата, предъявляемого к храмам.

Поставленная задача решалась с использованием модели разработанной в Autodesk Inventor. В данной работе авторы приводят только значения граничных условий.

На основе полученных данных предпочтение отдается системе теплый пол по ряду следующих причин: теплопроизводительность теплого пола ниже, чем панельного отопления; затраты на отопление при использовании системы теплого пола будут значительно ниже, чем при использовании панельного отопления; конвекция воздуха при использовании теплого пола относительно невелика; при отказе от панельного отопления отсутствие расслоения температуры на высоте 2 метров.

Данные выводы сделаны на основе не верифицированной модели, поэтому по большей степени носят теоретический характер.

Последней опубликованной работой данных авторов является численный анализ теплового комфорта в храме Святых Петра и Павла, Сербия [58].

Как и в предыдущих своих работах, в рамках данной статьи, авторы предлагают использовать систему теплый пол ввиду её преимуществ перед панельным отоплением. Но интерес данной работы заключается в публикации результатов измерений таких параметров как температура и относительная влажность воздуха, на основе которых была верифицированная разработанная модель.

На основе рассмотренных работ можно сделать вывод что большинство исследований носят теоретический характер. Построенные модели не верифицированы на практике, что не позволяет доверять результатам численных экспериментов в полном объеме.

Представленные в публикациях храмы относятся к культовому сооружению, что накладывает определенный отпечаток на доступность тех или иных решений по созданию и поддержанию микроклимата. Также стоит отметить разделившиеся мнения по поводу применения систем теплых полов.

1.5. Выводы по первой главе

На основании проведенного анализа отечественной и зарубежной литературы была сформулирована цель исследования: разработка теоретических и практических методов создания и поддержания оптимального микроклимата в православных храмах с помощью регулируемого воздухообмена. Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать конструктивные и архитектурные элементы православных храмов, которые влияют на циркуляцию воздуха и температурный режим внутри помещений. Особое внимание уделить сложной геометрии и уникальным особенностям вентиляции в различных частях храмов (купол, алтарь, неф), а также анализу существующих методов моделирования микроклимата, как в религиозных сооружениях, так и в других типах зданий.

2. Разработать точную и адаптированную математическую модель, которая позволит описать процессы конвекции, теплообмена и циркуляции воздуха внутри помещений храмов. Модель должна учитывать такие факторы как внешние температурные условия и влияние архитектурных элементов на воздушные потоки.

3. Провести натурные эксперименты в реальных условиях православных храмов. Измерить температуры, скорости и направления воздушных потоков в различных частях храма с целью сравнить результаты экспериментов с расчётами, выполненными с помощью компьютерного моделирования, и скорректировать модели для достижения высокой точности.

4. Выявить зависимость характеристик микроклимата от изменения внешних климатических факторов и внутренних особенностей архитектуры храмов. Особое внимание уделяется различию температур и воздушных потоков по вертикальной и горизонтальной протяжённости храмовых помещений.

5. Предложить рекомендации по управлению системами естественной вентиляции в храмах, в том числе определение оптимальных углов открытия вытяжных и приточных фрамуг для поддержания необходимого микроклимата. Эти рекомендации должны учитывать архитектурные особенности храмов, внешние климатические условия и внутреннюю конфигурацию помещений.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА В ПРАВОСЛАВНОМ ХРАМЕ

2.1. Общая постановка задачи

Рассмотрим поле скорости $\mathbf{v}(x, y, t) = (u, v)$, температуры $T(x, y, t)$, плотности $\rho(x, y, t)$ и удельной внутренней энергии $e(x, y, t)$ для однокомпонентного сжимаемого вязкого теплопроводного газа. Пусть $\mathbf{F} = (X, Y)$ – вектор внешних сил, k – коэффициент теплопроводности, τ – вязкий (дифференциальный) тензор напряжений. Тогда обобщённая система уравнений сохранения в двумерном случае может быть записана в виде:

$$\begin{cases} \rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho \mathbf{F} \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \\ \rho \frac{De}{Dt} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \tau : \nabla \mathbf{v} \end{cases} \quad (2.1)$$

где ∇ – оператор дивергенции по переменным (x, y) ; $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla)$ – материальная производная; p – термодинамическое давление, задаваемое уравнением состояния; $\tau : \nabla \mathbf{v} = \sum_{i,j} \tau_{i,j} \frac{\partial v_i}{\partial x_j}$ – двойное скалярное произведение.

В системе (2.1), записанной в векторно-тензорном виде, в первом уравнение учитывается действие внешних сил и внутренних сил, связанных с давлением и вязким трением. Уравнение неразрывности выражает закон сохранения массы в движущейся среде, а последнее уравнение описывает

развитие внутренней энергии под воздействием теплопроводности и вязкой диссипации.

Исходя из требований симметрии и однородности моделируемой среды, физические характеристики газа считаются одинаковыми во всех направлениях и постоянными в пределах расчётной области. При таком подходе исключается наличие внутренних структур и выделенных направлений, что позволяет сформировать тензор вязких напряжений в его стандартной симметричной форме, широко применяемой при описании процессов переноса количества движения [152, 158, 244, 211, 190]:

$$\begin{aligned}\tau_{xx} &= -p + \lambda(\nabla \cdot \mathbf{v}) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \\ \tau_{yy} &= -p + \lambda(\nabla \cdot \mathbf{v}) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}\end{aligned}\tag{2.2}$$

где $\mathbf{v} = (u, v)$ – вектор скорости; $p = p(\rho, T)$ – термодинамическое давление зависящее от плотности и температуры согласно уравнению состояния; λ – коэффициент объёмной вязкости, отвечающий за диссипацию при объёмных деформациях; μ – коэффициент динамической вязкости, характеризующий внутреннее трение при переносе импульса вдоль направления движения.

В полной тензорной записи присутствуют как диагональные компоненты τ_{xx}, τ_{yy} , отвечающие за нормальные напряжения, так и недиагональные τ_{xy}, τ_{yx} , которые в изотропной жидкости совпадают и описывают вязкие сдвиговые напряжения:

$$\tau_{yx} = \tau_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)\tag{2.3}$$

В рамках дальнейшего моделирования предполагается, что рассматриваемый газ удовлетворяет модели идеального газа. При таких условиях термодинамическое уравнение состояния записывается в стандартной форме:

$$p = \rho RT\tag{2.4}$$

Калорическое уравнение состояния в модели идеального газа устанавливает связь между внутренней энергией и температурой и определяется выражением:

$$e = \int_0^T c_v dT \quad (2.5)$$

Также предполагается, что коэффициенты удельной теплоёмкости c_v , вязкости μ и теплопроводности k зависят только от температуры среды. Это предположение может быть записано в виде функциональных зависимостей:

$$\mu = \mu(T), \quad k = k(T), \quad c_v = c_v(T) \quad (2.6)$$

Для получения безразмерной формы исходной системы уравнений (2.1-2.6) предварительно выбираются характерные масштабы для ключевых физических параметров, таких как скорость, плотность, вязкость, температура, теплопроводность, теплоёмкость, а также для геометрических и временных переменных:

$$\bar{u} = \frac{u}{V_1}, \quad \bar{v} = \frac{v}{V_1}, \quad \bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_1}, \quad \bar{\mu} = \frac{\mu}{\mu_1}, \quad \bar{T} = \frac{T}{T_1}, \quad \bar{k} = \frac{k}{k_1}, \quad \bar{C}_v = \frac{C_v}{C_{v1}},$$

$$\bar{C}_p = \frac{C_p}{C_{p1}}, \quad \bar{x} = \frac{x}{\ell_1}, \quad \bar{y} = \frac{y}{\ell_1}, \quad \bar{t} = \frac{t}{t_1}$$

где ℓ_1 – репрезентативный линейный масштаб, определяющий размерность области сложной формы t_1 – временной интервал, который выбирается, исходя из физических свойств системы $t_1 \propto \frac{\ell_1}{V_1}$ или определяется характерным временем релаксации процесса.

С учетом введенных масштабных величин система уравнений (2.1, 2.2, 2.4-2.6) преобразуется в следующую форму. Для упрощения записи безразмерных величин опустим обозначение черты над ними:

$$\begin{cases}
\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\chi \rho C_M^2} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho C_R} \left(\frac{4}{3} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \right) + f_x \\
\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\chi \rho C_M^2} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho C_R} \left(\frac{4}{3} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \right) + f_y \\
\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = 0 \\
\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\chi}{\rho C_v C_R Pr} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \frac{p(\chi-1)}{\rho C_v} (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \frac{\mu \chi (\chi-1) C_M^2}{\rho C_v C_R} \phi \\
\phi = 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u})^2 \\
p = \rho T \\
\mu = \mu(T), \quad k = k(T), \quad C_v = C_v(T)
\end{cases} \quad (2.7)$$

где $\nabla \cdot \mathbf{u} = \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}$ – дивергенция поля скорости, ϕ – скалярная функция, отражающая вязкую диссипацию, f_x, f_y – компоненты вектора внешних сил $f = (f_x, f_y)$, $C_R, C_M, C_{F_x}, C_{F_y}, \chi, Pr$ – безразмерные комплексы, построенные по параметрам, выбранным в качестве масштабов.

В результате безразмерного преобразования системы уравнений (2.7), выполненного с использованием выбранных характерных величин, получены следующие безразмерные критерии подобия, которые отражают физические соотношения между различными явлениями, возникающими в рассматриваемом процессе:

$$\begin{aligned}
C_R &= \frac{V_1 \ell_1 \rho_1}{\mu_1}, \quad C_M = \frac{V_1}{\sqrt{\chi R T_1}}, \quad C_{F_x} = \frac{X \ell_1}{V_1^2}, \\
C_{F_y} &= \frac{Y \ell_1}{V_1^2}, \quad \chi = \frac{C_{p1}}{C_{v1}}, \quad Pr = \frac{\mu_1 C_{p1}}{k_1}
\end{aligned} \quad (2.8)$$

В рамках сформулированной безразмерной системы уравнений (2.7-2.8) заданы начальные условия в виде известных распределений всех искомых функций в момент времени $t = 0$:

$$(u^o, v^o, \rho^o, T^o) \Big|_{t=0} = (u(x, y, 0), v(x, y, 0), \rho(x, y, 0), T(x, y, 0)) \quad (2.9)$$

При этом исследуемая в работе область $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ характеризуется сложной геометрической конфигурацией с криволинейными границами, что оказывает значительное влияние на постановку и решение задачи математического моделирования. Для корректного отражения особенностей формы области в рамках теоретической части исследования введём криволинейную систему координат (ξ, η) , осуществляющую гладкое взаимно-однозначное отображение физической области Ω на расчётную область $\hat{\Omega}$ стандартной формы:

$$(x, y) = (x(\xi, \eta), y(\xi, \eta)), \quad (\xi, \eta) \in \hat{\Omega} \quad (2.10)$$

При таком подходе операторы градиента произвольной скалярной величины и дивергенции векторной величины $\mathbf{v}$, используемые в безразмерной системе уравнений (2.7 - 2.9), преобразуются следующим образом:

$$\nabla f = \frac{1}{J} \left[\frac{\partial f}{\partial \xi} g^\xi + \frac{\partial f}{\partial \eta} g^\eta \right] \quad (2.11)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = \frac{1}{J} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (J v_\xi) + \frac{\partial}{\partial \eta} (J v_\eta) \right] \quad (2.12)$$

где $J(\xi, \eta)$ – Якобиан перехода, определяемый соотношением:

$$J(\xi, \eta) = \frac{\partial(x, y)}{\partial(\xi, \eta)} = \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \eta} - \frac{\partial x}{\partial \eta} \frac{\partial y}{\partial \xi} \quad (2.13)$$

А контравариантные компоненты скорости v_ξ, v_η выражаются через физические компоненты скорости u, v :

$$v_\xi = u \frac{\partial \xi}{\partial x} + v \frac{\partial \xi}{\partial y} \quad (2.14)$$

$$v_\eta = u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y}$$

Таким образом, безразмерная система уравнений (2.7-2.9) формально может быть записана в криволинейных координатах следующим образом:

$$\begin{cases}
\frac{\partial(\rho v_\xi)}{\partial t} + \frac{1}{J} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(J \left(\rho v_\xi^2 + p - \tau_{\xi\xi} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(J \left(\rho v_\xi v_\eta + p - \tau_{\xi\eta} \right) \right) \right] = \rho F_\xi \\
\frac{\partial(\rho v_\eta)}{\partial t} + \frac{1}{J} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(J \left(\rho v_\xi v_\eta + p - \tau_{\eta\xi} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(J \left(\rho v_\eta^2 + p - \tau_{\eta\eta} \right) \right) \right] = \rho F_\eta \\
\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{J} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (J \rho v_\xi) + \frac{\partial}{\partial \eta} (J \rho v_\eta) \right] = 0 \\
\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \frac{1}{J} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(J \left(\rho e v_\xi + p v_\xi - v_\xi \tau_{\xi\xi} - v_\eta \tau_{\xi\eta} + q_\xi \right) \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(J \left(\rho e v_\eta + p v_\eta - v_\xi \tau_{\xi\eta} - v_\eta \tau_{\eta\eta} + q_\eta \right) \right) \right] = 0
\end{cases} \quad (2.15)$$

Граничные условия прилипания на твёрдых стенках области при такой записи имеют следующий общий вид:

$$v_\xi|_{\partial\Omega} = 0, \quad v_\eta|_{\partial\Omega} = 0 \quad (2.16)$$

граничные условия для температуры:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\partial\Omega} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \xi}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \xi}\right)^2}} \frac{\partial T}{\partial \xi} \bigg|_{\partial\Omega} = 0 \quad (2.17)$$

Учитывая значительное усложнение численной схемы, связанное с появлением метрических коэффициентов, и повышенные требования к генерации согласованной криволинейной сетки, практическое численное решение задачи выполняется непосредственно в исходной декартовой системе координат x, y . Такой подход позволяет использовать проверенные конечно-разностные алгоритмы и существенно упростить расчётную схему, сохраняя при этом приемлемую точность учёта сложной геометрии.

Стационарное решение исследуемой задачи определяется путём интегрирования исходной нестационарной системы уравнений по времени до достижения условий установившегося состояния. Таким образом, в рамках данного исследования стационарный режим рассматривается как предельное состояние при $t \rightarrow \infty$, когда временные изменения искомых полей плотности, скорости и температуры становятся пренебрежимо малыми.

2.2. Разностная схема для системы двумерных уравнений

Для численного решения безразмерной системы уравнений (2.7-2.9) применяется метод переменных направлений [41, 11, 203, 190]. Данный метод основан на неявной конечно-разностной аппроксимации, реализованной на регулярной декартовой сетке, и заключается в последовательном расщеплении исходной двумерной задачи на две одномерные задачи, решаемые последовательно по координатным направлениям x и y .

Запишем исходную систему уравнений в общем операторном виде:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = (L_x + L_y) \varphi + f \quad (2.18)$$

где L_x, L_y – одномерные дифференциальные операторы по направлениям x, y соответственно, f – источник (неоднородность).

Расщепление задачи на каждом шаге по времени $t_n \rightarrow t_{n+1} = t_n + \tau$ осуществляется в два этапа следующим образом:

$$\begin{cases} \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_x \right) \varphi^{n+1/2} = \left(E + \frac{\tau}{2} \tilde{L}_y \right) \varphi^n + \frac{\tau}{2} \tilde{f}^n \\ \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_y \right) \varphi^{n+1} = \left(E + \frac{\tau}{2} \tilde{L}_x \right) \varphi^{n+1/2} + \frac{\tau}{2} \tilde{f}^{n+1/2} \end{cases} \quad (2.19)$$

где E – единичный оператор, $\tilde{L}_x, \tilde{L}_y$ – соответствующие конечно-разностные аппроксимации операторов L_x, L_y , τ – шаг по времени.

Для реализации метода переменных направлений область расчёта покрывается регулярной декартовой сеткой с постоянными шагами h_x, h_y по пространственным направлениям x, y ;

$$x_i = ih_x, y_j = jh_y, t_n = n\tau, i = 0, \dots, N_x, j = 0, \dots, N_y \quad (2.20)$$

Схема представлена на рис. 2.1.

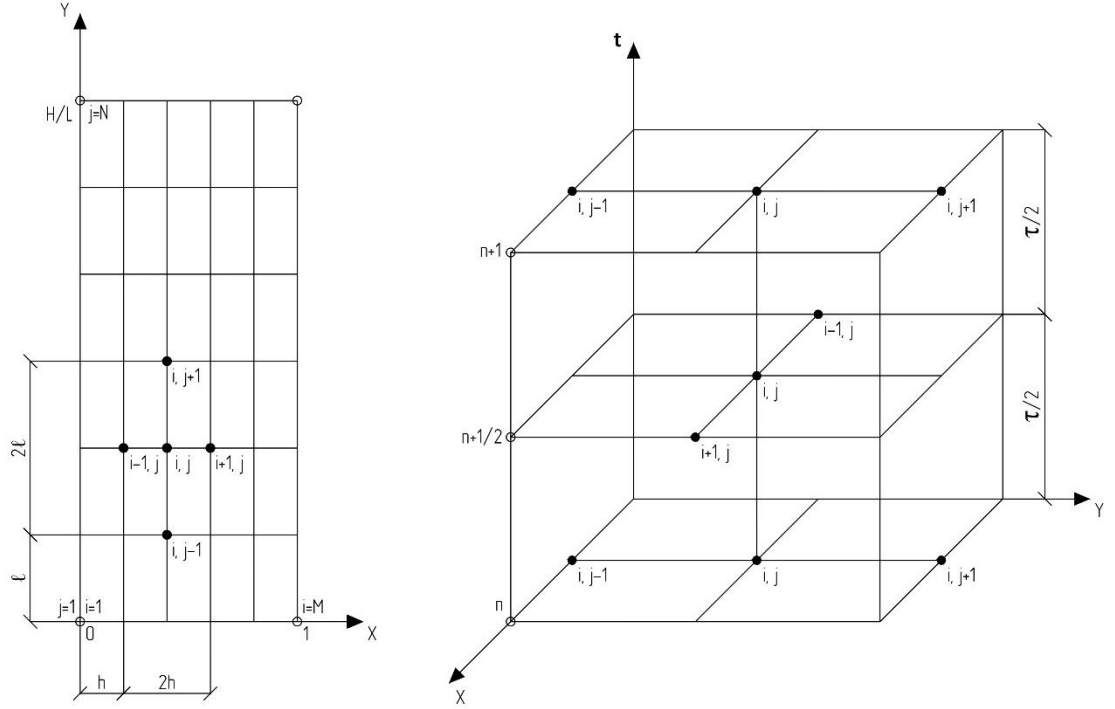


Рис. 2.1. Двумерная схема переменных направлений

Обозначим значения искомых функций в узлах сетки как:

$$\varphi_{i,j}^n = \varphi(x_i, y_j, t_n) \quad (2.21)$$

Для аппроксимации пространственных производных в сеточных узлах будем использовать центральные конечно-разностные формулы второго порядка точности.

Первые производные по пространственным направлениям x, y :

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right|_{i,j} \approx \frac{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i-1,j}}{2h_x}, \quad \left. \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right|_{i,j} \approx \frac{\varphi_{i,j+1} - \varphi_{i,j-1}}{2h_y} \quad (2.22)$$

Вторые производные по пространственным направлениям x, y

$$\left. \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \right|_{i,j} \approx \frac{\varphi_{i+1,j} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i-1,j}}{h_x^2}, \quad \left. \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \right|_{i,j} \approx \frac{\varphi_{i,j+1} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i,j-1}}{h_y^2} \quad (2.23)$$

Смешанная производная второго порядка аппроксимируется как:

$$\left. \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} \right|_{i,j} \approx \frac{\varphi_{i+1,j+1} - \varphi_{i+1,j-1} - \varphi_{i-1,j+1} + \varphi_{i-1,j-1}}{4h_x h_y} \quad (2.24)$$

Сложная форма границы области учитывается за счёт специальных приёмов задания граничных условий в узлах сетки, расположенных вблизи границы $\partial\Omega$. В частности, применяются подходы с фиктивными узлами и интерполяцией граничных условий.

Пусть узел (i, j) является граничным узлом, лежащим на криволинейной границе $\partial\Omega$, а узел $(i-1, j)$ – фиктивным узлом, расположенным вне расчётной области. Тогда значение функции φ в фиктивном узле выражается через значения функции в граничном узле и узле, расположенном внутри области $(i+1, j)$, что соответствует условию отражения для функций на границе:

$$\varphi_{i-1,j}^n = 2\varphi_{i,j}^n - \varphi_{i+1,j}^n \quad (2.25)$$

В случае задания на границе условий Дирихле ($\varphi|_{\partial\Omega}$), значение функции в граничном узле явно задаётся как:

$$\varphi_{i,j}^n = \varphi|_{\partial\Omega}(x_i, y_j, t_n) \quad (2.26)$$

где $\varphi|_{\partial\Omega}$ – известная функция, определяющая граничные условия.

При задании условий Неймана (условий производной по нормали к границе $\frac{\partial\varphi}{\partial n}$), аппроксимация граничных условий записывается следующим образом:

$$\frac{\varphi_{i+1,j}^n - \varphi_{i-1,j}^n}{2h_x} = \varphi|_{\frac{\partial\varphi}{\partial n}}(x_i, y_j, t_n) \quad (2.27)$$

Откуда выражение для значения функции в фиктивном узле определяется по формуле:

$$\varphi_{i-1,j}^n = \varphi_{i+1,j}^n - 2h_x \varphi|_{\frac{\partial\varphi}{\partial n}}(x_i, y_j, t_n) \quad (2.28)$$

Таким образом, аппроксимирующая конечно-разностная схема для численного решения безразмерной системы дифференциальных уравнений

(2.7-2.9), реализованная в рамках метода переменных направлений, записывается следующим образом::

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{xu} \right) u^{n+1/2} = \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{yu} \right) u^n + \frac{\tau}{2} \tilde{f}_u^{n+1/2} \\ \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{xv} \right) v^{n+1/2} = \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{yv} \right) v^n + \frac{\tau}{2} \tilde{f}_v^{n+1/2} \\ \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{x\rho} \right) \rho^{n+1/2} = \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{y\rho} \right) \rho^n \\ \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{xT} \right) T^{n+1/2} = \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{yT} \right) T^n + \frac{\tau}{2} \tilde{f}_T^{n+1/2} \\ \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{yu} \right) u^{n+1} = \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{xu} \right) u^{n+1/2} + \frac{\tau}{2} \tilde{f}_u^{n+1} \\ \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{yv} \right) v^{n+1} = \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{xv} \right) v^{n+1/2} + \frac{\tau}{2} \tilde{f}_v^{n+1} \\ \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{y\rho} \right) \rho^{n+1} = \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{x\rho} \right) \rho^{n+1/2} \\ \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{yT} \right) T^{n+1} = \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{xT} \right) T^{n+1/2} + \frac{\tau}{2} \tilde{f}_T^{n+1} \end{array} \right. \quad (2.29)$$

где E – единичный оператор; $\tilde{L}_{xu}, \tilde{L}_{xv}, \tilde{L}_{x\rho}, \tilde{L}_{xT}, \tilde{L}_{yu}, \tilde{L}_{yv}, \tilde{L}_{y\rho}, \tilde{L}_{yT}$ – конечно-разностные одномерные операторы по направлениям x и y .

Для промежуточного шага $\left(n + \frac{1}{2} \right)$ разностные операторы по направлению x имеют вид:

$$\begin{aligned} \tilde{L}_{xu} u^{n+1/2} &= \frac{4}{3h_x^2} \frac{(\mu_{i+1/2,j} u_{i+1,j}^{n+1/2} - (\mu_{i+1/2,j} + \mu_{i-1/2,j}) u_{i,j}^{n+1/2} + \mu_{i-1/2,j} u_{i-1,j}^{n+1/2})}{\rho_{i,j}^n C_R} - u_{i,j}^{n+1/2} \frac{u_{i+1,j}^{n+1/2} - u_{i-1,j}^{n+1/2}}{2h_x} \\ \tilde{L}_{xv} v^{n+1/2} &= \frac{\mu_{i+1/2,j} v_{i+1,j}^{n+1/2} - (\mu_{i+1/2,j} + \mu_{i-1/2,j}) v_{i,j}^{n+1/2} + \mu_{i-1/2,j} v_{i-1,j}^{n+1/2}}{h_x^2 \rho_{i,j}^n C_R} - v_{i,j}^{n+1/2} \frac{v_{i+1,j}^{n+1/2} - v_{i-1,j}^{n+1/2}}{2h_x} \\ \tilde{L}_{x\rho} \rho^{n+1/2} &= - \frac{u_{i+1,j}^{n+1/2} \rho_{i+1,j}^{n+1/2} - u_{i-1,j}^{n+1/2} \rho_{i-1,j}^{n+1/2}}{2h_x} \\ \tilde{L}_{xT} T^{n+1/2} &= \frac{\chi(k_{i+1/2,j} T_{i+1,j}^{n+1/2} - (k_{i+1/2,j} + k_{i-1/2,j}) T_{i,j}^{n+1/2} + k_{i-1/2,j} T_{i-1,j}^{n+1/2})}{h_x^2 \rho_{i,j}^{n+1/2} C_{v,i,j} C_R Pr} - T_{i,j}^{n+1/2} \frac{T_{i+1,j}^{n+1/2} - T_{i-1,j}^{n+1/2}}{2h_x} \end{aligned} \quad (2.30)$$

Аналогичным образом записываются конечно-разностные операторы по направлению y для полного шага по времени $(n+1)$.

Также для каждого направления определены соответствующие правые части $\tilde{f}_u$, $\tilde{f}_v$, $\tilde{f}_T$ учитывающие вклад источниковых членов и нелинейные члены дифференциальных уравнений:

$$\tilde{f}_u^{n+1/2} = -\frac{1}{\chi \rho_{i,j}^n C_H^2} \frac{p_{i+1,j}^n - p_{i-1,j}^n}{2h_x} + \frac{\delta_v^n}{4h_x h_y \rho_{i,j}^n C_R} + C_{F_x} \quad (2.31)$$

где вязкий член δ_v^n вычисляется как:

$$\begin{aligned} \delta_v^n = & \left(\mu_{i,j+1} - \frac{2}{3} \mu_{i+1,j} \right) v_{i+1,j+1}^n + \left(\frac{2}{3} \mu_{i+1,j} - \mu_{i,j+1} \right) v_{i+1,j-1}^n \\ & + \left(\frac{2}{3} \mu_{i-1,j} - \mu_{i,j+1} \right) v_{i-1,j+1}^n + \left(\mu_{i,j-1} - \frac{2}{3} \mu_{i-1,j} \right) v_{i-1,j-1}^n \end{aligned} \quad (2.32)$$

Аналогично определяется разностный оператор по направлению u .

Разностный оператор для температуры T представлен выражением:

$$\tilde{f}_T^{n+1/2} = \frac{\mu_{i,j} \chi (\chi - 1) C_H^2}{\rho_{i,j}^{n+1/2} C_{v_{i,j}} C_R} \phi^{n+1/2} - \frac{T_{i,j}^n}{C_{v_{i,j}}} (\chi - 1) \left(\frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2h_x} - \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j-1}}{2h_y} \right)^{n+1/2} \quad (2.33)$$

где диссипативная функция $\phi^{n+1/2}$ вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned} \phi^{n+1/2} = & 2 \left[\left(\frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2h_x} \right)^2 + \left(\frac{v_{i,j+1} - v_{i,j-1}}{2h_y} \right)^2 \right] + \\ & + \left[\left(\frac{u_{i,j+1} - u_{i,j-1}}{2h_y} + \frac{v_{i+1,j} - v_{i-1,j}}{2h_x} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2h_x} + \frac{v_{i,j+1} - v_{i,j-1}}{2h_y} \right)^2 \right]^{n+1} \end{aligned} \quad (2.34)$$

Замыкание системы уравнений осуществляется с использованием стандартных зависимостей от температуры, задаваемых в узлах сетки:

$$\begin{aligned} p_{i,j}^n &= \rho_{i,j}^n \cdot T_{i,j}^n, \quad C_{v_{i,j}} = C_v(T_{i,j}^n), \quad k_{i,j} = k(T_{i,j}^n), \\ \mu_{i,j} &= \mu(T_{i,j}^n), \quad \mu_{i+1/2} = \mu(T_{i+1/2,j}^n), \quad T_{i+1/2,j} = \frac{1}{2}(T_{i+1,j} + T_{i,j}) \end{aligned} \quad (2.35)$$

Представленная конечно-разностная схем (2.29-2.35) аппроксимирует исходную систему дифференциальных уравнений (2.7-2.9) со вторым порядком точности по пространственным координатам $O(h_x^2 + h_y^2)$ и первым порядком точности по времени $O(\tau)$.

Полученные после дискретизации одномерные разностные уравнения системы (2.29), имеют стандартную трёхдиагональную структуру, что позволяет эффективно использовать метод прогонки. В общем виде каждое из одномерных разностных уравнений для промежуточного шага по направлению x можно представить следующим образом:

$$a_{i,j}^{n+1/2} \varphi_{i+1,j}^{n+1/2} + b_{i,j}^{n+1/2} \varphi_{i,j}^{n+1/2} + c_{i,j}^{n+1/2} \varphi_{i-1,j}^{n+1/2} = f_{i,j}^{n+1/2} \quad (i = 2, 3, \dots, M-1) \quad (2.36)$$

Аналогично для полного шага по направлению y :

$$a_{i,j}^{n+1} \varphi_{i,j+1}^{n+1} + b_{i,j}^{n+1} \varphi_{i,j}^{n+1} + c_{i,j}^{n+1} \varphi_{i,j-1}^{n+1} = f_{i,j}^{n+1} \quad (i = 2, 3, \dots, N-1) \quad (2.37)$$

При расчётах в области сложной формы, границы которой не совпадают с линиями координатной сетки, метод прогонки модифицируется за счёт специального подхода к заданию граничных условий. В частности, для узлов, прилегающих к криволинейной границе области $\partial\Omega$, вместо простых граничных условий вида $\varphi(0, y) = \varphi_{1,j}$, $\varphi(1, y) = \varphi_{M,j}$, ($j = 2, 3, \dots, N-1$) используется ранее описанный подход с фиктивными узлами и интерполяцией (2.25-2.28).

В таком случае рекуррентные формулы прямой прогонки, заключающейся в переносе граничных условий с левого конца направо [102, 94, 199], по направлению x принимают вид:

$$A_i = \frac{a_i}{b_i - c_i A_{i-1}}, \quad B_i = \frac{f_i - c_i B_{i-1}}{b_i - c_i A_{i-1}} \quad (i = 2, 3, \dots, M-1) \quad (2.38)$$

Перенос граничных условий с правого конца налево, а также вычисление значений функции φ_i в узлах сетки выполняется с использованием метода обратной прогонки:

$$\varphi_i = A_i \varphi_{i+1} + B_i \quad (i = M-1, \dots, 3, 2) \quad (2.39)$$

Аналогично метод прогонки применяется для решения разностных уравнений по направлению y .

В результате решения, на основе заданных величин $u_{i,j}^n$, $v_{i,j}^n$, $\rho_{i,j}^n$, $T_{i,j}^n$, определяются поля $u_{i,j}^{n+1/2}$, $v_{i,j}^{n+1/2}$, $\rho_{i,j}^{n+1/2}$, $T_{i,j}^{n+1/2}$, и затем окончательные значения на новом временном слое $u_{i,j}^{n+1}$, $v_{i,j}^{n+1}$, $\rho_{i,j}^{n+1}$, $T_{i,j}^{n+1}$.

Схема данной системы горизонтальных и вертикальных прогонок представлена на рис. 2.2.

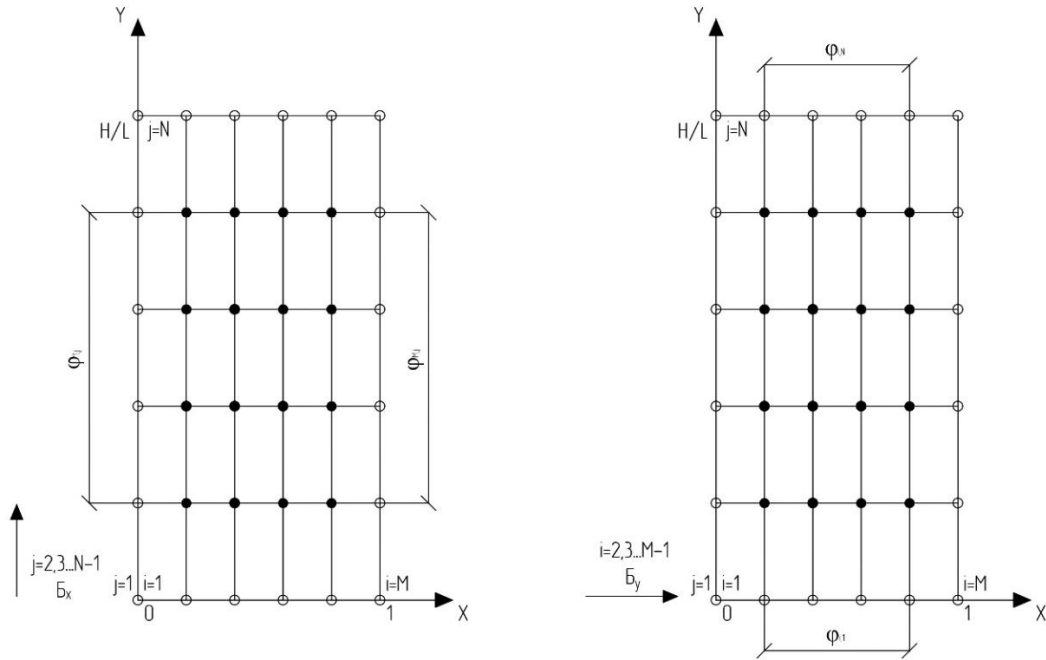


Рис. 2.2. Системы горизонтальных и вертикальных прогонок

2.3. Устойчивость разностной схемы

На сегодняшний день известно большое количество работ, посвящённых различным подходам оценки устойчивости различных разностных схем: априорные оценки (принцип максимума) [242, 243, 207]; методы операторных неравенств [242]; спектральные методы [102, 242, 243, 134, 159,].

Так в работе И. Ю Браиловской посвящённой численному решению двумерного уравнения Навье-Стокса [82], условия устойчивости явной разностной схемы с пересчетом инерционных членов имеет вид:

$$\tau \leq \min \left\{ \frac{h^2}{8\nu}, \frac{h}{|u| + |v| + \frac{\sqrt{2}}{C_M}} \right\} \quad (2.40)$$

В явной схеме J. W. Kurzrocka, R. E. Matesa [26], при аппроксимации производных центральными разностями, условие устойчивости имеет вид:

$$\tau \leq \min\{a, b\}$$

$$a = \frac{1}{\frac{u}{h} + \frac{v}{\ell} + \frac{2\chi}{C_R Pr} \left(1 + \frac{h^2}{\ell^2}\right)}; \quad b = \frac{\frac{u}{h} + \frac{v}{\ell}}{\left(\frac{u}{h} + \frac{v}{\ell} + \frac{1}{h C_M} \sqrt{1 + \frac{h^2}{\ell^2}}\right)^2} \quad (2.41)$$

Общее условие устойчивости явной схемы в двумерном случае в своей работе приводит А. А. Игнатьев [130]:

$$\tau \leq \frac{\rho h^2}{\mu} \min\left(\frac{Pr}{4\gamma}, \frac{3}{14}\right) \quad (2.42)$$

Еще один вариант устойчивости явной схемы для данного уравнения описан ЕКРЕ W. К [15]:

$$\tau = C \cdot \min\left(\frac{\ell^2 u h}{4v}, \frac{r}{|u|_{\max}}\right) \quad (2.43)$$

В ходе экспериментальных и численно-аналитических исследований, выполненных В. И. Полежаевым [188, 189, 190], в контексте моделирования установившихся структур течения и теплопереноса в ограниченных расчётных доменах под воздействием внешнего силового поля, было обосновано достаточное с точки зрения практической устойчивости условие, применимое для численного интегрирования рассматриваемых уравнений:

$$\tau = \min(h, \ell) \cdot C_M \quad (2.44)$$

Такой численный подход основан на моделировании нестационарного течения с последующим переходом к установившемуся режиму, что обеспечивает физически обоснованное начальное состояние вычислений. При этом формирование начального распределения переменных направлено на подавление нежелательных флуктуаций и исключение влияния неустойчивых возмущений, способных исказить динамику приближения к стационарному решению. Подобная стратегия широко используется в практике

вычислительных экспериментов благодаря своей надёжности и способности обеспечить устойчивое достижение установившегося состояния.

2.4. Особенности программной реализации

Представленный выше алгоритм течения и теплообмена однокомпонентного сжимаемого вязкого и теплопроводного газа был реализован в виде фреймворка «SAFHE».

Данный фреймворк разработан по схеме MVC (Model-View-Controller) в рамках которой содержит сервисы, структурно разделенные на три группы: блок моделей (Model), блок представлений (View) и блок пользователей (Controller).

На рис. 2.3 представлена блок-схема разработанного фреймворка.

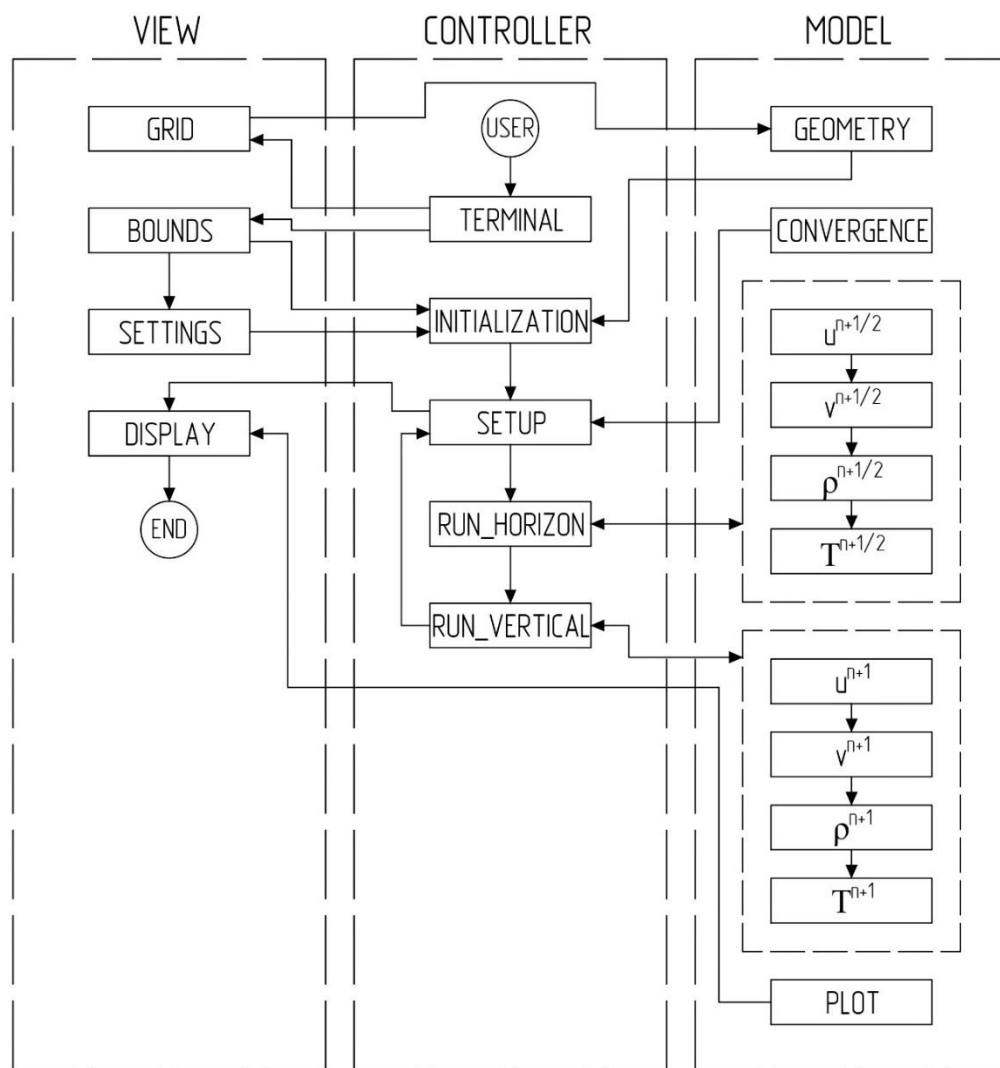


Рис. 2.3. Блок-схема фреймворка «SAFHE»

Выбранная схема архитектуры программного обеспечения – MVC позволяет довольно просто управлять и поддерживать базы кода, а также обеспечивает возможность повторного использования компонентов и способствует более модульному подходу к разработке программного обеспечения.

Компонент **Model** отвечает за обработку данных и определяет структуру программы. Модель реагирует на команды, поступающие от контроллера, и либо предоставляет необходимую информацию, либо изменяет своё состояние.

Компонент **View** отвечает за визуализацию данных, полученных от модели. Его задача – отображать информацию на уровне пользовательского интерфейса, обеспечивая взаимодействие с пользователем.

Компонент **Controller** обрабатывает действия пользователя и передаёт их модели, чтобы внести изменения в модель. Данный блок содержит логику приложения.

Фреймворк «SAFHE» строится из нескольких блоков, структура которых напоминает микросервисную архитектуру:

TERMINAL: модуль обработки интерфейса командной строки построенный на экземпляре `argparse.ArgumentParser`. Является контейнером для спецификаций аргументов, который имеет параметры, применимые ко всему анализатору.

GEOMETRY: модель определяет размеры расчетной области вдоль оси.

INITIALIZATION: функциональный модуль, предназначенный для формирования исходных данных, необходимых для запуска численного расчёта. В его задачи входит вычисление безразмерных параметров и определение начальных и граничных условий, используемых в модели. Кроме того, реализована передача рассчитанных значений в соответствующие массивы, содержащие поля искомым величин $u_{i,j}$, $v_{i,j}$, $\rho_{i,j}$, $T_{i,j}$.

SETUP: блок контроля, внутри которого производятся необходимые вычисления при переходе от одного временного слоя к другому (2.8) и

осуществляет интегральные проверки решения. Так же данный модуль проводит логирование процесса работы моделей прогонки.

RUN_HORIZON: модель прямых и обратных горизонтальных прогонок, в рамках которой решаются первые четыре уравнения (промежуточный слой по времени $n+1/2$) системы (2.29). В результате решения определяются поля $u_{i,j}^{n+1/2}$, $v_{i,j}^{n+1/2}$, $\rho_{i,j}^{n+1/2}$, $T_{i,j}^{n+1/2}$ (2.36).

RUN_VERTICAL: модель прямых и обратных вертикальных прогонок, в рамках которой решаются последние четыре уравнения (целый слой по времени $n+1$) системы (2.29). В результате решения определяются поля $u_{i,j}^{n+1}$, $v_{i,j}^{n+1}$, $\rho_{i,j}^{n+1}$, $T_{i,j}^{n+1}$ (Ошибка! Источник ссылки не найден.).

DISPLAY: модуль, предназначенный для вывода на печать координат расчетных точек и значений полей зависимых переменных.

Основной блок и подпрограммы данного фреймворка написаны на языке программирования Python, так как благодаря множеству библиотек, данный язык сильно облегчает процесс создания программ.

2.5. Численное исследование течения при конвекции газа в православных храмах

Рассмотрим задачу численного исследования течения и теплообмена сжимаемого вязкого и теплопроводного газа (воздуха) в замкнутой области сложной геометрической конфигурации, соответствующей внутреннему пространству православного храма (рис. 2.4). Граница расчётной области состоит из нескольких участков с разными температурными условиями [150].

Определим два типа граничных условий: нагретые поверхности, имеющие постоянную температуру T_{w_1} , и охлаждаемые поверхности, с постоянной температурой T_{w_2} , при этом выполняется неравенство $T_{w_1} > T_{w_2}$.

В рамках численного моделирования будем считать, что теплоёмкостные характеристики и значение числа Прандтля не изменяются, тогда как вязкость и теплопроводность среды рассматриваются как

температурозависимые величины, определяемые соотношением Сатерленда (2.45).

$$\tilde{\mu} = T^{3/2}, \quad \frac{1 - \bar{C}}{T + \bar{C}} \quad (2.45)$$

Для определения критериев подобия и масштабов физических параметров, учитывающих геометрию области, введём репрезентативный масштаб L , характеризующий характерный линейный размер области. Масштаб скорости задаётся выражением

Масштаб скорости V_1 примем равным:

$$V_1 = \sqrt{\chi R T_{w_1}} \quad (2.46)$$

В качестве характерной температуры принимается значение, соответствующее охлаждаемой границе области $T_1 = T_{w_1}$, коэффициенты вязкости и теплопроводности при этом нормируются на значения, рассчитанные при этой температуре, $k_1 = k(T_{w_1})$, $\mu_1 = \mu(T_{w_1})$, а плотность газа нормируется к значению на нагретой стенке: $\rho_1 = \rho(T_{w_2})$. Такой подход позволяет корректно учитывать температурную зависимость в рамках безразмерной постановки задачи.

Данные масштабы позволяют записать безразмерные комплексы (2.8) следующим образом:

$$C_M = 1, \quad C_R = \frac{L \rho(T_{w_2}) \sqrt{\chi R T_{w_1}}}{\mu(T_{w_1})}, \quad C_{F_x} = \frac{g L \sin(\alpha)}{\chi R T_{w_1}}, \quad C_{F_y} = \frac{g L \cos(\alpha)}{\chi R T_{w_1}} \quad (2.47)$$

где α – угол наклона направления действия силы тяжести относительно вертикальной оси.

Таким образом, полный набор критериев подобия, характеризующих физические процессы в сложной расчётной области, включает следующие величины:

$$Pr, \quad \chi, \quad C_{F_x}, \quad C_{F_y}, \quad \frac{C}{T_{w_1}}, \quad Gr_L = \frac{C_R^2 C_F (T_{w_2} - T_{w_1})}{T_{w_1}} \quad (2.48)$$

где Gr_L – представляет собой модифицированное число Грасгофа, описывающее соотношение между силами, вызывающими термическое поднятие потока, и сопротивлением вязкой природы среды; $Pr, \chi, \frac{C}{T_{w_1}}$ – характеризуют влияние молекулярных свойств газа на течение и теплоперенос; $\frac{T_{w_2}}{T_{w_1}}$ – отражает степень сжимаемости, обусловленной тепловым градиентом; C_{F_x}, C_{F_y} определяют роль внешнего силового воздействия, действующего в направлении объёмных ускорений.

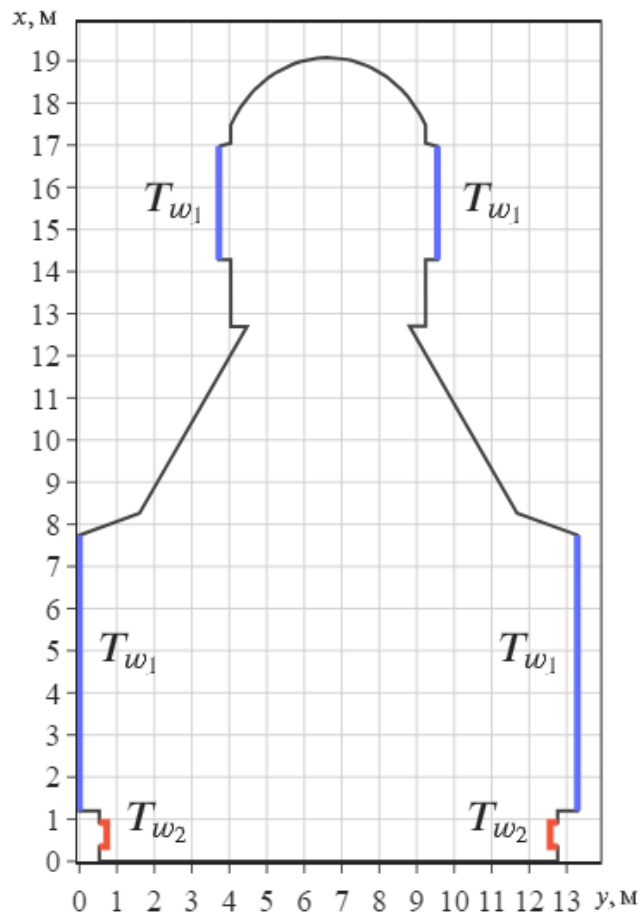


Рис. 2.4. Общая схема расчетной области

Местные тепловые потоки на нагретой и холодной стенках определяются с использованием следующей формулы:

$$q_w(y) = k_w \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_w \quad (2.49)$$

При учёте сложной формы границы области все граничные условия задаются в пространстве координат, привязанном к криволинейному контуру. Как уже было сказано ранее, это реализуется путём выделения граничных узлов, ближайших к реальной поверхности, и дальнейшей корректировки (интерполяцией) их характеристик через фиктивные узлы. Благодаря этому возможно корректно учитывать наклоны и кривизну стенок.

Локальные значения тепловых потоков на границах сложной формы определяются по формуле:

$$q_w(S) = k_w \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_w \quad (2.50)$$

где n – внешняя нормаль к границе, а S – координата, задающая положение точки на границе.

Средний тепловой поток вдоль границы области вычисляется путём интегрирования по криволинейному контур:

$$\bar{q}_w = \frac{1}{L_{\partial\Omega}} \int_0^{\partial\Omega} q_w(S) dS \quad (2.51)$$

где $L_{\partial\Omega}$ – полная длина криволинейного участка границы.

Для численного интегрирования применяется формула трапеций, адаптированная к криволинейной границе:

$$\bar{q}_w = \frac{1}{N-1} \left(\frac{q_w(1) + q_w(N)}{2} + \sum_{j=2}^{N-1} q_w(j) \right) \quad (2.52)$$

В стационарном режиме проверяется баланс массы воздуха в горизонтальных и вертикальных сечениях, который имеет вид:

$$\int_0^{\partial\Omega_x} \rho u dy = 0, \quad \int_0^{\partial\Omega_y} \rho v dx = 0 \quad (2.53)$$

Среднее число Нуссельта, характеризующее интенсивность теплообмена на границе области сложной формы, определяется как:

$$\bar{Nu}_{wL} = \frac{\bar{q}_w L}{k_w (T_{w2} - T_{w1})} \quad (2.54)$$

2.6. Расчет течения и теплообмена в слое газа. Влияние дискретизации на точность расчета

Результаты моделирования, выполненного на основе начальной конфигурации, соответствующей равновесному распределению неподвижного газа в области (2.55) представлены на рис. 2.6 – рис. 2.12.

$$u^o = 0, \quad v^o = 0, \quad \frac{\partial p^o}{\partial \xi} = -\chi \rho C_F, \quad \rho^o = \frac{p^o}{T^o} \quad (2.55)$$

где T^o – решение уравнения теплопроводности.

Для оценки влияния разного шага сетки на итоговые решения была исследована сходимость по среднему числу Нуссельта, вычисляемому вдоль граничной кривой $\partial\Omega$.

Пусть $\bar{Nu}_h(x)$ – поле «местного» (линейно осреднённого или интегрального) числа Нуссельта на сетке с шагом h . Введём следующую норму (среднеквадратичную ошибку):

$$\delta_{rms}(h_i, h_{i+1}) = \sqrt{\frac{1}{L_{\partial\Omega}} \sum_{i=1}^{\partial\Omega} [\bar{Nu}_{h_i}(S) - \bar{Nu}_{h_{i+1}}(S)]^2 dS} \quad (2.56)$$

где S – дуговая координата вдоль всей криволинейной границы $\partial\Omega$, а $L_{\partial\Omega}$ – её полная длина. В численном расчёте интеграл по $\partial\Omega$ заменим на сумму по узлам, лежащим на границе или в непосредственной близости к ней:

$$\delta_{rms}(h_i, h_{i+1}) = \sqrt{\frac{1}{L_{\partial\Omega}} \sum_{j=1}^{N_{\partial\Omega}} w_j [\bar{Nu}_{h_i}(S_j) - \bar{Nu}_{h_{i+1}}(S_j)]^2} \quad (2.57)$$

где $N_{\partial\Omega}$ – число граничных узлов, а w_j – «вес» шага по дуге в окрестности точки S_j .

На практике в роли $\bar{Nu}_{h_i}(S_j)$ берётся усреднённое по небольшой локальной окрестности (на шаг сетки) значение «местного» числа Нуссельта:

$$\bar{Nu}_{h_i}(S) = \frac{q_w(S)L}{k_w(T_{w_2} - T_{w_1})} \quad (2.58)$$

где q_w – тепловой поток через границу в точке с координатой S .

Таким образом, учитывается реальная (искривлённая) граница, и сравниваются решения на разных сетках h_i и h_{i+1} .

В общем виде метрику среднеквадратичной ошибки можно представить так:

$$E_h = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{Nu}_{h_i} - \bar{Nu}_{h_{i+1}})^2} \quad (2.59)$$

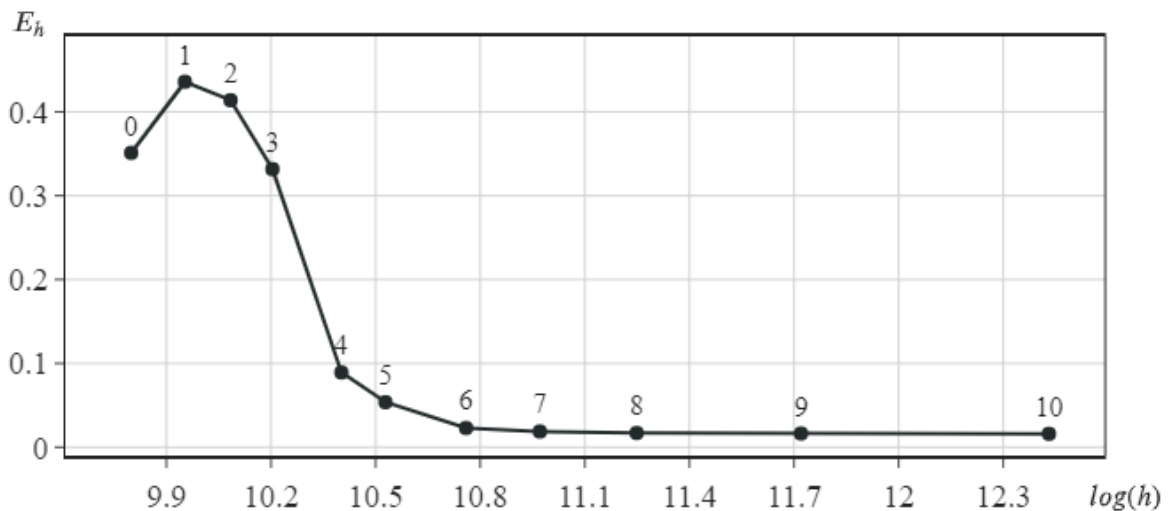


Рис. 2.5. Влияние изменения числа узлов сетки на среднеквадратичную ошибку числа Нуссельта

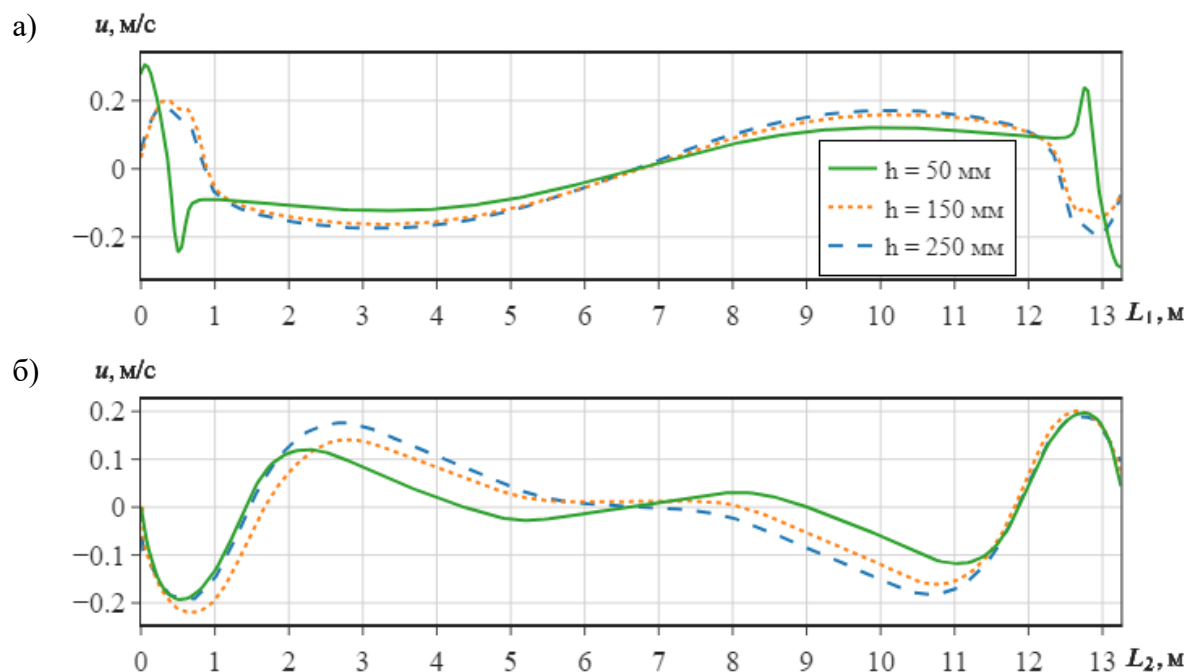
На логарифмическом графике, приведённом на рис. 2.5, отображено, как изменяется ошибка, возникающая при расчёте среднего числа Нуссельта, в зависимости от размера пространственного шага сетки h . Характер кривой показывает, что начиная с определённого уровня сгущения сетки – ориентировочно с шестого варианта разбиения – дальнейшее уменьшение шага практически не влияет на величину ошибки. Это указывает на достижение численной сходимости: решение стабилизируется, а вклад сеточной погрешности становится незначительным, что подтверждает адекватность выбранной дискретизации при моделировании.

Наиболее точные результаты были получены на максимально сгущённой сетке, включающей 250 475 узлов: для неё среднеквадратичное отклонение по числу Нуссельта не превысило 1.5 %. При уменьшении числа

узлов до 37 356 ошибка возросла до 6.3 %, а при использовании грубой сетки из 21 013 узлов достигла уже 42.6 %. Более того, при дальнейшем укрупнении шага пространственной дискретизации наблюдались проблемы со сходимостью численного метода, что указывает на потерю устойчивости итерационного процесса.

Для оценки влияния дискретизации на структуру течения и температурные поля были сопоставлены решения, полученные на трёх сетках с различным шагом: 47067 узлов ($h=250$ мм), 58159 узлов ($h=150$ мм) и 250475 узлов ($h=50$ мм). Анализ выполнялся в ряде сечений: трёх горизонтальных (на уровнях 1700 мм, 7700 мм и 16000 мм от пола, обозначенных как *а*, *б* и *в* соответственно) и одном вертикальном, проходящем через центральную часть основного объёма храма на расстоянии 6200 мм от боковых стен (обозначено как *г*). Результаты визуализированы на рисунках на рис. 2.6 – рис. 2.10 и демонстрируют качественное сходство для достаточно плотных сеток, подтверждая достижение сеточной независимости.

Так же результаты расчета иллюстрируются рисунками линий тока $\psi = \text{const}$ (рис. 2.11) и полей температуры (рис. 2.12),



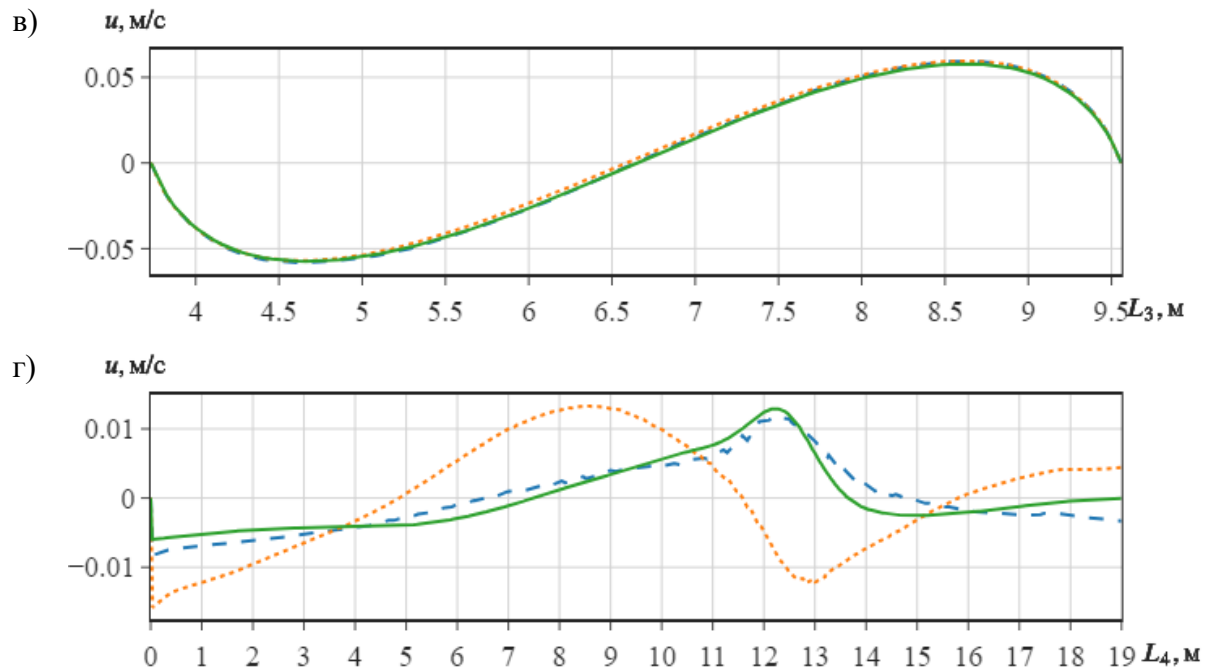
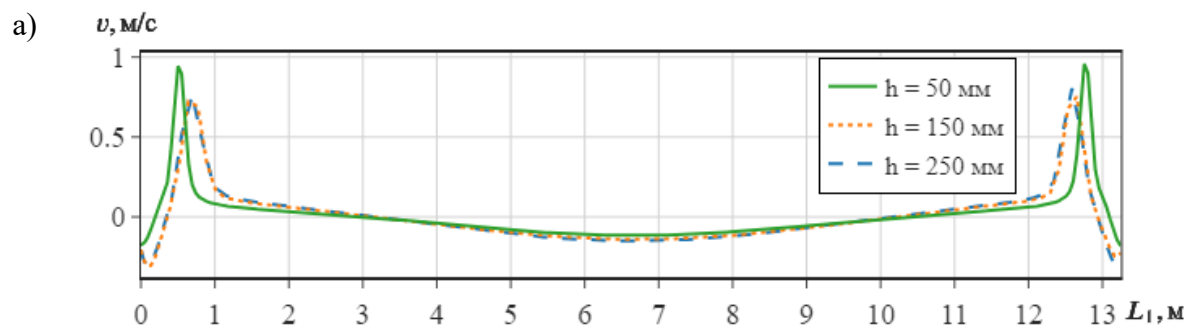


Рис. 2.6. Профили вертикальной составляющей скорости а) $y=1700$ мм; б) $y=7700$ мм; в) $y=16000$ мм; г) $x=6200$ мм

Анализ полученных данных демонстрирует удовлетворительное совпадение результатов для распределения плотности и температуры (рис. 2.9, рис. 2.10). Однако распределение скорости характеризуется меньшей точностью согласования. Особенно заметно влияние аппроксимации первого порядка по плотности на границе (2.60): оно проявляется в продольных $v(y)$ (рис. 2.7) и вертикальных $u(x)$ (рис. 2.6) компонентах скорости, а также в распределении плотности вблизи границ (рис. 2.9). Этот эффект объясняется высокими значениями скоростных составляющих в областях, прилегающих к стенкам.

$$\frac{\rho_{1,j}^{n+1/2} - \rho_{1,j}^n}{\tau/2} = -\rho_{1,j}^n \frac{u_{2,j}^{n+1/2}}{h} \quad \text{или} \quad \rho_{1,j}^{n+1/2} = \rho_{1,j}^n \left(1 - \frac{u_{2,j}^{n+1/2} \tau}{2h} \right) \quad (2.60)$$



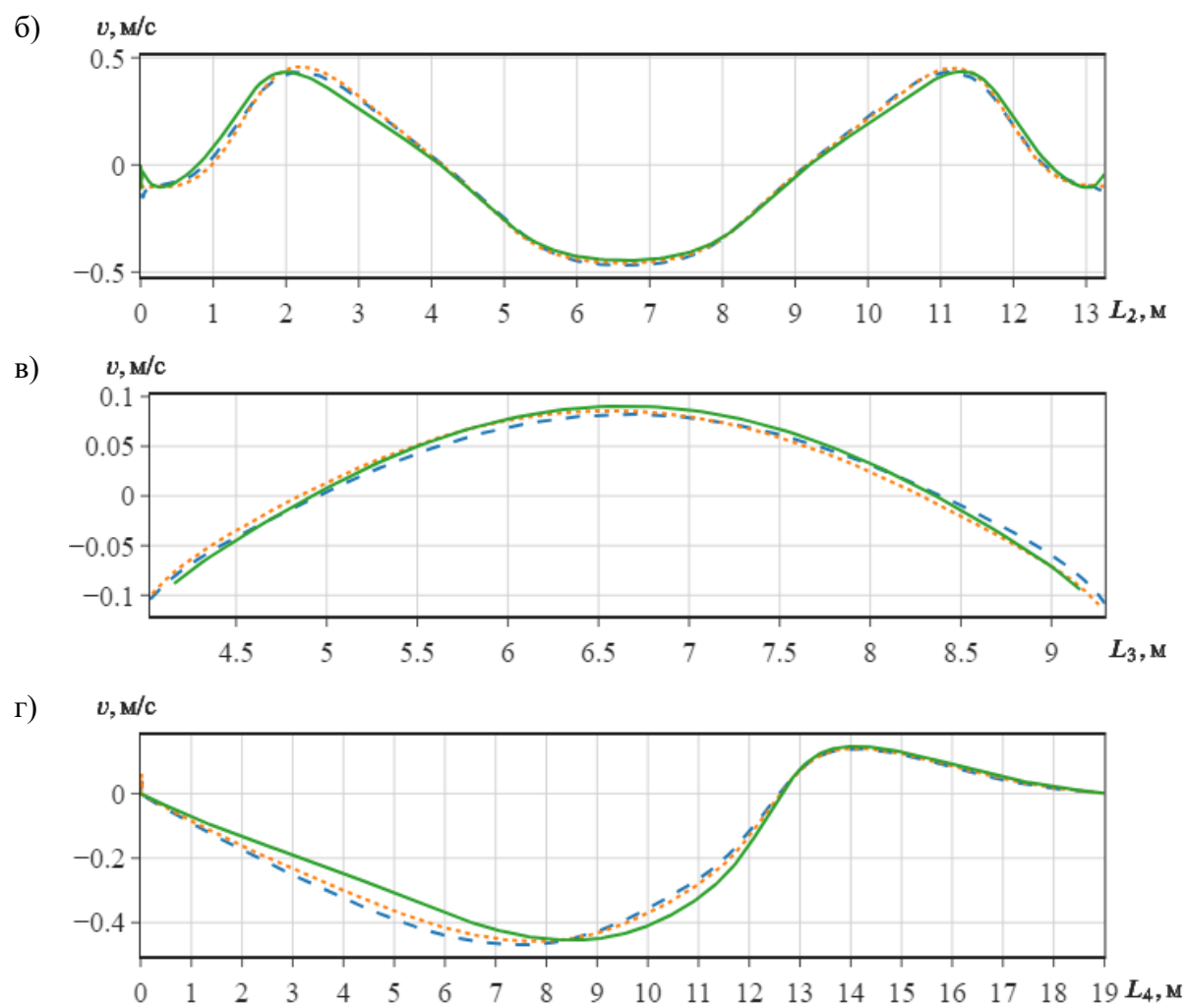
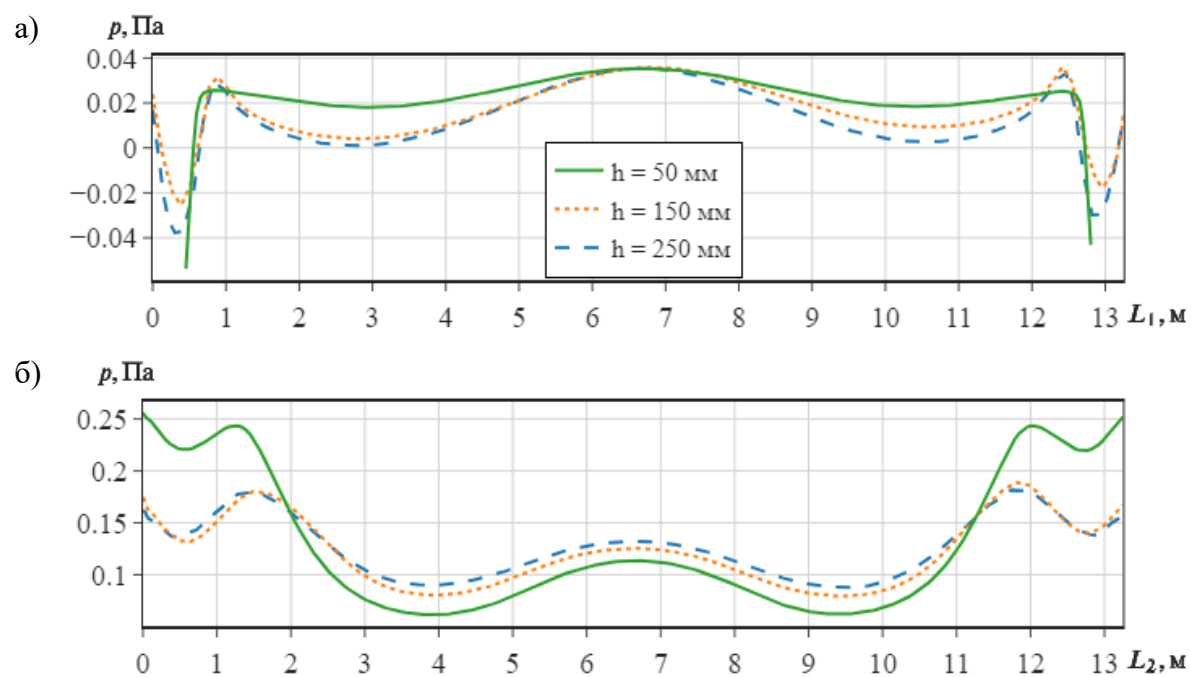


Рис. 2.7. Профили продольной составляющей скорости а) $y=1700$ мм; б) $y=7700$ мм; в) $y=16000$ мм; г) $x=6200$ мм



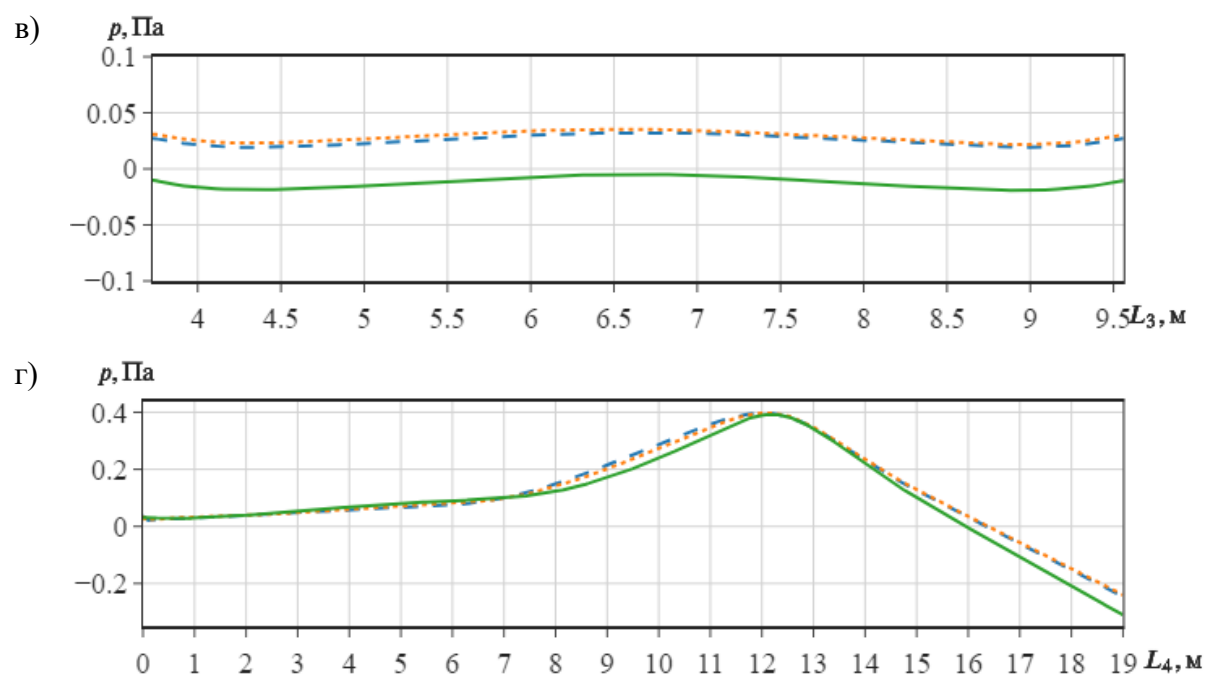
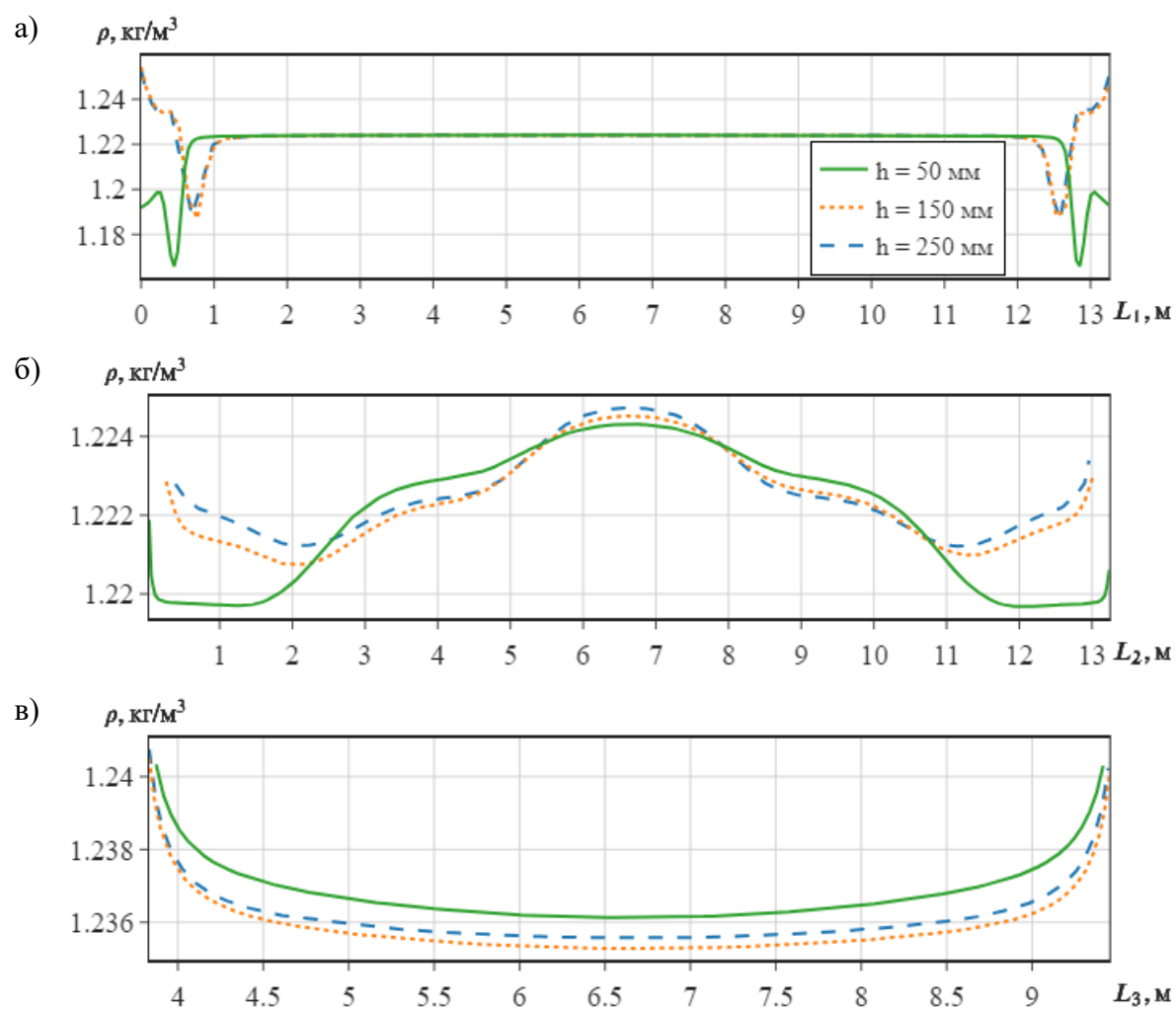


Рис. 2.8. Профили давления а) $y=1700$ мм; б) $y=7700$ мм; в) $y=16000$ мм; г) $x=6200$ мм



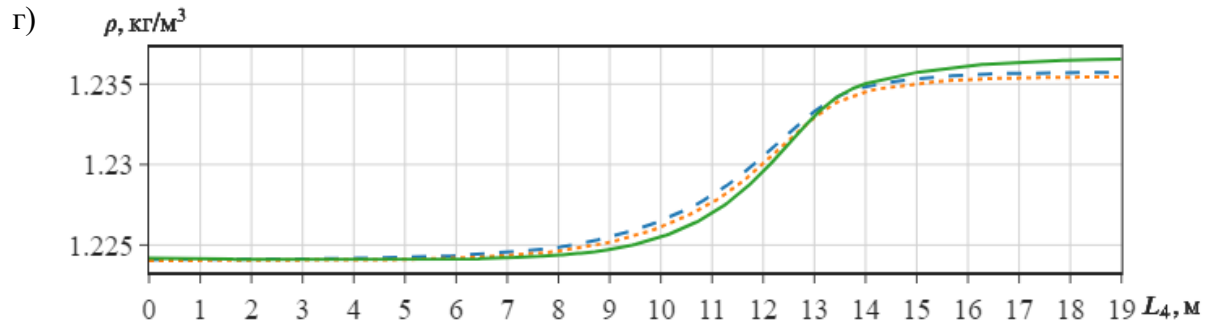


Рис. 2.9. Профили плотности а) $y=1700$ мм; б) $y=7700$ мм; в) $y=16000$ мм; г) $x=6200$

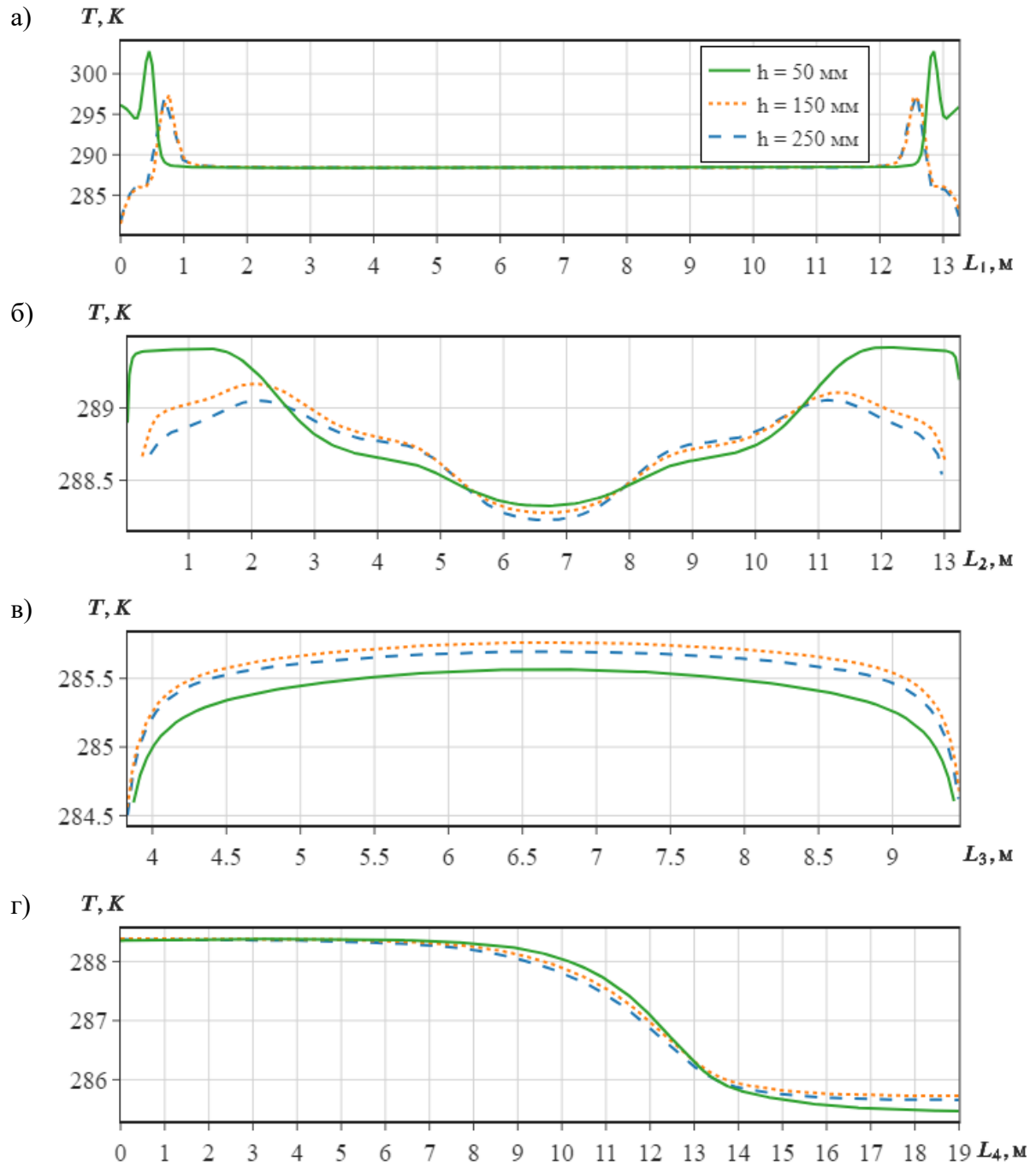


Рис. 2.10. Профили температуры а) $y=1700$ мм; б) $y=7700$ мм; в) $y=16000$ мм; г) $x=6200$ мм

В данной задаче движение газа вызвано неравномерным распределением плотностей и подъемных сил в следствие конвективного переноса тепла.

В области, относящейся к центральной части храма, наблюдается выраженное неравномерное распределение плотности воздуха, обусловленное температурным контрастом между нагретыми поверхностями радиаторов и охлаждёнными участками, расположенными вблизи окон (рис. 2.9 г). Вследствие того, что плотность у тёплой стены меньше, чем у холодной, возникает восходящий поток вдоль радиатора и нисходящий – вблизи окна. Между этими зонами, в районе верхней границы радиатора, формируется характерная циркуляционная ячейка, в которой замкнутый поток воздуха направлен по замкнутой траектории. Визуализация структуры этого движения приведена рис. 2.11.

Из-за отсутствия в барабане нагретых поверхностей плотность находящегося там газа выше, чем в центральной части храма что способствует его опусканию вниз, где на выходе из барабана он встречается с восходящими потоками, нагретыми радиаторами. В результате этого в данной области так же образуется циркуляционное движение с малыми скоростями.

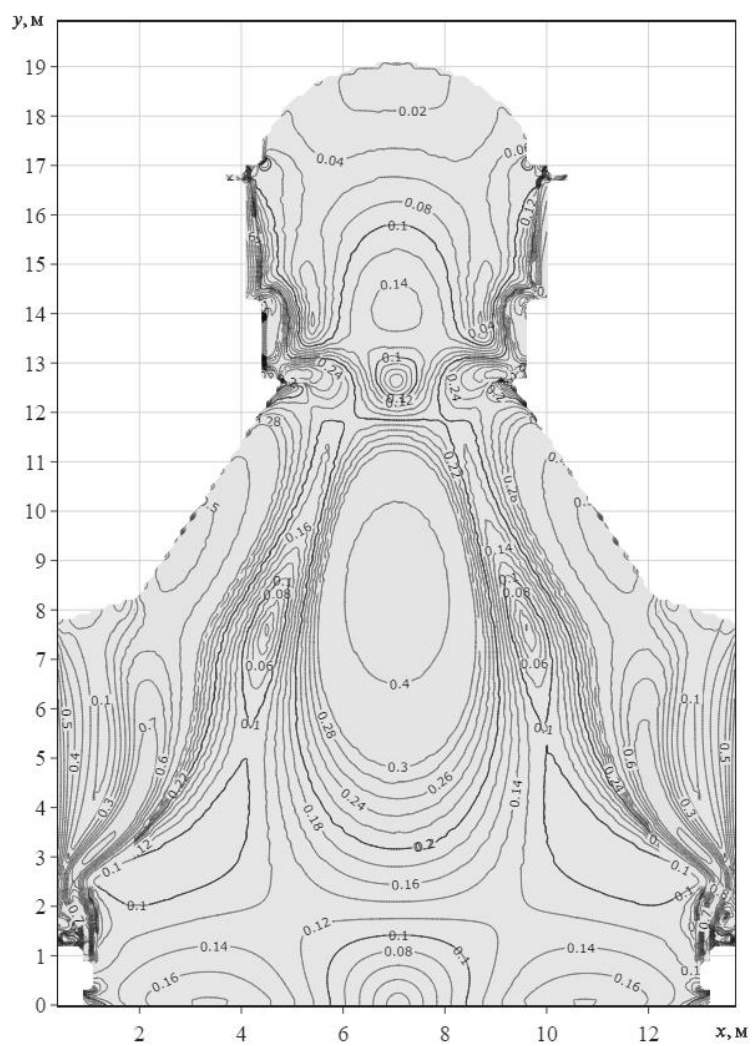


Рис. 2.11. Линии тока

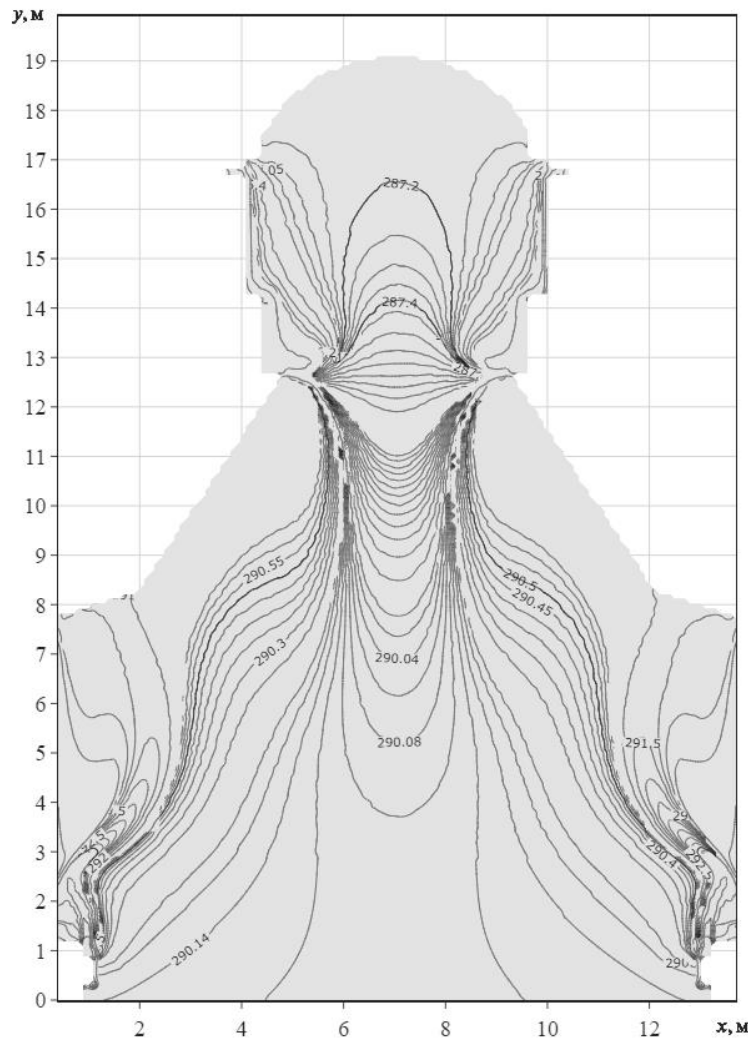


Рис. 2.12. Поле температуры

2.7. Выводы по второй главе

1. Разработана математическая модель течения и теплообмена при конвекции идеального сжимаемого вязкого и теплопроводного газа внутри православного храма.
2. Через разность решений на последовательных сетках доказана сеточная сходимость разработанной модели по параметру среднеквадратичной ошибки среднего числа Нуссельта.
3. Разработана программно-алгоритмическая реализация данной модели в виде фреймворка «SAFHE» написанного по схеме MVC.
4. С помощью разработанного фреймворка проведено численное исследование течения при конвекции газа в православном храме. Рассчитаны

распределения местных значений основных вычисляемых величин u , v , p , ρ , T на основе которых определены линии тока и поля температур в центральном сечении храма.

5. В ходе численного моделирования выявлено, что использование сеток с числом узлов менее 37356 приводит к значительной ошибке в расчетах (42,6%), что подчеркивает необходимость использования более детализированных сеток для корректного описания течений газа.

6. Результаты численных расчетов показали наличие зон циркуляционного движения воздуха в центральной части храма, вызванных неравномерным распределением плотностей и подъемных сил, а также в области барабана, что свидетельствует о сложности теплового режима в данном пространстве и необходимости точной настройки вентиляционных систем для его оптимизации.

3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУШНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПРАВОСЛАВНЫХ ХРАМАХ

3.1. Численное моделирование в комплексе ANSYS Fluent

Для описания движения воздуха была принята основная система уравнений движения Навье-Стокса (Рейнольдса):

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_z)}{\partial z} = 0 \\
 & \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_x)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_x \bar{u}_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_x \bar{u}_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_x \bar{u}_z)}{\partial z} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial x} - \frac{2}{3} \delta_{xx} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \right) + \frac{\partial \mu}{\partial x} \right] + \\
 & \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_x}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial x} - \frac{2}{3} \delta_{yx} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \right) + \frac{\partial \mu}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_x}{\partial z} + \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial x} - \frac{2}{3} \delta_{zx} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \right) + \frac{\partial \mu}{\partial z} \right] \\
 & + \bar{\rho} g_x (1 - \beta(T - T_{ref})) + \bar{\rho} \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \bar{\rho} \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \bar{\rho} \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \\
 & \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_y)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_y \bar{u}_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_y \bar{u}_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_y \bar{u}_z)}{\partial z} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_y}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial y} - \frac{2}{3} \delta_{xy} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial y_k} \right) + \frac{\partial \mu}{\partial x} \right] + \\
 & \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_y}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial y} - \frac{2}{3} \delta_{yy} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial y_k} \right) + \frac{\partial \mu}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_y}{\partial z} + \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial y} - \frac{2}{3} \delta_{zy} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial y_k} \right) + \frac{\partial \mu}{\partial z} \right] + \\
 & \bar{\rho} g_y (1 - \beta(T - T_{ref})) + \bar{\rho} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \bar{\rho} \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \bar{\rho} \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \\
 & \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_z)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_z \bar{u}_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_z \bar{u}_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_z \bar{u}_z)}{\partial z} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_z}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial z} - \frac{2}{3} \delta_{zx} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial z_k} \right) + \frac{\partial \mu}{\partial x} \right] + \\
 & \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_z}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial z} - \frac{2}{3} \delta_{zy} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial z_k} \right) + \frac{\partial \mu}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_z}{\partial z} + \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial z} - \frac{2}{3} \delta_{zz} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial z_k} \right) + \frac{\partial \mu}{\partial z} \right] + \\
 & \bar{\rho} g_z (1 - \beta(T - T_{ref})) + \bar{\rho} \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \bar{\rho} \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \bar{\rho} \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \\
 & \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{e})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{e} \bar{u}_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{e} \bar{u}_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{e} \bar{u}_z)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right) + \\
 & \bar{\rho} \bar{u}_x g_x + \bar{\rho} \bar{u}_y g_y + \bar{\rho} \bar{u}_z g_z - \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (\bar{\rho} D_x) - \\
 & \frac{\partial}{\partial y} (\bar{\rho} D_y) - \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} D_z) + \Phi + S_h
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

где $\bar{\rho}$ – осредненная плотность, $\bar{e}$ – осредненная внутренняя энергия на единицу массы, $\bar{u}_x, \bar{u}_y, \bar{u}_z$ – компоненты осредненной скорости по соответствующим осям, β – коэффициент теплового расширения, δ_{ij} – коэффициент Кронекера, k – коэффициент теплопроводности, $\bar{T}$ – осредненная температура, T_{ref} – опорная температура g_x, g_y, g_z – компоненты вектора ускорения свободного падения, D_x, D_y, D_z – диффузионные потоки энергии по соответствующим осям, Φ – диссипация тепла за счет вязкости (3.14), S_h – дополнительный источник тепла, $\bar{p}$ – осредненное давление, μ – динамическая вязкость, τ_{ij} – компоненты тензора напряжений в турбулентном потоке, t – время, x, y, z – координаты в трехмерном пространстве.

Для её замыкания использовалась стандартная модель турбулентности « k - ε » [25, 193] состоящая из уравнения кинетической энергии турбулентности k и уравнения скорости диссипации турбулентной энергии ε .

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial(\bar{\rho}k)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}k\bar{u}_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{\rho}k\bar{u}_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{\rho}k\bar{u}_z)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right] + P_k - \bar{\rho}\varepsilon \\ \frac{\partial(\bar{\rho}\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\varepsilon\bar{u}_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{\rho}\varepsilon\bar{u}_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{\rho}\varepsilon\bar{u}_z)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \bar{\rho} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu\varepsilon}} \end{array} \right. \quad (3.2)$$

где $\bar{\rho}$ – осредненная плотность, k – кинетическая энергия турбулентности, ε – скорость диссипации турбулентной энергии, $\bar{u}_x, \bar{u}_y, \bar{u}_z$ – компоненты средней скорости по соответствующим осям, μ – динамическая вязкость, μ_t – турбулентная вязкость, ν – кинематическая вязкость, σ_k – эмпирический коэффициент модели « k - ε », σ_ε – коэффициент диффузии для ε ,

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ – эмпирические константы модели « k - ε », P_k – генерация турбулентной кинетической энергии.

Для описания генерации турбулентности использовалось уравнение учитывающее турбулентное напряжение и производные осреднённой скорости (3.3) полученное путем аппроксимации турбулентных напряжений с использованием гипотезы Буссинеска (3.4).

$$P_k = \nu_t \left[\left(\frac{\partial \bar{u}_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}_z}{\partial z} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \right] + P_b \quad (3.3)$$

$$\bar{u}'_i \bar{u}'_j = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.4)$$

где k – кинетическая энергия турбулентности, δ_{ij} – дельта Кронекера (единичная матрица), P_b – член учитывающий эффект плавучести, $\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ – турбулентная вязкость, C_μ – эмпирическая константа модели, определяемая как:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{k U^*}{\varepsilon}} \quad (3.5)$$

где A_0, A_s – эмпирические коэффициенты, U^* – напряжённость турбулентности:

$$U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \Omega_{ij} \Omega_{ij}} \quad (3.6)$$

где S_{ij} – тензор деформации скорости (симметричная часть градиента скорости), Ω_{ij} – тензор вихревой деформации (асимметричная часть градиента скорости).

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad \Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.7)$$

С целью учета влияния градиента плотности на генерацию турбулентности, уравнение (3.3) содержит член P_b который определяется как:

$$P_b = \beta g_x \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x} + \beta g_y \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial y} + \beta g_z \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3.8)$$

где β – коэффициент теплового расширения, g_x, g_y, g_z – компоненты вектора ускорения свободного падения, μ_t – турбулентная вязкость, Pr_t – число Прандтля, $\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z}$ – градиенты температуры по соответствующим координатам.

Для обеспечения плавного перехода между различными режимами течения вблизи стенок и учета сложных профилей скорости и температуры вдоль них, было учтено возникновение сложных взаимодействий между вязкостными и турбулентными силами.

Это было реализовано путем введения дополнительного условия для стенок, позволяющего моделировать течения в вязкостном подслое (3.9) и логарифмическом слое (3.10).

$$u^+ = y^+ \quad (3.9)$$

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + B \quad (3.10)$$

где u^+ – безразмерная скорость, y^+ – безразмерная координата, κ – константа Кармана, B – аддитивная константа.

Для дополнительного учета теплопередачи вблизи стенок, в уравнение сохранения энергии в основную систему уравнения (3.1) добавляются члены, учитывающие теплопроводность и турбулентную теплопередачу:

$$q = - \left(\alpha + \frac{\nu_t}{Pr_t} \right) \nabla T \quad (3.11)$$

где $q = (q_x, q_y, q_z)$ – вектор теплового потока, $\nabla T = \left(\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z} \right)$ – градиент температуры, Pr_t – турбулентное число Прандтля, ν_t – турбулентная

кинематическая вязкость, α – молекулярная теплопроводность, определяемая как:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (3.12)$$

где ρ – плотность, k – теплопроводность, C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении.

С целью учета эффекта плавучести в уравнение движения и энергии основной системы (3.1), вводятся дополнительные источники силы, зависящие от разности плотностей.

Это реализовано с использованием модели Буссинеска за счет предположения, что плотность изменяется линейно с температурой и концентрацией, кроме тех случаев, когда плотность умножается на гравитацию.

Эффект плавучести в уравнение движения (3.1) выражается как:

$$\bar{\rho} g_i (1 - \beta (T - T_{ref})) \quad (3.13)$$

Учет тепловых потерь в результате внутренних трений и турбулентной диссипации, в уравнение сохранения энергии (3.1) описывается следующим образом:

$$\Phi = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3.14)$$

В таблице представлены значения эмпирических констант, используемые для описанной выше модели турбулентности « k - ε ».

Табл. 3.1. Набор коэффициентов для модели турбулентности « k - ε »

C_1	η	S	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	C_μ	σ_k	σ_ε	A_0
$\max\left(0.43, \frac{\eta}{\eta + 5}\right)$	$S \frac{k}{\varepsilon}$	$\sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$	1.44	1.92	0.09	1	1.2	4.04

3.2. Поиск оптимальных углов открытия приточных и вытяжных фрамуг методом градиентного спуска

Метод градиентного спуска – это итерационный оптимизационный алгоритм, который используется для нахождения минимума (или максимума) целевой функции. Его идея заключается в обновлении параметров модели в направлении, противоположном градиенту целевой функции относительно этих параметров, чтобы уменьшить значение данной функции.

В рамках задачи о поиске оптимальных углов открытия приточных и вытяжных фрамуг целевая функция (3.15) представляет собой отклонение температуры, скорости и расхода воздуха от расчетных параметров микроклимата в обслуживаемой зоне основных помещений храма [149], описанных в СП 391.1325800.2017 «Храмы православные. Правила проектирования» [219].

$$f(\theta) = w_T (T(\theta) - T_{target})^2 + w_Q (Q(\theta) - Q_{target})^2 + w_v (v(\theta) - v_{target})^2 \quad (3.15)$$

где $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ – вектор углов открытия фрамуг, $T(\theta)$ – температура воздуха в храме при углах открытия фрамуг θ , $Q(\theta)$ – расход воздуха в храме при углах открытия фрамуг θ , $v(\theta)$ – скорость воздуха в храме при углах открытия фрамуг θ , w_T, w_Q, w_v – весовые коэффициенты для температуры, расхода воздуха и скорости воздуха, соответственно.

На каждом шаге итерации необходимо найти вектор частных производных целевой функции $f(\theta)$ относительно углов открытия фрамуг θ . Для этого требуется определить, как изменение угла открытия каждой фрамуги влияет на температуру, расход и скорость воздуха:

$$\nabla f(\theta_i) = \left(\frac{\partial f}{\partial \theta_1}, \frac{\partial f}{\partial \theta_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial \theta_n} \right) \quad (3.16)$$

Частные производные $\partial f / \partial \theta_i$ будем аппроксимировать численными методами, используя небольшие изменения угла открытия фрамуги и повторные вычисления температуры, расхода и скорости воздуха.

$$\frac{\partial f}{\partial \theta_i} \approx \frac{f(\theta_t + m e_i) - f(\theta_t)}{m} \quad (3.17)$$

где m – малое приращение угла открытия, e_i – единичный вектор, соответствующий изменению только θ .

Углы открытия фрамуг обновляются в направлении, противоположном градиенту целевой функции:

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \frac{\eta \hat{m}_t}{\sqrt{\hat{v}_t} + m} \quad (3.18)$$

где η – скорость обучения.

Выбор скорости обучения η критичен для успешного применения метода градиентного спуска, так как слишком большая η может привести к пропуску минимума и нестабильному поведению алгоритма, а слишком маленькая замедлит сходимость, увеличивая количество итераций.

Поэтому для улучшения сходимости будем использовать адаптивный метод изменения скорости обучения, заключающийся в учете накопленного градиента предыдущих шагов для экспоненциального сглаживания траектории оптимизации.

Данный подход использует момент первого порядка m_t , который хранит экспоненциально усредненный градиент:

$$m_t = \beta_1 m_{t-1} + (1 - \beta_1) \nabla f(\theta_t) \quad (3.19)$$

где m_t – параметр момента.

Для адаптации скорости обучения для каждого параметра, данный алгоритм хранит экспоненциально усредненные квадраты градиентов v_t :

$$v_t = \beta_2 v_{t-1} + (1 - \beta_2) (\nabla f(\theta_t))^2 \quad (3.20)$$

где v_t – параметр для сглаживания квадратов градиентов.

На первых итерациях алгоритм может быть смещен из-за того, что m_t и v_t начинаются с нулевых значений. Для этого необходимо ввести коррекцию смещения, чтобы устранить эту инициализационную ошибку:

$$\hat{m}_t = \frac{m_t}{1 - \beta_1^t} \quad (3.21)$$

$$\hat{v}_t = \frac{v_t}{1 - \beta_2^t} \quad (3.22)$$

где t – номер итерации.

После вычисления скорректированных значений момента и экспоненциально сглаженных квадратов градиентов, параметры обновляются по формуле (3.18).

Процесс обновления продолжается до тех пор, пока не будет достигнут один из критериев остановки:

- Изменение функции $f(\theta)$ становится меньше заданного порога;
- Достигнуто максимальное количество итераций.
- Значение градиента $f(\theta)$ становится достаточно малым.

В разработанном в ходе данной работы фреймворке «SAFHE» была реализована модель позволяющая осуществлять поиск оптимальных углов открытия приточных и вытяжных фрамуг методом градиентного спуска на основе моделей, предназначенных для машинного обучения: модель *GradientBoostingClassifier* (*scikit-learn*), модель *CatBoost* (Яндекс) и модель *LightGBM* (*Microsoft*).

В *Ansys Workbench* так же существует возможность проведения различных типов параметрических исследований (полное факторное, центрально-композиционное, латинский гиперкуб и т. д.), в том числе с использованием различных алгоритмов оптимизации, включая генетические алгоритмы, градиентные методы, метод роя частиц и т. д.

В следующих параграфах будут представлены результаты определения оптимальных углов открытия приточных и вытяжных фрамуг для церкви во имя святого благоверного князя Александра Невского, собора Рождества Пресвятой Богородицы и кафедрального собора святого благоверного князя Александра Невского.

3.3. Компьютерная модель воздухообмена внутри церкви во имя святого благоверного князя Александра Невского

3.3.1. Разработка компьютерной модели

Исходная твердотелая 3D модель помещения храма (рис. 3.1) была разработана с использованием программного комплекса *Autodesk Revit*, реализующего концепцию информационного моделирования зданий (*Building Information Modeling*, BIM). Характерные геометрические параметры моделируемого пространства были определены на основе данных, полученных в ходе детальных обмеров. Для оптимизации компьютерной модели отдельные элементы расчетной области, такие как оконные рамы и колонны, были упрощены без утраты ключевых характеристик.

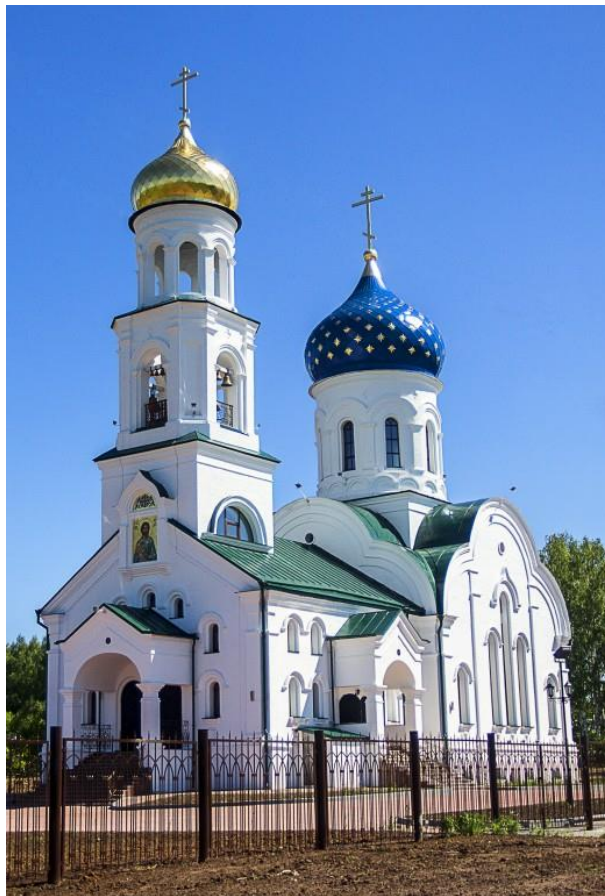


Рис. 3.1. BIM модель церкви во имя святого благоверного князя Александра Невского

Задача была сформулирована в трехмерной постановке. Твердотельная модель, созданная в *Autodesk Revit*, была экспортирована в *SpaceClaim* для подготовки расчетной области, представляющей собой внутренний объем

храма (рис. 3.2). Размеры расчетной области составляют: длина $A = 15.8$ м, шириной $B = 12.2$ м и высотой $C = 22.3$ м. Модель была адаптирована для численных расчетов, включая уточнение границ и характеристик расчетной области [151].



Рис. 3.2. Геометрия расчетной области церкви во имя святого благоверного князя Александра Невского

В рамках данной компьютерной модели рассматривалось 3 тепловых режима помещения для различных периодов года: летний, зимний и переходный.

В качестве граничных условий задавались: стены притвора и нефа, полы, крыша, своды, барабан, купол, радиаторы, двери, окна, воздуховоды, вытяжные и приточные фрамуги на окнах. Граничные условия для каждого периода года представлены в табл. 3.2. Ограждающие конструкции храма – непроницаемая адиабатическая стенка с абсолютной шероховатостью 1 мм (реальная стенка).

В качестве текучей среды (рабочей среды) в модели принят воздух с заданными параметрами, определенными для всех областей расчетной области: температура $T = 288.16$ К; давление $P_{\text{атм}} = 101325$ Па; динамическая вязкость $\mu = 1.7894 \cdot 10^{-5}$ Па·с, коэффициент теплового расширения $\beta = 0.003665$

K^{-1} , теплопроводность $\lambda = 0.0242 \text{ Вт/(м·К)}$, удельная теплоемкость $\lambda = 1006.43 \text{ Дж/(кг·К)}$.

Поскольку, как было сказано ранее, в задаче учитываются силы плавучести, параметр «гравитация» задается вдоль оси Z.

Табл. 3.2. Граничные условия для модели церкви во имя святого благоверного князя Александра Невского

№	Период	Название границы	Условие	Значение
1	Зима	Фрамуги (Ю)	Скорость воздуха	1.77 м/с
2	Зима	Фрамуги (С, В, З)	Избыточное давление	0 Па
3	Зима	Воздуховоды	Избыточное давление	0 Па
4	Зима		Наруж. температура воздуха	253.15 К
5	Зима	Двери	Температура поверхности	283.15 К
6	Зима	Стекла	Температура поверхности	278.15 К
7	Зима	Радиатор отопления	Температура поверхности	343.15 К
8	Лето	Фрамуги (З)	Скорость воздуха	1.77 м/с
9	Лето	Фрамуги (С, Ю, В)	Избыточное давление	0 Па
10	Лето	Воздуховоды	Избыточное давление	0 Па
11	Лето		Наруж. температура воздуха	296.15 К
12	Переход.	Фрамуги (З)	Скорость воздуха	1.77 м/с
13	Переход.	Фрамуги (С, Ю, В)	Избыточное давление	0 Па
14	Переход.	Воздуховоды	Избыточное давление	0 Па
15	Переход.		Наруж. температура воздуха	278.15 К
16	Переход.	Двери	Температура поверхности	285.15 К
17	Переход.	Стекла	Температура поверхности	283.15 К
18	Переход.	Радиатор отопления	Температура поверхности	343.15 К

Для создания сетки в *Ansys Fluent* сначала была определена область расчета и проведена очистка геометрии для устранения мелких дефектов и излишне сложных деталей (рис. 3.2). Затем был установлен глобальный размер ячеек сетки от 5 до 200 мм, что задает базовую крупность сетки по всей области.

Для более точного моделирования в критически важных зонах (в области радиаторов, фрамуг, сводов и т. п.) были применены локальные параметры сетки с размером ячеек от 1 до 20 мм, что позволяет лучше разрешить детали геометрии и важные физические явления в этих областях. Дополнительно, для корректного учета пристеночных эффектов и точного моделирования градиентов параметров вблизи стенок, был создан пристеночный слой, состоящий из 7 уровней с коэффициентом темпа роста

1.15. Это позволяет адекватно моделировать пограничный слой и улучшает точность расчетов вблизи стенок. Данные шаги обеспечили оптимальную комбинацию точности и вычислительной эффективности для численного моделирования, что в последующем было доказано в рамках исследования на «сеточную зависимость».

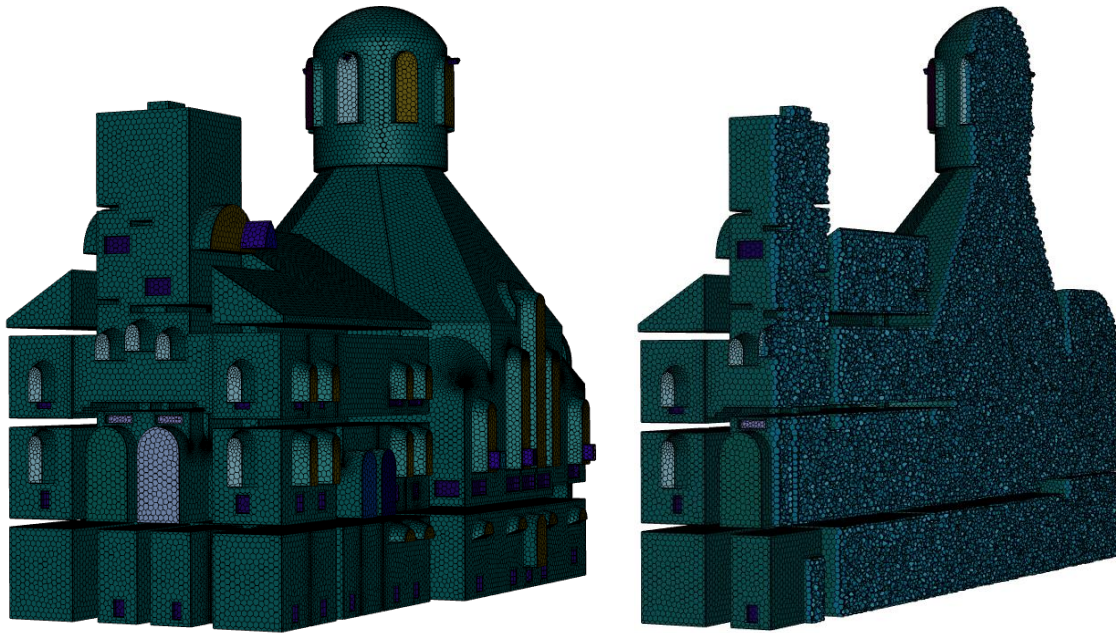


Рис. 3.3. Сеточная модель расчетной области церкви во имя святого благоверного князя Александра Невского

Аналогично исследуемой во 2 главе задаче о течении при конвекции газа в православных храмах, через разность решений на последовательных сетках была рассчитана среднеквадратичная ошибка (2.59) среднего числа Нуссельта (2.54).

Как показано на рис. 3.4, начиная с третьего этапа, зависимость погрешности, вызванной конечной величиной шага сетки h , становится практически неизменной, что свидетельствует о стабилизации решений.

Для самой мелкой сетки, содержащей 1456782 ячейки, среднеквадратичная ошибка числа Нуссельта $\bar{Nu}_{wL}$ составила 2,7%. На сетке с 444147 ячейками ошибка увеличилась до 6,7%, а для самой крупной сетки, включающей 99185 ячеек, она достигла 46,8%. При дальнейшем увеличении

шага h итерационный процесс перестает сходиться, что делает получение решений невозможным.

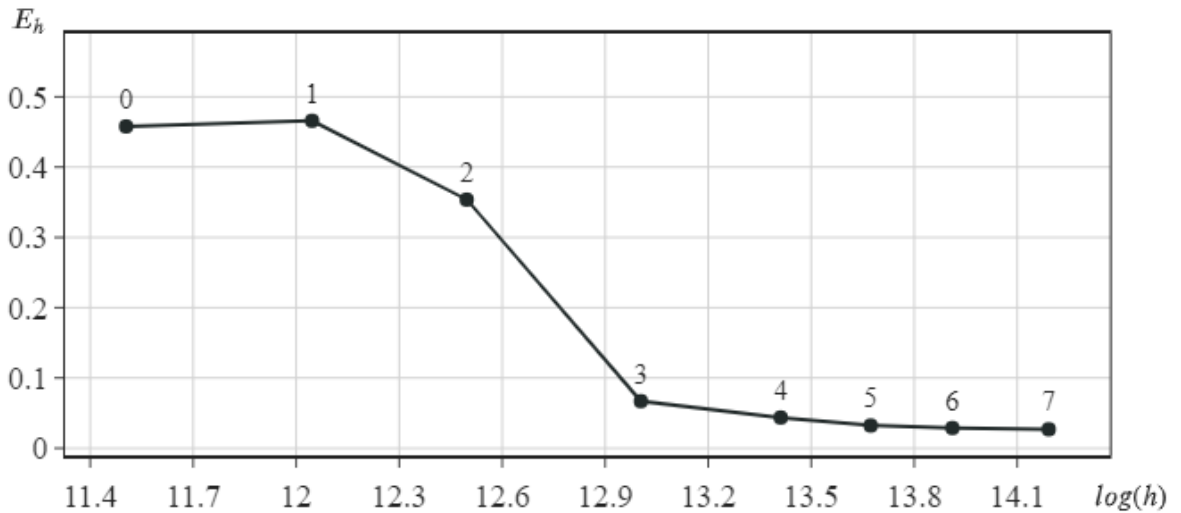


Рис. 3.4. Влияние изменения числа узлов сетки на среднеквадратичную ошибку числа Нуссельта

3.3.2. Поиск оптимальных углов открытия фрамуг

Оптимизационные задачи, включающие большое количество физических явлений, предъявляют высокие требования к вычислительным ресурсам, вследствие этого в рассматриваемой задаче угол открытия фрамуги исследовался не во всем диапазоне от 0° до 90° , а в рамках следующих значений: 0° , 30° , 60° . При инициализации все фрамуги имеют угол открытия 0° (закрыты).

В церкви во имя святого благоверного князя Александра Невского в нижнем ярусе основного объема расположено 6 фрамуг, ориентированных на север и юг, в барабане купола 4 фрамуги, ориентированные по четырем сторонам света, 2 фрамуги в нижней части колокольни, ориентированные на север и юг.

В качестве целевой функции выступает средневзвешенная по площади температура и скорость воздуха в горизонтальном сечении, проходящем на высоте 1.5 м от уровня пола в средней части храма и массовый расход воздуха через фрамуги.

Поиск оптимальных параметров проводился отдельно для каждого периода года (летний, зимний, переходный). Было проведено 531441 итераций в рамках каждого периода, в результате чего были найдены оптимальные значения углов открытия фрамуг (табл. 3.3).

Табл. 3.3. Оптимальные значения углов открытия фрамуг в зависимости от периода года

№	Обозначение на плане	Зимний период	Летний период	Переходный период
1	Приточная фрамуга ПЕ1	0°	30°	0°
2	Приточная фрамуга ПЕ2	0°	30°	30°
3	Приточная фрамуга ПЕ3	0°	30°	0°
4	Приточная фрамуга ПЕ4	60°	60°	60°
5	Приточная фрамуга ПЕ5	60°	60°	60°
6	Приточная фрамуга ПЕ6	60°	60°	60°
7	Фрамуга по форме остекления ВЕ19	30°	60°	30°
8	Фрамуга по форме остекления ВЕ20	0°	30°	0°
9	Вытяжная фрамуга ВЕ14	0°	30°	0°
10	Вытяжная фрамуга ВЕ15	60°	60°	60°
13	Вытяжная фрамуга ВЕ16	0°	30°	0°
12	Вытяжная фрамуга ВЕ17	60°	60°	60°

В табл. 3.4 представлены расчетные параметры внутреннего воздуха в обсуживаемой зоне церкви во имя святого благоверного князя Александра Невского полученные на основании проведенной симуляции с найденными оптимальными параметрами углов открытия фрамуг.

Табл. 3.4. Соответствие параметров внутреннего воздуха в обсуживаемой зоне оптимальным углам открытия фрамуг

№	Период	Средняя скорость	Средняя температура	Массовый расход	Погрешность массового баланса
1	Зима	0.294 м/с	15.42 °С	0.77 кг/с	-0.52%
2	Лето	0.371 м/с	22.56 °С	0.93 кг/с	0.11%
3	Переходный	0.333 м/с	16.23 °С	0.81 кг/с	0.64%

Полученные значения демонстрирует согласовать расчета с нормативными значениями [219]. Незначительные погрешности массового баланса указывают на минимальные численные ошибки, что подтверждает надежность и точность моделирования.

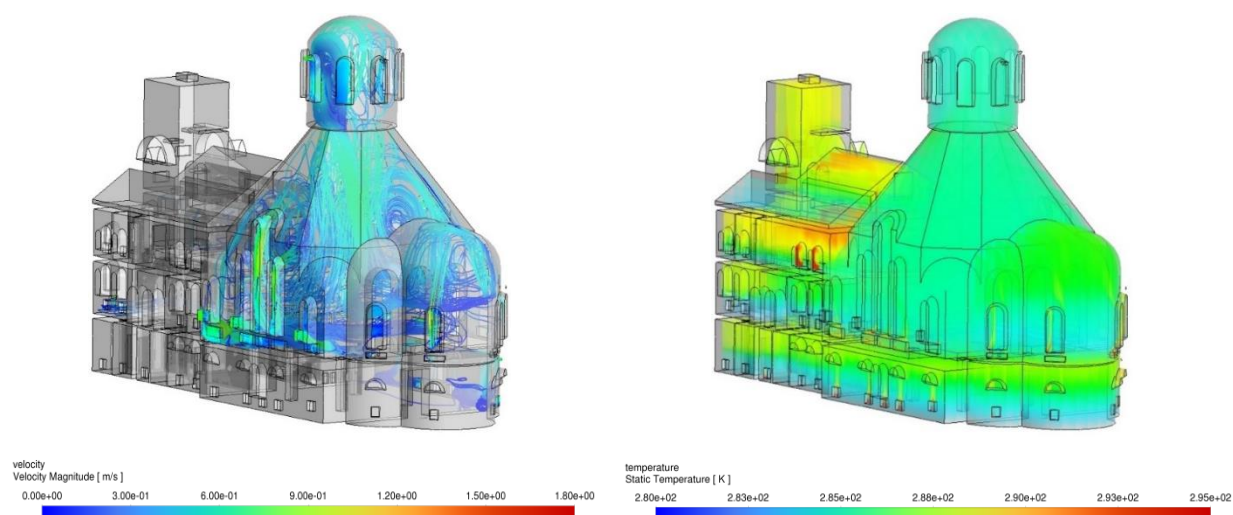


Рис. 3.5. Линии тока и поле температуры в зимний период в церкви во имя святого благоверного князя Александра Невского

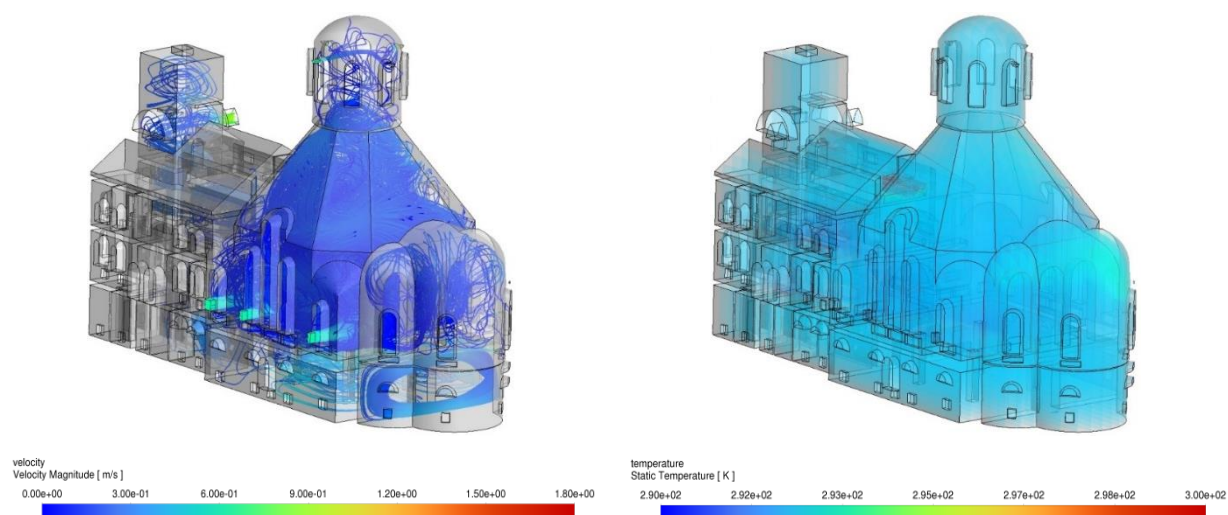


Рис. 3.6. Линии тока и поле температуры в летний период в церкви во имя святого благоверного князя Александра Невского

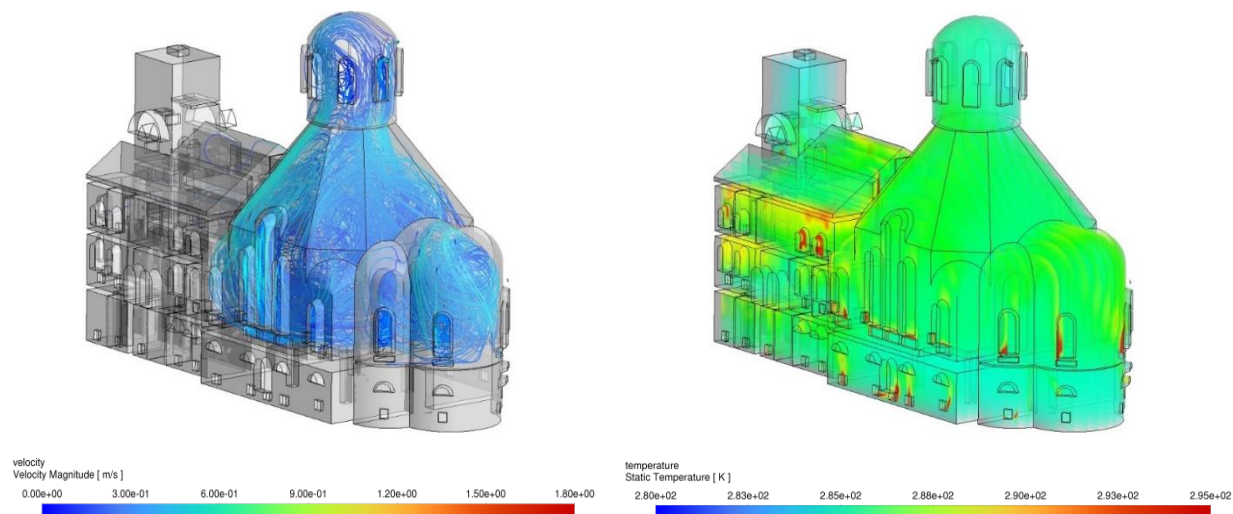


Рис. 3.7. Линии тока и поле температуры в переходный период в церкви во имя святого благоверного князя Александра Невского

3.4. Компьютерная модель воздухообмена внутри собора Рождества Пресвятой Богородицы

3.4.1. Разработка компьютерной модели

Для создания исходной твердотельной 3D-модели помещения храма (рис. 3.8) был использован программный комплекс *Autodesk Revit*. Геометрические параметры модели были определены на основании данных, полученных в ходе детальных обмеров. При разработке компьютерной модели для упрощения расчетов отдельные элементы расчетной области, такие как оконные рамы, колонны и другие сложные детали, были упрощены без утраты ключевых характеристик



Рис. 3.8. BIM модель собора Рождества Пресвятой Богородицы

Поставленная задача решалась в трехмерной постановке. Для ее реализации твердотельная модель храма, разработанная с использованием *Autodesk Revit*, была перенесена в *SpaceClaim* для подготовки расчетной области. Рассматриваемая расчетная область представляла внутренний объем храма (рис. 3.9) с параметрами: длина $A = 16.9$ м, ширина $B = 27.3$ м и высота $C = 31.8$ м. Такой подход позволил детализировать расчетную область и адаптировать ее для выполнения численных расчетов.

Как и для церкви во имя святого благоверного князя Александра Невского, в данной модели были рассмотрены 3 тепловых режима помещения для трех периодов года: летний, зимний и переходный.

Граничные условия для каждого периода года представлены в табл. 3.5. Ограждающие конструкции храма – непроницаемая адиабатическая стенка с абсолютной шероховатостью 1 мм (реальная стенка).

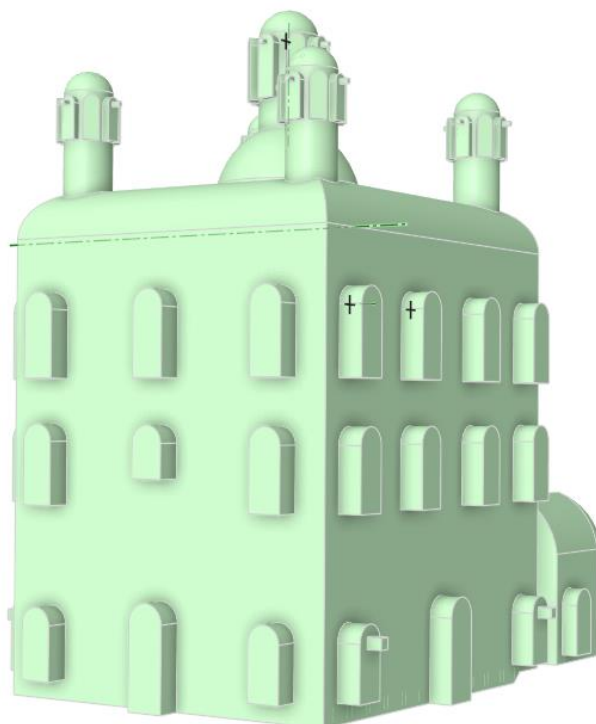


Рис. 3.9. Геометрия расчетной области собора Рождества Пресвятой Богородицы

Табл. 3.5. Граничные условия для модели собора Рождества Пресвятой Богородицы

№	Период	Название границы	Условие	Значение
1	Зима	Фрамуги (Ю)	Скорость воздуха	2.1 м/с
2	Зима	Фрамуги (С, В, З)	Избыточное давление	0 Па
4	Зима		Наруж. температура воздуха	255.15 К
5	Зима	Двери	Температура поверхности	285.15 К
6	Зима	Стекла	Температура поверхности	280.15 К
7	Зима	Радиатор отопления	Температура поверхности	343,15 К
8	Лето	Фрамуги (В)	Скорость воздуха	1 м/с
9	Лето	Фрамуги (С, Ю, З)	Избыточное давление	0 Па
11	Лето		Наруж. температура воздуха	298.15 К
12	Переход.	Фрамуги (З)	Скорость воздуха	1.77 м/с
13	Переход.	Фрамуги (С, Ю, В)	Избыточное давление	0 Па
15	Переход.		Наруж. температура воздуха	280.15 К
16	Переход.	Двери	Температура поверхности	287.15 К
17	Переход.	Стекла	Температура поверхности	285.15 К
18	Переход.	Радиатор отопления	Температура поверхности	343,15 К

Рабочей средой принят воздух, который задается во всех областях модели, со следующими параметрами: температура $T = 288.16 \text{ K}$; давление $P_{\text{атм}} = 101325 \text{ Па}$; динамическая вязкость $\mu = 1.7894 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$, коэффициент теплового расширения $\beta = 0.003665 \text{ K}^{-1}$, теплопроводность $\lambda = 0.0242 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$, удельная теплоемкость $\lambda = 1006.43 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$.

Перед созданием сетки проведена очистка геометрии и определена область расчета (рис. 3.9). Глобальный размер ячеек установлен в диапазоне от 5 до 300 мм.

Для более точного моделирования большого и четырех маленьких барабанов, в данных областях были применены локальные размеры сетки от 5 до 80 мм. Так же были приняты локальные параметры сетки с размером от 1 до 20 мм для моделирования области радиаторов, фрамуг, сводов и т. п. Для улучшения точности расчетов вблизи стенок был создан пристеночный слой, состоящий из 7 уровней с коэффициентом темпа роста 1.15.

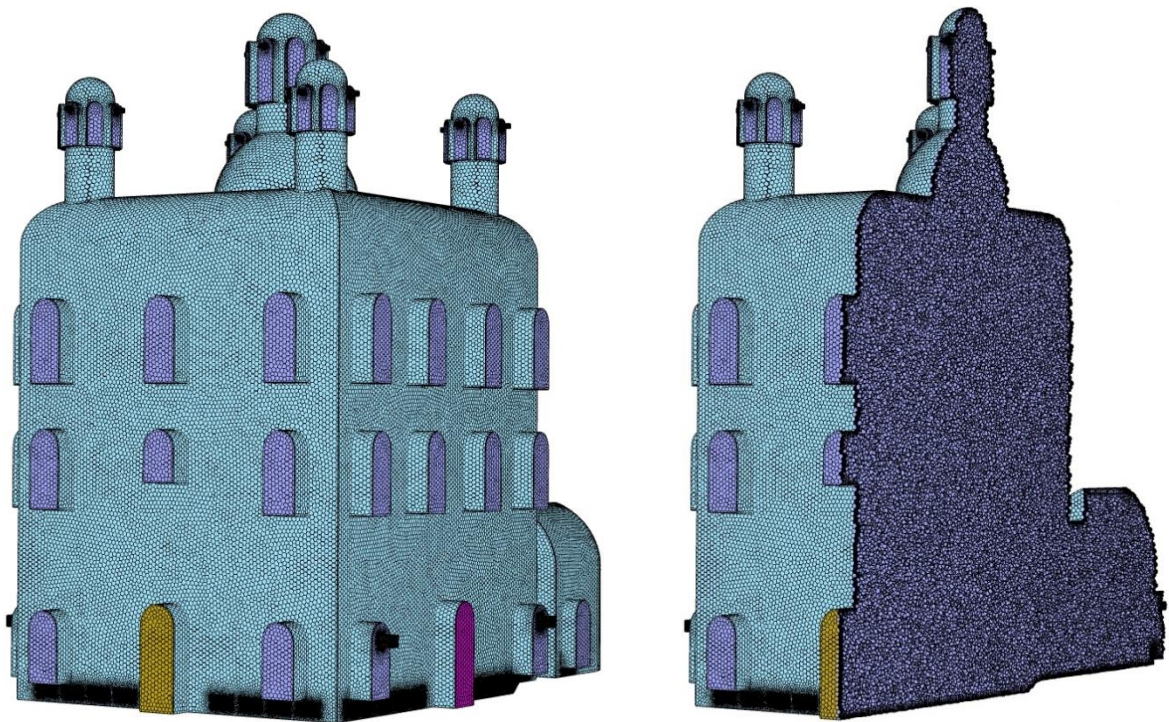


Рис. 3.10. Сеточная модель расчетной области собора Рождества Пресвятой Богородицы

Полученная в ходе моделирования сетка была исследована на «сеточную зависимость» через разность среднего числа Нуссельта (2.54) на последовательных сетках.

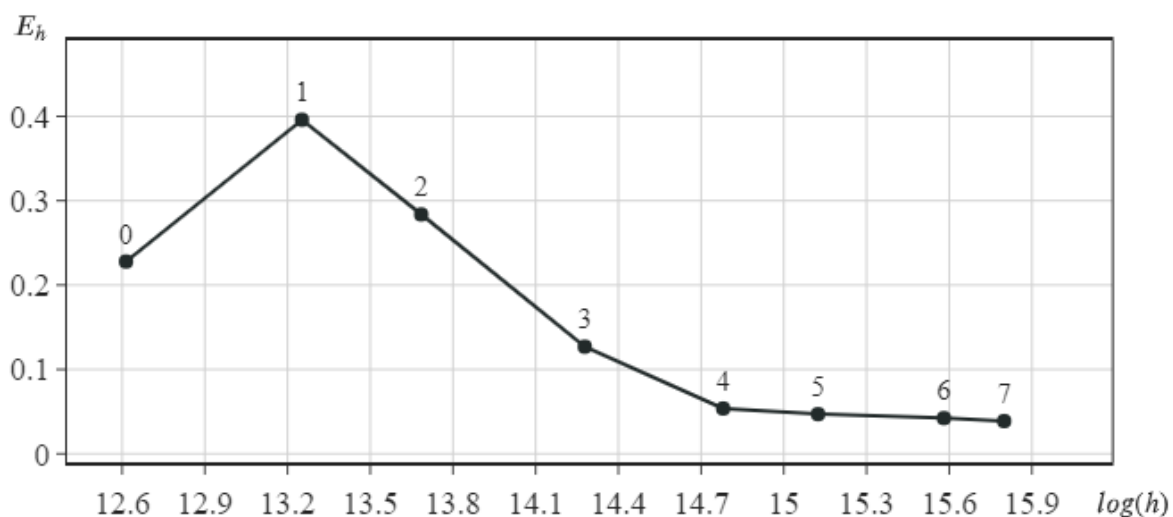


Рис. 3.11. Влияние изменения числа узлов сетки на среднеквадратичную ошибку числа Нуссельта

На рис. 3.11 показана зависимость погрешности, обусловленной конечной величиной шага сетки h . Начиная с четвертого этапа, изменения в погрешности становятся незначительными, что указывает на стабилизацию решений.

Для самой мелкой из рассмотренных сеток, включающей 7271202 ячейки, среднеквадратичная ошибка числа Нуссельта составила 3,9%. На сетке с 1588259 ячейками ошибка возросла до 12,7%, а для одной из крупных сеток, содержащей 569331 ячейку, достигла 39,6%. Данные демонстрируют, что уменьшение шага сетки способствует повышению точности результатов, но лишь до определенного предела, после которого дальнейшая детализация становится избыточной.

3.4.2. Поиск оптимальных углов открытия фрамуг

В соборе Рождества Пресвятой Богородицы в нижнем ярусе основного объема расположено 4 фрамуги, ориентированные на север и юг, 3 фрамуги в алтаре, ориентированные на восток. Собор имеет один большой и четыре маленьких барабана, каждый из которых содержит 4 фрамуги, ориентированные по четырем сторонам света.

В качестве целевой функции также выступает средневзвешенная по площади температура и скорость воздуха в горизонтальном сечении,

проходящем на высоте 1.5 м от уровня пола в средней части храма и массовый расход воздуха через фрамуги.

Табл. 3.6. Оптимальные значения углов открытия фрамуг в зависимости от периода года

№	Обозначение на плане	Зимний период	Летний период	Переходный период
1	Приточная фрамуга ПЕ1	60°	60°	60°
2	Приточная фрамуга ПЕ2	0°	30°	0°
3	Приточная фрамуга ПЕ3	30°	60°	60°
4	Приточная фрамуга ПЕ4	0°	30°	0°
5	Приточная фрамуга ПЕ5	0°	0°	0°
6	Приточная фрамуга ПЕ6	0°	30°	0°
7	Приточная фрамуга ПЕ7	30°	30°	60°
8	Вытяжная фрамуга ВЕ11	60°	30°	30°
9	Вытяжная фрамуга ВЕ12	0°	30°	30°
10	Вытяжная фрамуга ВЕ13	30°	60°	30°
13	Вытяжная фрамуга ВЕ14	0°	30°	30°
12	Вытяжная фрамуга ВЕ21	60°	60°	60°
13	Вытяжная фрамуга ВЕ22	0°	0°	0°
14	Вытяжная фрамуга ВЕ23	0°	0°	0°
15	Вытяжная фрамуга ВЕ24	0°	0°	0°
16	Вытяжная фрамуга ВЕ31	60°	60°	60°
17	Вытяжная фрамуга ВЕ32	0°	0°	0°
18	Вытяжная фрамуга ВЕ33	0°	0°	0°
19	Вытяжная фрамуга ВЕ34	0°	0°	0°
20	Вытяжная фрамуга ВЕ41	60°	60°	60°
21	Вытяжная фрамуга ВЕ42	0°	0°	0°
22	Вытяжная фрамуга ВЕ43	0°	0°	0°
23	Вытяжная фрамуга ВЕ44	0°	0°	0°
24	Вытяжная фрамуга ВЕ51	60°	60°	60°
25	Вытяжная фрамуга ВЕ52	0°	0°	0°
26	Вытяжная фрамуга ВЕ53	0°	0°	0°
27	Вытяжная фрамуга ВЕ54	0°	0°	0°

В ходе решения оптимизационной задачи наблюдалась тенденция отказа от использования вытяжных фрамуг в малых барабанах храма, так как их закрытие не влияло на значения целевой функции. Но в результате этого в данных областях происходил застой воздуха, что чревато накоплением влаги и её дальнейшей конденсацией на внутренних поверхностях.

С целью учета данной особенности и одновременным снижением времени вычислений, было принято, что в каждом из четырех маленьких барабанов открыта 1 вытяжная фрамуга, ориентированная на север, а все остальные закрыты. Данное решение позволило снизить количество итераций для каждого периода до 177147. Результат поиска оптимальных углов для остальных фрамуг представлен в табл. 3.6.

Параметры внутреннего воздуха в обсуживаемой зоне, полученные на основании проведенной симуляции с найденными оптимальными параметрами углов открытия фрамуг для собора Рождества Пресвятой Богородицы представлены в табл. 3.7.

Табл. 3.7. Соответствие параметров внутреннего воздуха в обсуживаемой зоне оптимальным углам открытия фрамуг

№	Период	Средняя скорость	Средняя температура	Массовый расход	Погрешность массового баланса
1	Зима	0.227 м/с	14.98 °С	0.92 кг/с	-0.13%
2	Лето	0.301 м/с	21.17 °С	1.14 кг/с	-0.09%
3	Переходный	0.256 м/с	15.66 °С	1.03 кг/с	-0.11%

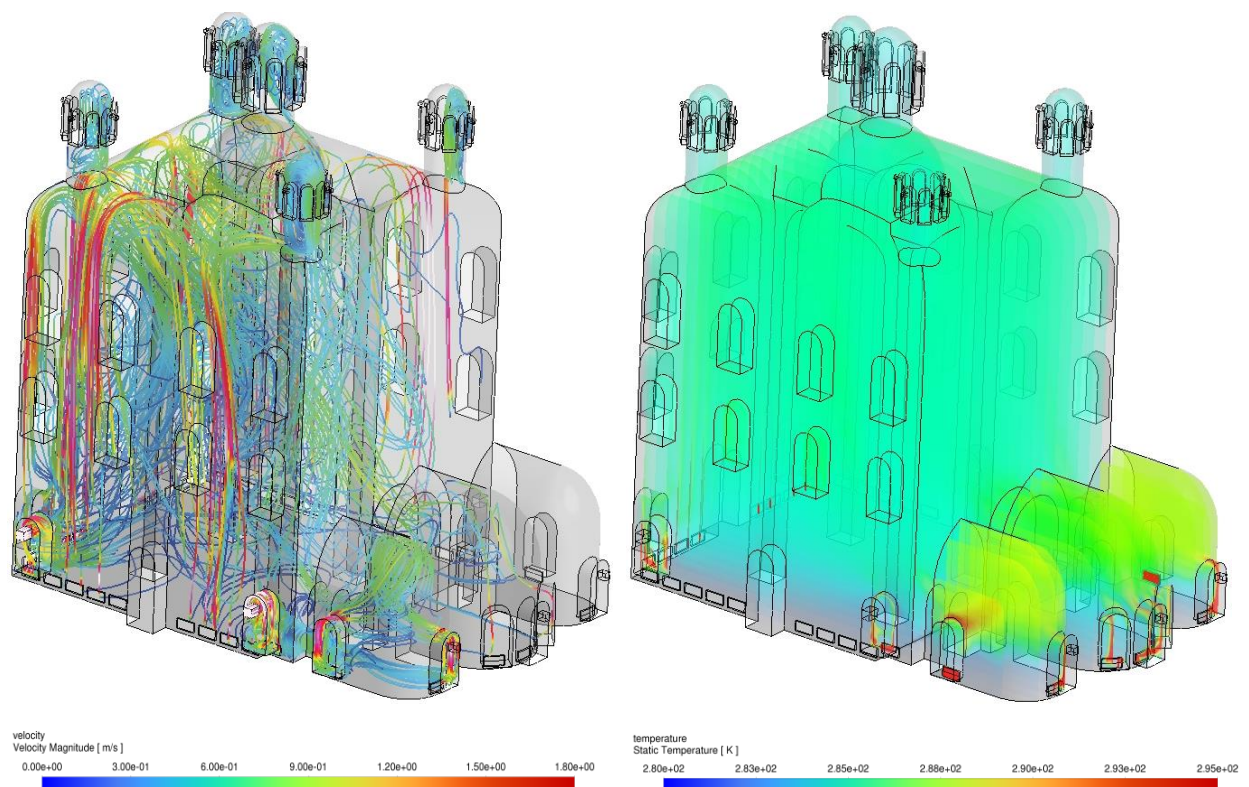


Рис. 3.12. Линии тока и поле температуры в зимний период в соборе Рождества Пресвятой Богородицы

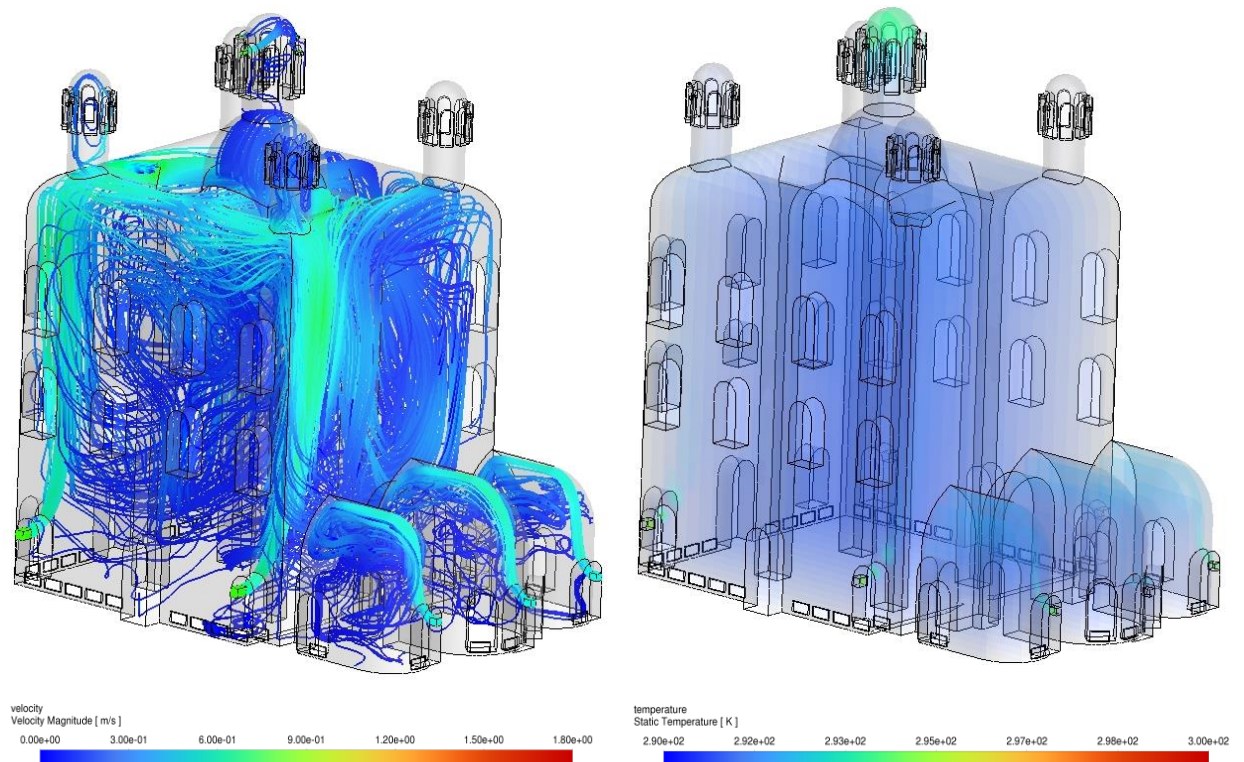


Рис. 3.13. Линии тока и поле температуры в летний период в соборе Рождества Пресвятой Богородицы

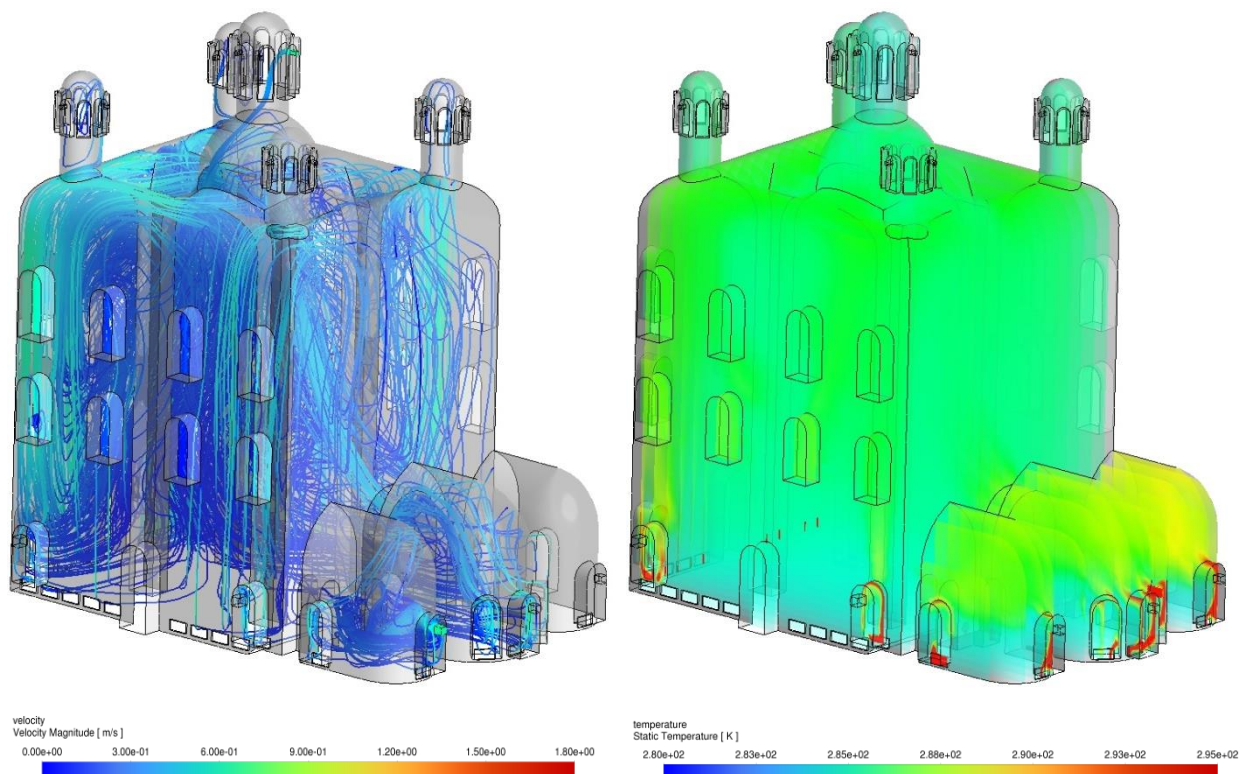


Рис. 3.14. Линии тока и поле температуры в переходный период в соборе Рождества Пресвятой Богородицы

3.5. Компьютерная модель воздухообмена внутри кафедрального собора святого благоверного князя Александра Невского

3.5.1. Разработка компьютерной модели

Твердотельная 3D модель помещения кафедрального собора святого благоверного князя Александра Невского (г. Нижний Новгород) (рис. 3.15) была создана по результатам проведенных обмеров с использованием программного комплекса – *Autodesk Revit*. При создании модели часть элементов расчетной области были упрощены.

Задача была сформулирована в трехмерной постановке, что позволило провести детализированный анализ. Твердотельная модель храма, созданная с использованием *Autodesk Revit*, была импортирована в *SpaceClaim* для подготовки расчетной области. Расчетная область представляла собой внутренний объем храма (рис. 3.16) с параметрами: длина $A = 53$ м, ширина $B = 57.5$ м и высота $C = 48.9$ м. Такой подход обеспечил высокую точность геометрического соответствия модели и расчетной области.

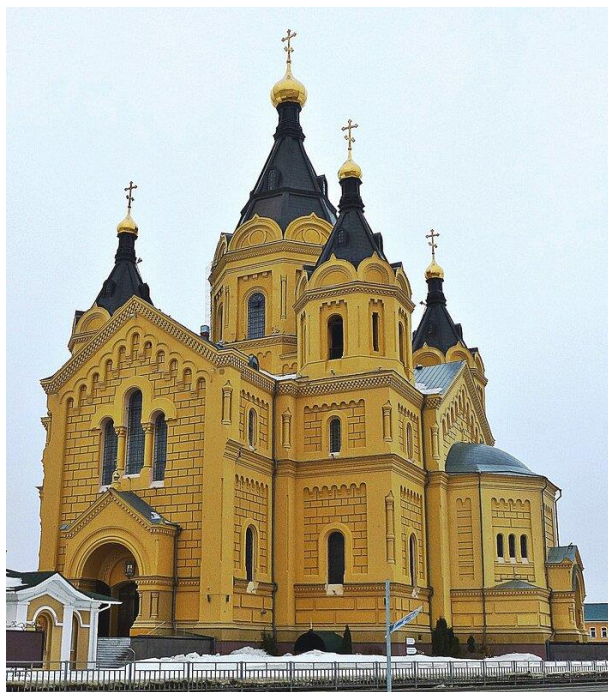


Рис. 3.15. BIM модель кафедрального собора святого благоверного князя Александра Невского

В рамках данной задачи также будут рассмотрены 3 тепловых режима работы для трех периодов года, граничные условия для которых представлены в табл. 3.8.

Ограждающие конструкции храма – непроницаемая адиабатическая стенка с абсолютной шероховатостью 1 мм (реальная стенка).

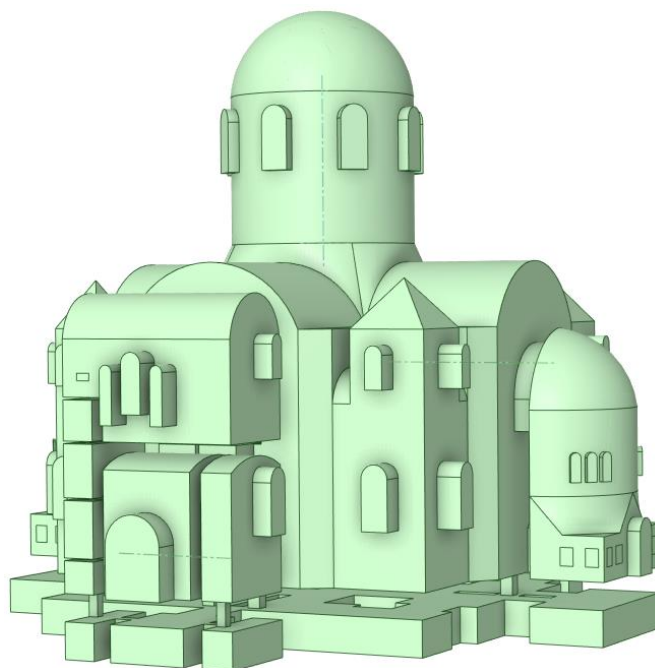


Рис. 3.16. Геометрия расчетной области кафедрального собора святого благоверного князя Александра Невского

Рабочей средой принят воздух, который задается во всех областях модели, со следующими параметрами: температура $T = 288.16$ К; давление $P_{\text{атм}} = 101325$ Па; динамическая вязкость $\mu = 1.7894 \cdot 10^{-5}$ Па·с, коэффициент теплового расширения $\beta = 0.003665$ К $^{-1}$, теплопроводность $\lambda = 0.0242$ Вт/(м·К), удельная теплоемкость $\lambda = 1006.43$ Дж/(кг·К).

Табл. 3.8. Граничные условия для модели кафедрального собора святого благоверного князя Александра Невского

№	Период	Название границы	Условие	Значение
1	Зима	Фрамуги (ЮВ)	Скорость воздуха	2.4 м/с
2	Зима	Фрамуги (ЮЗ, СВ, СЗ)	Избыточное давление	0 Па
4	Зима		Наруж. температура воздуха	246.15 К
5	Зима	Двери	Температура поверхности	279.15 К
6	Зима	Стекла	Температура поверхности	262.15 К
7	Зима	Радиатор отопления	Температура поверхности	343.15 К
8	Лето	Фрамуги (ЮЗ)	Скорость воздуха	1.5 м/с
9	Лето	Фрамуги (ЮВ, СВ, СЗ)	Избыточное давление	0 Па
11	Лето		Наруж. температура воздуха	296.15 К

№	Период	Название границы	Условие	Значение
12	Переход.	Фрамуги (ЮВ)	Скорость воздуха	1.9 м/с
13	Переход.	Фрамуги (ЮЗ, СВ, СЗ)	Избыточное давление	0 Па
15	Переход.		Наруж. температура воздуха	280.15 К
16	Переход.	Двери	Температура поверхности	287.15 К
17	Переход.	Стекла	Температура поверхности	285.15 К
18	Переход.	Радиатор отопления	Температура поверхности	343,15 К

Перед созданием сетки проведена очистка геометрии и определена область расчета (рис. 3.16). Глобальный размер ячеек установлен в диапазоне от 5 до 250 мм.

Для более точного моделирования пределов и нижних частей колоколен, в данных областях были применены локальные размеры сетки от 5 до 100 мм. Так же были приняты локальные параметры сетки с размером от 1 до 25 мм для моделирования области радиаторов, фрамуг, сводов и т. п. Для улучшения точности расчетов вблизи стенок был создан пристеночный слой, состоящий из 7 уровней с коэффициентом темпа роста 1.15.

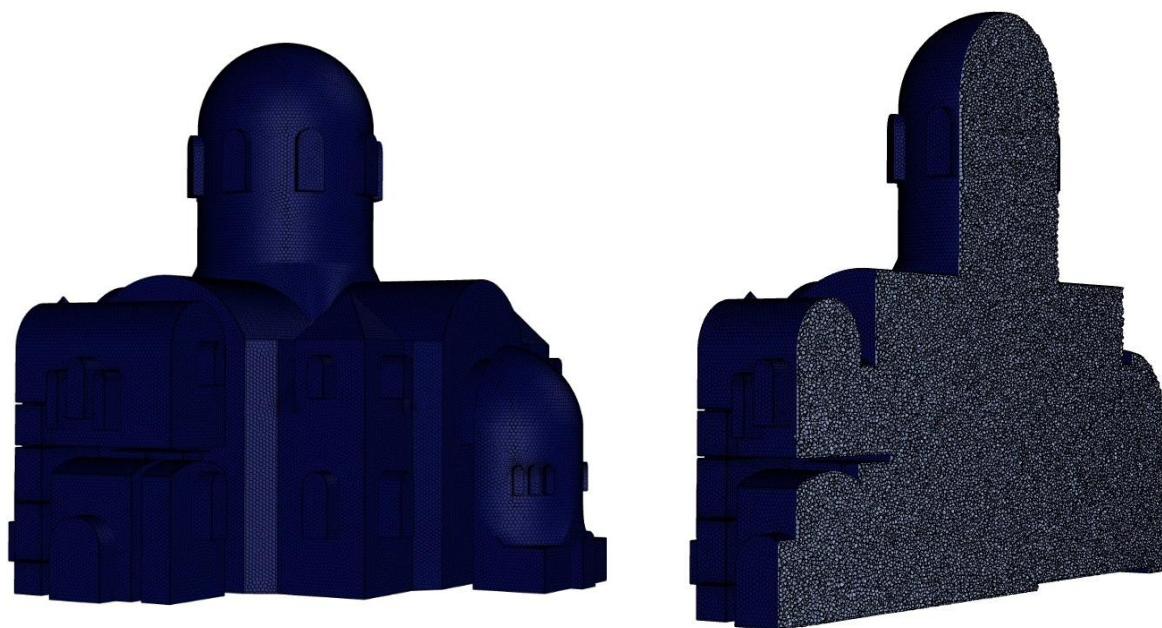


Рис. 3.17. Сеточная модель расчетной области кафедрального собора святого благоверного князя Александра Невского

Результаты исследования «сеточной зависимости» (рис. 3.18) демонстрируют что начиная с 8 этапа, погрешность, вызванная конечной величиной шага сетки h практически, не изменяется.

Для самой мелкой сетки, содержащей 14810202 ячейки, среднеквадратичная ошибка числа Нуссельта составила 2,9%. На сетке с 2067199 ячейками ошибка увеличилась до 10,6%. В случае одной из крупных сеток с 1051110 ячейками значение ошибки достигло 44,9%. Эти результаты подчеркивают значимость детализации сетки для повышения точности расчетов, особенно при моделировании сложных физических процессов.

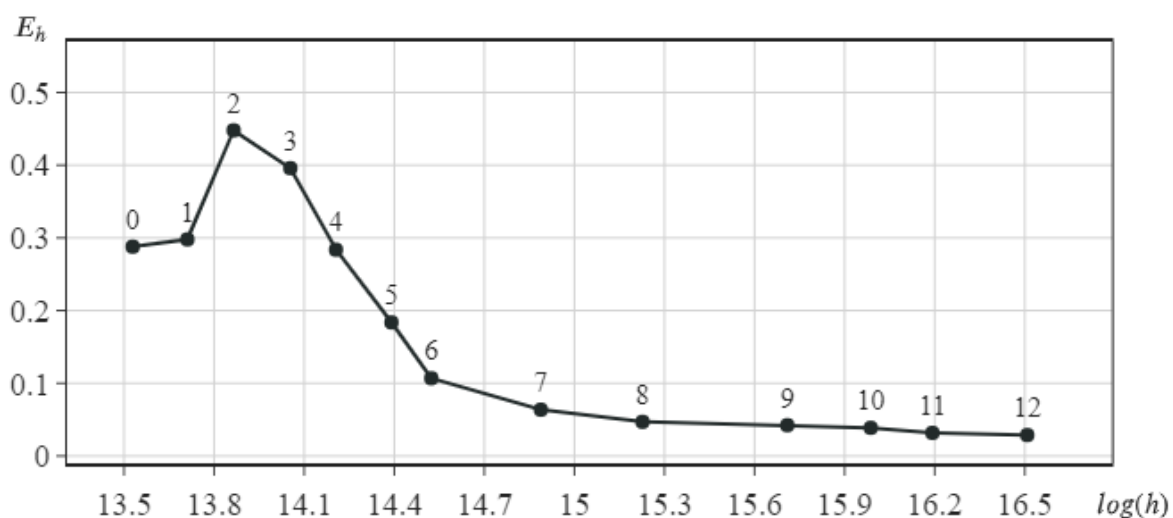


Рис. 3.18. Влияние изменения числа узлов сетки на среднеквадратичную ошибку числа Нуссельта

3.5.2. Поиск оптимальных углов открытия фрамуг

В кафедральном соборе святого благоверного князя Александра Невского в нижнем ярусе основного объема расположено 14 фрамуг, ориентированные на северо-запад и юго-восток, 2 фрамуги в алтаре, ориентированные на северо-запад, 4 фрамуги в пределах, ориентированные на север и запад и 4 фрамуги в барабане центрального купола, ориентированные по четырем сторонам света.

В качестве целевой функции, как и в предыдущих задачах, выступает средневзвешенная по площади температура и скорость воздуха в горизонтальном сечении, проходящем на высоте 1.5 м от уровня пола в средней части храма и массовый расход воздуха через фрамуги.

Поиск оптимальных параметров проводился отдельно для каждого периода года (летний, зимний, переходный). Было проведено 897312 итераций

в рамках каждого периода. Оптимальные значения углов открытия фрамуг представлены в табл. 3.9.

Полученные в ходе симуляции, с найденными оптимальными параметрами углов открытия фрамуг, расчетные параметры воздуха в кафедральном соборе святого благоверного князя Александра Невского представлены на табл. 3.10.

Табл. 3.9. Оптимальные значения углов открытия фрамуг в зависимости от периода года

№	Обозначение на плане	Зимний период	Летний период	Переходный период
1	Фрамуга ПЕ1	30°	30°	60°
2	Фрамуга ПЕ2	0°	0°	0°
3	Фрамуга ПЕ3	60°	60°	60°
4	Фрамуга ПЕ4	0°	0°	0°
5	Фрамуга ПЕ5	0°	30°	60°
6	Фрамуга ПЕ6	0°	0°	0°
7	Фрамуга ПЕ7	30°	30°	30°
8	Фрамуга ПЕ8	60°	60°	60°
9	Фрамуга ПЕ9	60°	60°	60°
10	Фрамуга ПЕ10	0°	0°	0°
13	Фрамуга ПЕ11	0°	30°	30°
12	Фрамуга ПЕ12	0°	0°	0°
13	Фрамуга ПЕ13	30°	0°	0°
14	Фрамуга ПЕ14	30°	60°	60°
15	Фрамуга ПЕ15	30°	0°	0°
16	Фрамуга ПЕ16	0°	0°	30°
17	Фрамуга ПЕ17	0°	0°	30°
18	Фрамуга ПЕ18	0°	0°	60°
19	Фрамуга ПЕ19	0°	30°	30°
20	Фрамуга ПЕ20	0°	0°	30°
21	Фрамуга ПЕ21	0°	0°	0°
22	Фрамуга ПЕ22	30°	30°	0°
23	Фрамуга ПЕ23	30°	60°	0°
24	Фрамуга ПЕ24	0°	0°	30°

Табл. 3.10. Соответствие параметров внутреннего воздуха в обсуживаемой зоне оптимальным углам открытия фрамуг

№	Период	Средняя скорость	Средняя температура	Массовый расход	Погрешность массового баланса
1	Зима	0.340 м/с	16.18 °С	1.12 кг/с	1.39%

2	Лето	0.413 м/с	23.66 °С	1.39 кг/с	0.87%
3	Переходный	0.368 м/с	16.97 °С	1.24 кг/с	1.46%

Полученные значения соответствуют нормативным [219]. Погрешность массового баланса оказалась немного выше, чем в предыдущих задач, но все еще остается минимальной, что свидетельствует о высоком качестве построенной модели.

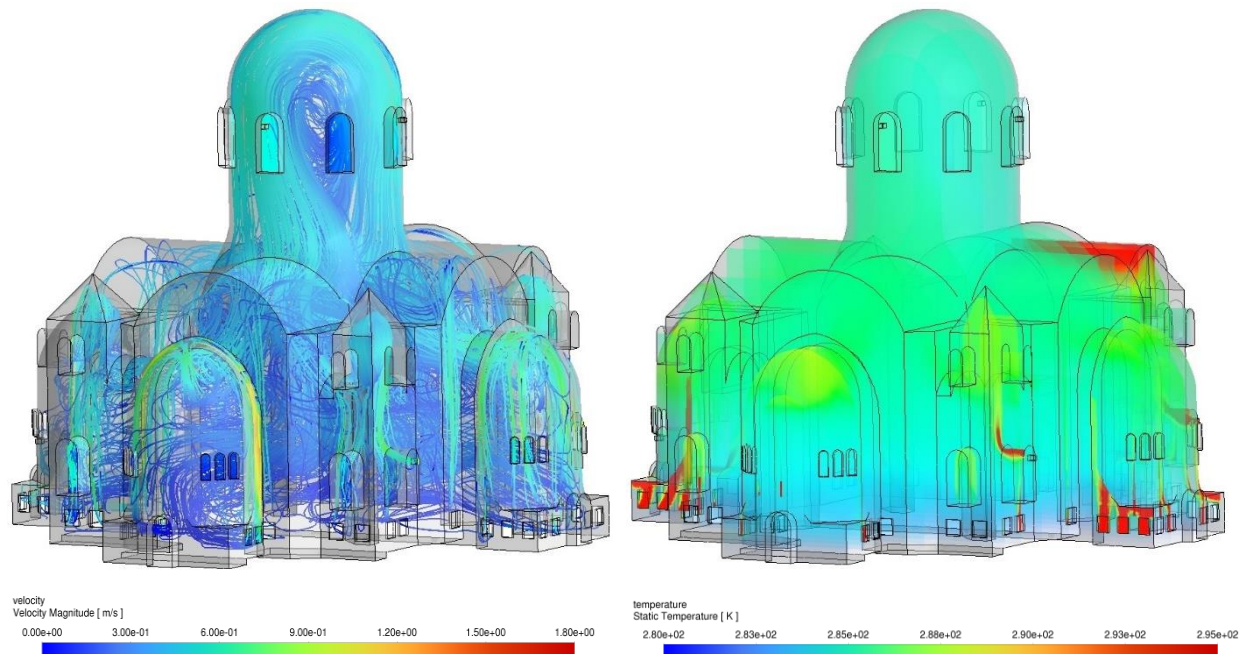


Рис. 3.19. Линии тока и поле температуры в зимний период в кафедральном соборе святого благоверного князя Александра Невского

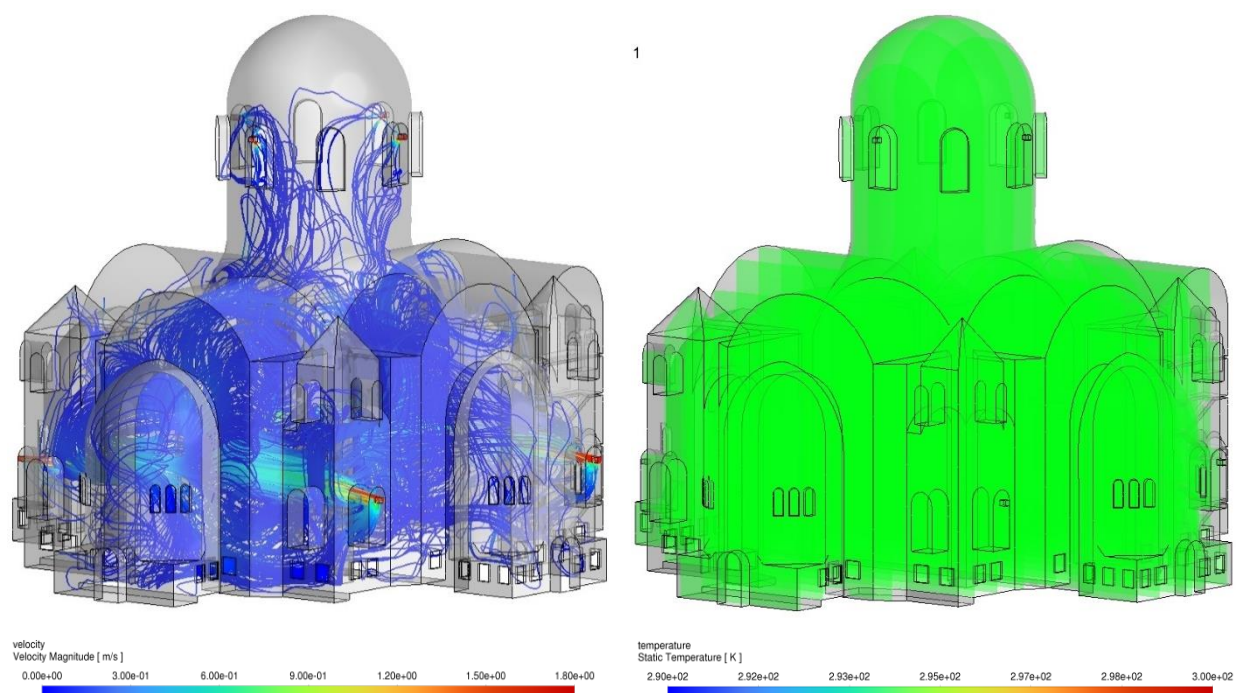


Рис. 3.20. Линии тока и поле температуры в летний период в кафедральном соборе святого благоверного князя Александра Невского

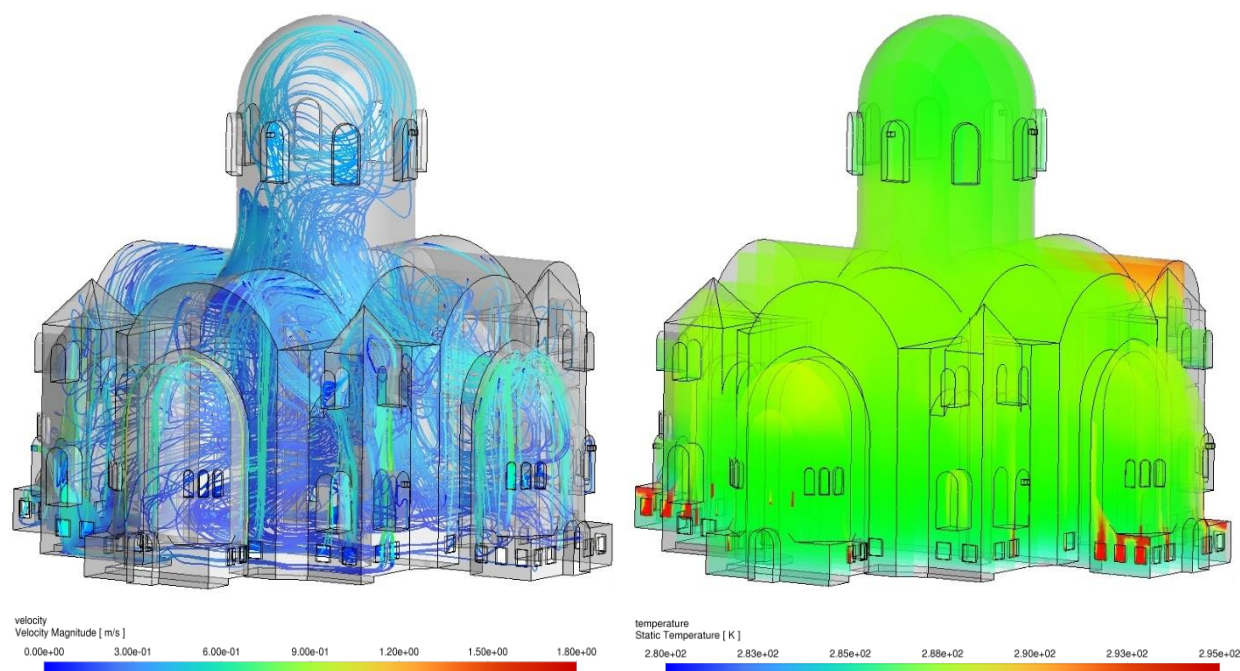


Рис. 3.21. Линии тока и поле температуры в переходный период в кафедральном соборе святого благоверного князя Александра Невского

3.6. Выводы по третьей главе

1. В программном комплексе вычислительной гидро-газодинамики – *ANSYS Fluent* разработаны компьютерные модели воздушных течений в трех исследуемых храмах. На основании разработанных моделей определены очертания линий тока и полей скорости и температуры внутри всех трех храмов для каждого теплового режима в рамках года. Это позволяет выявить зоны циркуляционного движения воздуха в центральной части храма и в области барабана купола. Эти зоны образуются вследствие неравномерного распределения плотностей и подъемных сил, что требует точной настройки вентиляционных систем для обеспечения оптимального микроклимата.

2. В результате численных экспериментов для всех исследуемых храмов средняя скорость воздуха в обслуживаемой зоне колебалась в диапазоне от 0.227 м/с до 0.413 м/с, а средняя температура воздуха – от 14.98 °С до 23.66 °С, в зависимости от периода года. Эти результаты соответствуют

требованиям нормативов, что подтверждает корректность предложенных моделей и оптимизационных алгоритмов.

3. Надежность и точность разработанных моделей подтверждена исследованием на «сеточную зависимость», а также значением погрешности массового баланса, указывающим на отсутствие дисперсионных ошибок и искусственных осцилляций.

4. С помощью алгоритма поиск оптимальных углов открытия приточных и вытяжных фрамуг, основанном на методе градиентного спуска, найдены оптимальные значения углов для каждого из трех тепловых режимов в рамках года для следующих храмов: церковь во имя святого благоверного князя Александра Невского (д. Березовка), собор Рождества Пресвятой Богородицы (с. Катунки) и кафедральный собор святого благоверного князя Александра Невского (г. Нижний Новгород). Найденные значения обеспечивают создание требуемых параметров внутреннего воздуха в обсуживаемой зоне храма.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЗДУШНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПРАВОСЛАВНЫХ ХРАМАХ

4.1. Описание методики экспериментальных исследований и методов измерения

Для проверки точности построенной модели в рамках проекта проводились замеры температурных и скоростных полей воздуха в зимний период, когда система функционировала в режиме отопления. Исследования проводились в центральной части «Церкви во имя святого благоверного князя Александра Невского», расположенной в деревне Кожевенное, Богородского района Нижегородской области (год постройки: 2015).

Данный храм относится к архитектурному типу – «корабль», который характеризуется значительными вертикальными размерами, создаваемыми рядом конструктивных особенностей, заключающихся в его делении на три основные части: притвор, неф и алтарь.

Неф (главный зал) представляет собой широкое и длинное помещение, где центральная часть выше и шире боковых. В изучаемом храме своды нефа располагаются на высоте 12 метров от уровня пола. С учетом барабана и купола высота центральной части достигает 18 метров.

Основной сложностью при проведении экспериментов по измерению скоростных и температурных полей является высокая тепловая инерционность непрозрачных ограждений и, напротив, низкая тепловая инерционность прозрачных конструкций.

Одной из значительных трудностей стало моделирование изменяющихся климатических факторов, отражающих реальные условия эксплуатации культовых сооружений в различных регионах страны, а также проведение их системного анализа. В результате для исследования скоростных и температурных полей были организованы натурные эксперименты, выполненные непосредственно в интерьере храма.

Измерения выполнялись с использованием термоанемометра ТТМ-2/1-06-2А который позволяет фиксировать скорости в диапазоне 0.01–30 м/с с погрешностью $\pm 1\% + 1d$ и температуры в диапазоне 0–45 °С с погрешностью ± 1 °С.

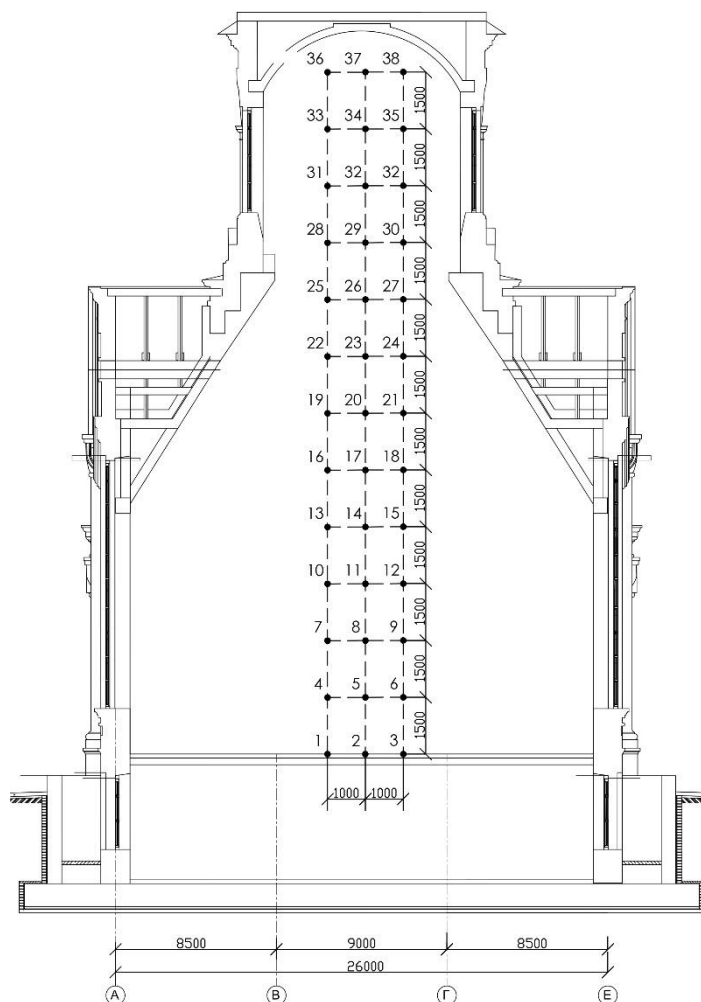


Рис. 4.1. Схема точек замера температуры и скорости воздуха

Термоанемометр ТТМ-2/1-06-2А – это высокоточный инструмент, используемый для измерения скорости и температуры воздушных потоков, основным компонентом которого является чувствительный элемент, выполненный в виде небольшого термоэлектрического сенсора.

Термоанемометр работает по принципу нагрева сенсора электрическим током до температуры, которая превышает температуру окружающего воздуха. При прохождении воздушного потока мимо нагретого элемента происходит его охлаждение, которое фиксирует электронный блок.

Затем данное изменение температуры преобразуется в электрический сигнал, на основе которого, при использовании известных зависимостей и предварительных калибровочных данных, микропроцессор рассчитывает скорость воздушного потока и отображает результаты на дисплее

Кроме того, термоанемометр измеряет текущую температуру воздуха с помощью встроенного термометра, что позволяет проводить комплексный анализ воздушной среды.

В основном объеме храма температура воздуха находилась в диапазоне 16–18 °С, а скорость воздуха составляла 0,05–0,6 м/с. В барабане наблюдались более низкие температуры, варьирувавшиеся в пределах 13–15 °С, и скорости воздуха 0,05–0,2 м/с.

Результаты измерений температурных и скоростных полей представлены на рис. 4.2 и рис. 4.3.

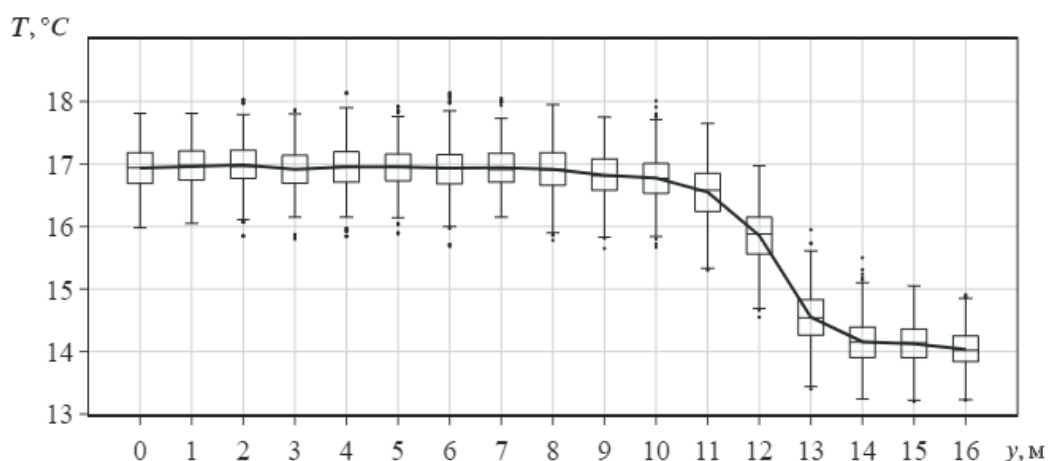


Рис. 4.2. Зависимость температуры воздуха в православном храме от высоты

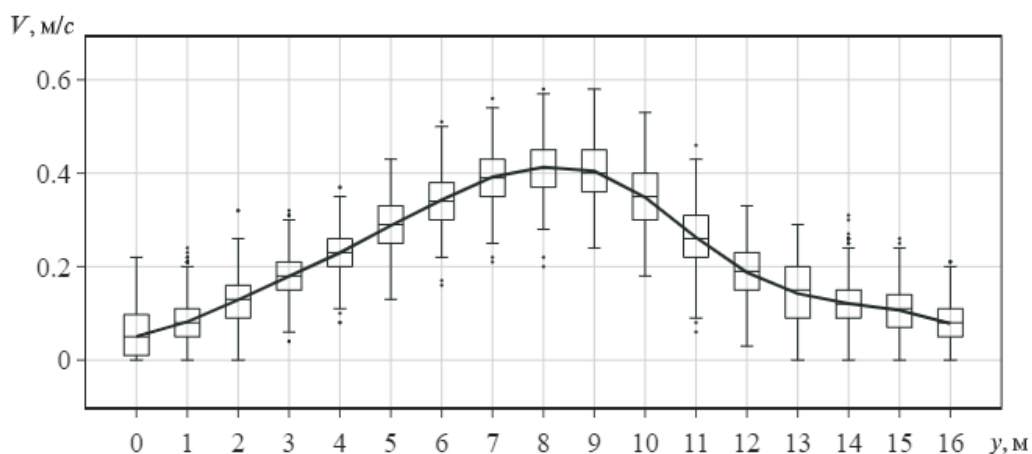


Рис. 4.3. Зависимость скорости воздуха в православном храме от высоты

4.2. Планирование эксперимента

Планирование эксперимента было основано на необходимости создания условий, максимально приближенных к реальным, для получения точных данных о скорости воздушных потоков и распределении температуры.

Важным аспектом стало определение точек, в которых проводились измерения скоростей и температур воздуха. Измерения осуществлялись на разных высотах – от уровня пола до купола, что позволило детально изучить вертикальное распределение воздушных потоков. Для этого применялись современные измерительные приборы, такие как термоанемометр, позволяющий фиксировать малые скорости воздушных потоков и изменения температур в зонах с различной инсоляцией.

Исследования проводились в различные периоды дня и при разных климатических условиях, что позволило учесть влияние внешних факторов, таких как температура наружного воздуха, на параметры микроклимата внутри храма.

Основной целью эксперимента является верификация разработанных математических моделей течения воздуха и теплообмена, что включает измерение скорости и температуры воздуха в разных частях храма.

При проведении экспериментов были сделаны следующие допущения, которые позволили упростить процесс моделирования:

- Влияние солнечной радиации на внутренние температуры учитывалось как незначительное, так как большинство измерений проводилось в пасмурную погоду.
- Тепловое излучение от свечей и прихожан храма не рассматривалось в качестве существенного источника тепла, что позволило сконцентрироваться на естественных воздушных течениях.
- Предположено, что изменения атмосферного давления на протяжении дня не оказывали значимого влияния на результаты экспериментов.

План эксперимента основывался на предварительных результатах, полученных при изучении температурных и скоростных полей в других культовых зданиях. Моделирование проводилось с учетом особенностей обтекаемости воздуха в замкнутых пространствах и влияния оконных проемов. Важнейшие точки замеров были расположены в верхней части храма – у куполов и сводов, где наблюдаются наиболее выраженные воздушные течения. Эксперимент проводился в несколько этапов с использованием дополнительных инструментов для фиксации климатических параметров снаружи храма.

После завершения экспериментов данные подвергались обработке с использованием методов математической статистики. Основное внимание уделялось анализу полученных скоростей и температур воздушных потоков, их средним значениям и отклонениям от нормы.

Оценка воспроизводимости результатов осуществлялась посредством повторных измерений в тех же точках при схожих климатических условиях. Это позволило минимизировать погрешности и подтвердить стабильность полученных данных, что свидетельствует о высокой надежности проведенных исследований

В последующих разделах диссертации подробно описаны методы обработки данных и статистической оценки точности экспериментов.

4.3. Анализ воспроизводимости экспериментальных исследований

С целью анализа воспроизводимости экспериментальных исследований, был проведен ряд параллельных измерений, часть из которых представлена в табл. 4.1.

Табл. 4.1. Экспериментальные данные распределения температуры и воздуха в православном храме

№	x	y	T_{out}	T_1	v_1	T_2	v_2	T_3	v_3	T_4	v_4	T_5	v_5
1	6.6	4	-23	16,3	0.26	17,8	0.25	16,5	0.24	16,3	0.24	17,8	0.25
2	5.6	6	-24	17,5	0.34	16,9	0.32	16,7	0.33	15,5	0.32	16,4	0.32
3	7.6	2	-25	17,2	0.11	17,4	0.13	17,4	0.13	16,1	0.17	17,3	0.15
4	5.6	7	-25	16,7	0.37	18,4	0.38	17,1	0.38	16,5	0.36	17,9	0.36

5	6.6	8	-25	17,8	0.45	17,3	0.44	17,9	0.46	17,8	0.46	17,2	0.42
6	7.6	9	-27	16,9	0.38	15,5	0.40	17,6	0.38	17,7	0.41	16,5	0.41
7	6.6	10	-23	16,4	0.43	16,8	0.42	17,4	0.41	16,5	0.43	16,4	0.42
8	6.6	11	-24	16,8	0.32	16,1	0.32	16,1	0.32	17	0.32	16,8	0.33

Для сравнения изменчивости сформированного набора данных независимо от их масштаба использовался коэффициент вариации [197]:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100\% \quad (4.1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.2)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.3)$$

где σ – стандартное отклонение, $\bar{x}$ – среднее значение.

Коэффициент вариации для данных о температуре воздуха составил 4.23% и 13.64% для скорости воздуха. Полученные значения указывают на достаточную стабильность и воспроизводимость измерений температуры и более высокую, но в рамках допустимого $\approx 10 - 20\%$, изменчивость данных о скорости воздуха.

Для оценки степени согласованности между несколькими экспериментальными измерениями был проведен анализ конкордации Кендалла [14]:

$$W = \frac{12 \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2}{k^2 (n^3 - n)} \quad (4.4)$$

$$R_i = \sum_{j=1}^k r_{i,j} \quad (4.5)$$

где R_i – сумма рангов, присвоенных i -му измерению во всех k экспериментах, $\bar{R}$ – средняя сумма рангов, $r_{i,j}$ – ранг, присвоенных i -му измерению в j эксперименте, k – количество экспериментов.

Полученный коэффициент Кендалла для измерений температуры (0.885) и скорости (0.712) воздуха свидетельствует о довольно высокой степени согласованности между экспериментами.

Для проверки гипотезы о том, что несколько выборок имеют одинаковую дисперсию, был определен критерий Кохрена [136].

Для этого найдем дисперсию в каждой группе i с данными $x_{i,j}$ (где j – индекс наблюдения внутри группы):

$$s_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^k (x_{i,j} - \bar{x}_i)^2 \quad (4.6)$$

где $\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^k x_{i,j}$ – среднее значение для группы i .

Вычислим критерий Кохрена как отношение максимальной дисперсии к сумме дисперсий всех групп:

$$C = \frac{\max(s_1^2, s_2^2, \dots, s_k^2)}{\sum_{i=1}^k s_i^2} \quad (4.7)$$

Критическое значение для критерия Кохрена может быть определено с использованием F-распределения с заданным числом степеней свободы. Для этого применяется следующее преобразование:

$$C_{crit} = \frac{F_{crit}}{F_{crit} + (k-1)} \quad (4.8)$$

При уровне статистической значимости $\alpha = 0.05$ и степени свободы $df_1 = k-1$ и $df_2 = k \times (n-1)$ (где k – количество групп, n – количество наблюдений в каждой группе), критическое значение составляет 0.394.

Полученное значение критерия $C = 0.252$, для измерений температуры, меньше найденного критического значения $C_{crit} = 0.309$, следовательно нет оснований отвергать нулевую гипотезу, что означает, что дисперсии могут считаться однородными.

Такая же ситуация с измерением скорости воздуха. Значение критерия $C = 0.204$ меньше критического значения $C_{crit} = 0.309$, следовательно дисперсии однородны.

Для визуального анализа сходимости данных и выявления статистически значимых отклонений, ниже представлены контрольные карты Шухарта [62] для средних значений и размахов температуры (рис. 4.4, рис. 4.5) и скорости воздуха (рис. 4.6, рис. 4.7) в православном храме. Данные карты используют контрольные пределы, которые вычисляются с использованием коэффициентов для средних значений и размахов.

Все точки на данных картах находятся внутри контрольных пределов, что свидетельствует о том, что описанные процессы являются стабильными.

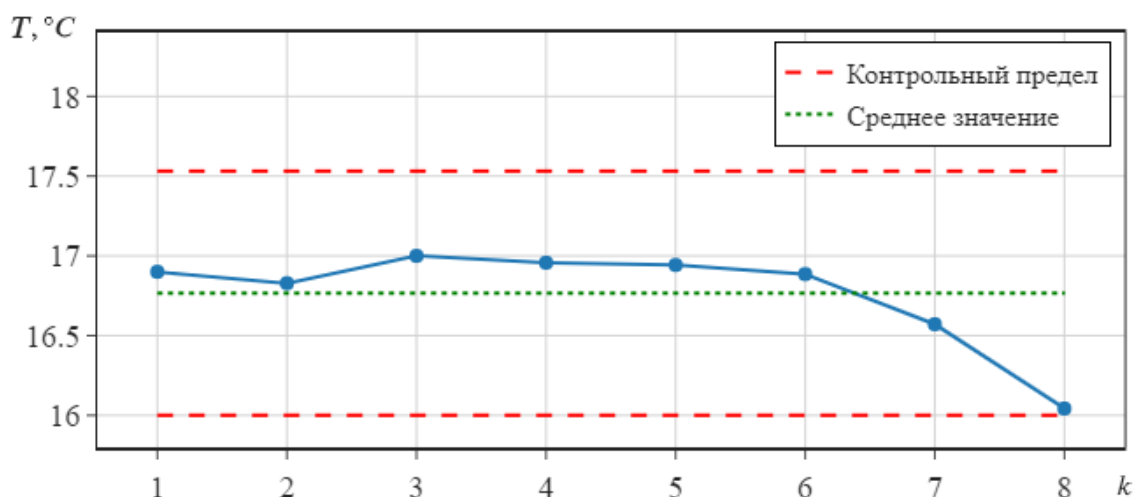


Рис. 4.4. Контрольная карта средних значений температуры воздуха в храме

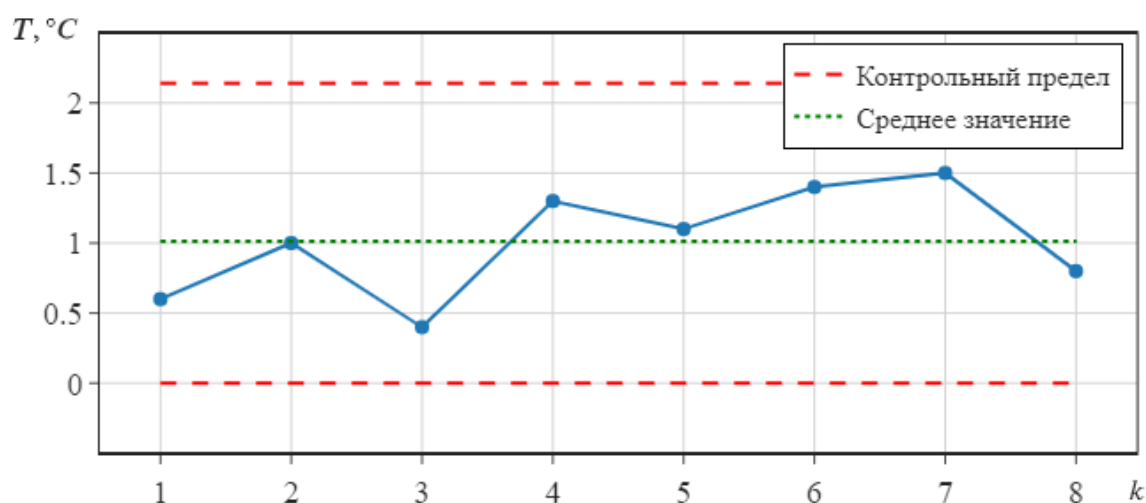


Рис. 4.5. Контрольная карта размахов температуры воздуха в храме

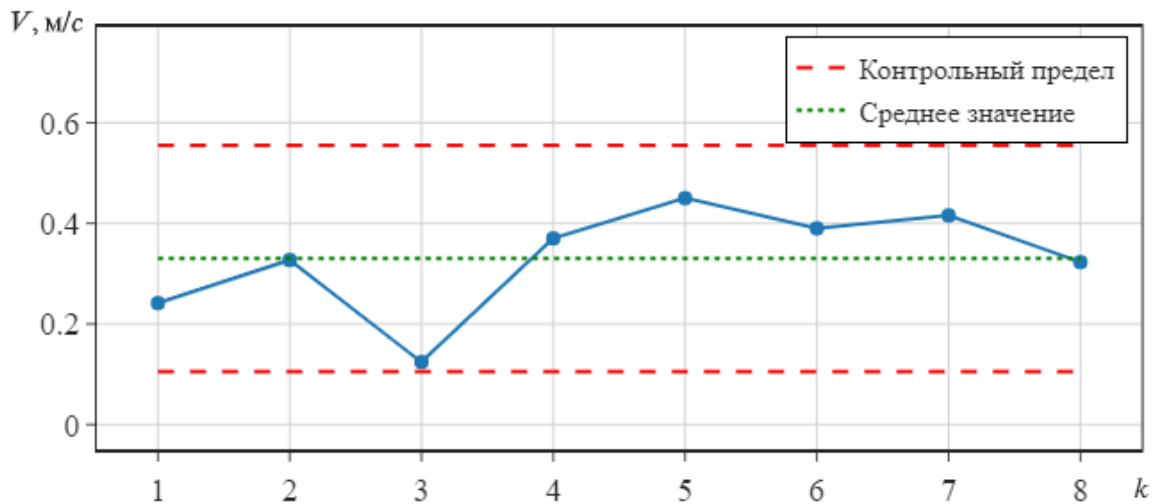


Рис. 4.6. Контрольная карта средних значений скорости воздуха в храме

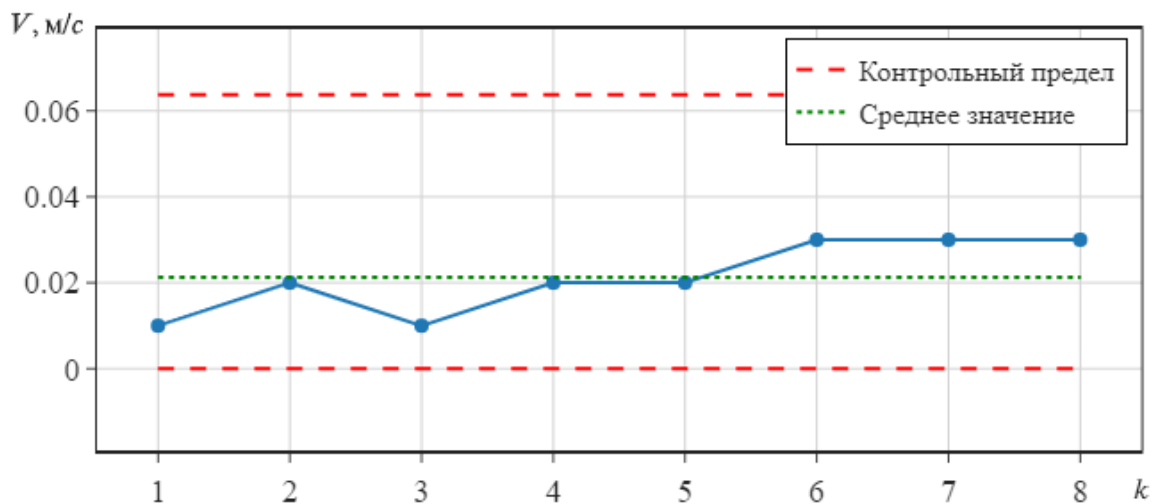


Рис. 4.7. Контрольная карта размахов скорости воздуха в храме

4.4. Обработка экспериментальных данных и получение регрессионных зависимостей

Для получения уравнений регрессии воспользуемся обобщением линейной регрессии [22, 51], при котором корреляция между независимыми переменными и зависимой переменной моделируется как полином определённой степени [10, 56]. Рассмотрим процесс получения данного уравнения на основе полученных экспериментальных данных.

По результатам проведенных измерений был сформирован массив данных, содержащий значения температуры (T) и скорости воздуха (V) в

зависимости от трех переменных: координата по оси x , координата по оси y и температура наружного воздуха T_{out} .

Для полиномиальной регрессии степени n уравнение регрессии будет иметь вид:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^3 + \dots + \beta_n x^n + \tau \quad (4.9)$$

где: y – зависимая переменная, x – независимая переменная, $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ – коэффициенты полинома, ϵ – случайная ошибка, которая учитывает несоответствия модели данным.

Уравнение для каждого отдельного наблюдения в матричной форме будет иметь вид:

$$y = X\beta + \tau \quad (4.10)$$

где:

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad - \quad \text{вектор значений зависимой переменной,}$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^n \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \dots & x_2^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_m & x_m^2 & \dots & x_m^n \end{bmatrix} \quad - \quad \text{матрица значений независимой переменной и её}$$

$$\text{степеней, } \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_m \end{bmatrix} \quad - \quad \text{вектор коэффициентов, } \tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \vdots \\ \tau_n \end{bmatrix} \quad - \quad \text{вектор ошибок.}$$

Для оценки коэффициентов β будем использовать метод наименьших квадратов, заключающийся в минимизации суммы квадратов ошибок между наблюдаемыми y_i и предсказанными $\hat{y}_i$ значениями:

$$\min_{\beta} \|y - X\beta\|^2$$

$$\min_{\beta} \sum_{i=1}^m (y_i - (\beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^3 + \dots + \beta_n x^n + \tau))^2 \quad (4.11)$$

Решение задачи минимизации достигается путем дифференцирования функционала ошибки по β и приравнивания производной к нулю, что приводит к уравнению:

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (4.12)$$

Для оценки значимости полученных значений воспользуемся методом t -статистики и соответствующих p -value для каждого коэффициента регрессии:

$$t_j = \frac{\beta_j}{SE(\beta_j)} \quad (4.13)$$

В данном случае стандартные ошибки коэффициентов $SE(\beta_j)$ – это квадратные корни диагональных элементов ковариационной матрицы, рассчитывающиеся по формуле [13]:

$$SE(\beta_j) = \sqrt{\left[\sigma^2 (X^T X)^{-1} \right]_{jj}} \quad (4.14)$$

где σ^2 – дисперсия ошибок (остаточная дисперсия):

$$\sigma^2 = \frac{T^T T}{m - k} \quad (4.15)$$

где m – число наблюдений, k – число коэффициентов (включая свободный член).

Основываясь на полученных значениях p -value (≤ 0.05), будем рекурсивно удалять незначимые коэффициенты с одновременным пересчетом β и их p -value на каждой итерации вследствие изменения матрицы признаков X .

Начальная модель регрессии с степенью полинома $n=4$ для температуры воздуха (T) с использованием всех коэффициентов регрессии имеет вид:

$$\begin{aligned}
T = & 156.2 + 0.0013 \cdot x - 0.1927 \cdot y + 3.9778 \cdot T_{out} + \\
& 0.011 \cdot x^2 - 0.4192 \cdot x \cdot y + 8.4245 \cdot x \cdot T_{out} - 0.0116 \cdot y^2 - \\
& 0.1976 \cdot y \cdot T_{out} + 1.3141 \cdot T_{out}^2 + 0.0538 \cdot x^3 - 0.0116 \cdot x^2 \cdot y - \\
& 1.2514 \cdot x^2 \cdot T_{out} + 0.0578 \cdot x \cdot y^2 - 0.0020 \cdot x \cdot y \cdot T_{out} + 0.0092 \cdot x \cdot T_{out}^2 - \\
& 0.0157 \cdot y^3 + 0.0036 \cdot y^2 \cdot T_{out} - 0.0072 \cdot y \cdot T_{out}^2 + 0.0351 \cdot T_{out}^3 - \\
& 0.0057 \cdot x^4 + 0.0043 \cdot x^3 \cdot y + 0.0620 \cdot x^3 \cdot T_{out} - 0.0044 \cdot x^2 \cdot y^2 + \\
& 0.0002 \cdot x^2 \cdot y \cdot T_{out} - 0.0005 \cdot x^2 \cdot T_{out}^2 + 0.0001 \cdot x \cdot y^3 + 0.0000 \cdot x \cdot y^2 \cdot T_{out} + \\
& 0.0000 \cdot x \cdot y \cdot T_{out}^2 + 0.0000 \cdot x \cdot T_{out}^3 + 0.0005 \cdot y^4 + 0.0000 \cdot y^3 \cdot T_{out} + \\
& 0.0001 \cdot y^2 \cdot T_{out}^2 - 0.0001 \cdot y \cdot T_{out}^3 + 0.0003 \cdot T_{out}^4
\end{aligned} \tag{4.16}$$

После рекурсивного удаления незначимых коэффициентов, уравнение (4.16) принимает вид:

$$\begin{aligned}
T = & 0.2817 + 0.9024 \cdot x + 1.8935 \cdot x^2 - 0.3325 \cdot x \cdot y - \\
& 0.1402 \cdot y \cdot T_{out} + 0.000222 \cdot x^3 - 0.3994 \cdot x \cdot y^2 + 0.0417 \cdot y^3 - \\
& 0.0159 \cdot y \cdot T_{out}^2 - 0.005732 \cdot x^4 + 0.0227 \cdot x^3 \cdot y + 0.00246 \cdot x^2 \cdot y^2 - \\
& 0.00312 \cdot y^4 + 0.000481 \cdot y^2 \cdot T_{out}^2 + 0.000009 \cdot y \cdot T_{out}^3
\end{aligned} \tag{4.17}$$

Аналогичным образом была получена модель регрессии для скорости воздуха (V) с степенью полинома $n = 4$:

$$\begin{aligned}
V = & 100.291 + 2.9583 \cdot T_{out} + 6.2618 \cdot x \cdot T_{out} + 0.0229 \cdot y^2 + 1.0132 \cdot T_{out}^2 + \\
& 0.0163 \cdot x^2 \cdot y - 0.9546 \cdot x^2 \cdot T_{out} - 0.0118 \cdot x \cdot y^2 - 0.000264 \cdot y \cdot T_{out}^2 + \\
& 0.0274 \cdot T_{out}^3 - 0.00162 \cdot x^3 \cdot y + 0.0481 \cdot x^3 \cdot T_{out} + 0.000882 \cdot x^2 \cdot y^2 + \\
& 0.000046 \cdot y^4 + 0.000050 \cdot y^3 \cdot T_{out} + 0.000032 \cdot y^2 \cdot T_{out}^2 + 0.000275 \cdot T_{out}^4
\end{aligned} \tag{4.18}$$

Для оценки доли дисперсии зависимой переменной объяснённой моделью, использовался коэффициент детерминации [61]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y}_i)^2} \tag{4.19}$$

где m – число наблюдений, y_i – наблюдаемое значение зависимой переменной, $\hat{y}_i$ – предсказанное значение зависимой переменной, $\bar{y}_i$ – среднее значение зависимой переменной.

Для оценки степени монотонной связи между расчетными и экспериментальными данными воспользуемся коэффициентом корреляции Пирсона:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^m (y_i^{pac} - \bar{y})(y_i^{экс} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (y_i^{pac} - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^m (y_i^{экс} - \bar{y})^2}} \quad (4.20)$$

С целью проверки гомоскедастичности остатков регрессионной модели использовался тест Бреуша-Пагана [4] в рамках которого необходимо оценить параметры модели с помощью метода наименьших квадратов (OLS) для получения остатков $\hat{\tau}_i$:

$$\hat{\tau}_i = y_i - \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i + \hat{\beta}_2 x_i^2 + \hat{\beta}_3 x_i^3 + \dots + \hat{\beta}_n x_i^n \quad (4.21)$$

где y_i – исследуемые значения полиномиальной модели.

Построим вспомогательную модель регрессии квадратов остатков $\hat{\tau}_i^2$:

$$\hat{\tau}_i^2 = \alpha_0 + \alpha_1 x_i + \alpha_2 x_i^2 + \alpha_3 x_i^3 + \dots + \alpha_n x_i^n + v_i \quad (4.22)$$

Найдем сумму квадратов остатков вспомогательной регрессии по формуле:

$$SSR = \sum_{i=1}^m (\hat{\tau}_i^2 - \hat{u}_i)^2 \quad (4.23)$$

где $\hat{u}_i$ – предсказанные значения для вспомогательной регрессии.

Общая сумма квадратов:

$$SST = \sum_{i=1}^m \left(\hat{\tau}_i^2 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \hat{\tau}_i^2 \right)^2 \quad (4.24)$$

Тогда коэффициент детерминации R^2 определяется как:

$$R^2 = 1 - \frac{SSR}{SST} \quad (4.25)$$

Статистика теста Бреуша-Пагана находится по формуле:

$$BP = \frac{mR^2}{2} \quad (4.26)$$

В рамках данного теста сравнивается статистика BP , имеющая асимптотическое χ^2 распределение с k степенями свободы, с критическим значением из χ^2 распределения с уровнем значимости α и k степенями свободы:

$$p\text{-value} = P(BP, k) \quad (4.27)$$

Оценка наличия автокорреляции в остатках регрессионной модели была проведена с помощью теста Дарбина-Уотсона [14]:

$$d = \frac{\sum_{i=2}^m (y_i - \hat{y}_i - y_{i-1} - \hat{y}_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4.28)$$

Так как данный тест не возвращает прямого $p\text{-value}$, сама статистика используется в качестве приближенного значения. Если значение тестовой статистики близко к 2, это может указывать на отсутствие автокорреляции в остатках модели.

Для проверки, отклоняются ли остатки модели от нормального распределения, используя меры асимметрии и эксцесса, проведен тест Джарка-Бера [5]:

$$JB = \frac{n}{6} \left(S^2 + \frac{(K-3)^2}{4} \right) \quad (4.29)$$

Коэффициент асимметрии S и эксцесса K остатков вычисляются следующим образом:

$$S = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^m (e_i - \bar{e})^3}{\left(\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^m (e_i - \bar{e})^2} \right)^3} \quad (4.30)$$

$$K = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^m (e_i - \bar{e})^4}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^m (e_i - \bar{e})^2 \right)^2} \quad (4.31)$$

где m – число наблюдений, $\bar{e}$ – среднее значение остатков, $e_i = y_i - \hat{y}_i$ – остатки регрессионной модели, y_i – наблюдаемое значение зависимой переменной, $\hat{y}_i$ – предсказанное значение зависимой переменной.

Для ответа на вопрос, объясняет ли регрессионная модель значительную часть вариации зависимой переменной, использовался тест Фишера [209].

В рамках данного теста сумма квадратов отклонений делится на две части: объясненную сумму квадратов (SSR) и остаточную сумму квадратов (SSE):

$$SST = \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (4.32)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4.33)$$

где $\bar{y}_i$ – среднее значение зависимой переменной, $\hat{y}_i$ – предсказанное значение зависимой переменной

На основе полученных значений рассчитываются средние квадраты регрессии (MSR) и ошибки (MSE):

$$MSR = \frac{SSR}{k} \quad (4.34)$$

$$MSE = \frac{SSE}{m - k - 1} \quad (4.35)$$

где m – число наблюдений, k – количество независимых переменных.

Критерий Фишера рассчитывается как отношение среднего квадрата регрессии к среднему квадрату ошибки:

$$F = \frac{MSR}{MSE} \quad (4.36)$$

p -value для данной статистики определяется как вероятность того, что значение F будет больше или равно наблюдаемому значению при условии, что нулевая гипотеза верна. Это можно выразить через кумулятивное распределение:

$$p\text{-value} = P(F_{k, m-k-1} \geq F_{\text{наблюдаемое}}) \quad (4.37)$$

Для оценки точности регрессионной модели воспользуемся средней абсолютной процентной ошибкой (*MAPE*):

$$MAPE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100\% \quad (4.38)$$

где m – число наблюдений, y_i – наблюдаемое значение зависимой переменной, $\hat{y}_i$ – предсказанное значение зависимой переменной.

В табл. 4.2 представлены результаты проведенной проверки уравнений регрессии для температуры (T) и скорости воздуха (V).

Табл. 4.2. Результаты проверки уравнений регрессий

Метод	Обозначение	Температура воздуха (T)	Скорость воздуха (V)
Коэффициент детерминации	R^2	0.9235	0.909
Коэффициентом корреляции Пирсона	r	0.962	0.959
	$p\text{-value}$	$7.25 \cdot 10^{-10}$	$1.27 \cdot 10^{-9}$
Тест Бреуша-Пагана	BP	47.723	31.668
	$p\text{-value}$	0.142	0.582
Теста Дарбина-Уотсона	d	1.86	1.992
Тест Джарка-Бера	JB	1.012	4.207
	$p\text{-value}$	0.603	0.122
Тест Фишера	F	990.4	10.079
	$p\text{-value}$	$1.7 \cdot 10^{-108}$	$2.07 \cdot 10^{-24}$
Средняя абсолютная процентная ошибка	$MAPE$	1.57 %	2.45 %

Коэффициенты детерминации (R^2) близкие к 1 указывает на то, что экспериментальные значения зависимых переменных хорошо объясняются полученными моделями регрессии, что так же подтверждается высокими значениями коэффициентов корреляции Пирсона (r).

Полученные в ходе тестов Бреуша-Пагана значения $p\text{-value}$ для обеих моделей оказалось выше уровня статистической значимости (0.05), что не позволяет отклонить нулевую гипотезу о гомоскедастичности остатков, следовательно их дисперсия не изменяется в зависимости от значений предикторов что означает, что регрессионные модели учитывают структуру экспериментальных данных.

Так же нулевая гипотеза не отвергается в тесте Джарка-Бера (JB) что свидетельствует о том, что остатки регрессионной модели нормально распределены, следовательно оценки параметров модели являются наиболее эффективными (с минимальной дисперсией), и результаты тестов гипотез (например тест Фишера (F)) являются точными и надежными.

Тесты Дарбина-Уотсона (d) указывают на отсутствие корреляции между последовательными остатками ($d \approx 2$), следовательно, можно утверждать, что переменные-предикторы в представленных регрессионных моделях являются статистически значимыми.

Также адекватность полученных моделей подтверждается результатами теста Фишера (F) свидетельствующими о способности данных моделей объяснять значительную часть вариации зависимой переменной.

Аналогичный анализ была проведен для результатов, полученных с использованием фреймворка *SAFHE*. Результаты тестов и метрик, представлены в табл. 4.3.

Табл. 4.3. Результаты проверки значений, полученных при помощи *SAFHE*

Метод	Обозначение	Температура воздуха (T)	Скорость воздуха (V)
Коэффициент детерминации	R^2	0.936	0.8812
Коэффициентом корреляции Пирсона	r	0.955	0.898
	$p\text{-value}$	$8.13 \cdot 10^{-10}$	$4.27 \cdot 10^{-9}$
Тест Бреуша-Пагана	BP	62.111	38.428
	$p\text{-value}$	0.091	0.62
Теста Дарбина-Уотсона	d	1.77	2.48
Тест Джарка-Бера	JB	1.51	5.4
	$p\text{-value}$	0.401	0.2
Тест Фишера	F	870.03	16.15
	$p\text{-value}$	$6.05 \cdot 10^{-123}$	$9.12 \cdot 10^{-19}$
Средняя абсолютная процентная ошибка	$MAPE$	4.61 %	1.98 %

Результаты, полученные с использованием фреймворка *SAFHE*, демонстрируют высокую степень согласованности с экспериментальными данными. Значения коэффициентов детерминации и корреляции Пирсона подтверждают хорошее качество аппроксимации, а результаты статистических тестов свидетельствуют об адекватности моделей. Несмотря

на небольшое увеличение средней абсолютной процентной ошибки по сравнению с регрессионными моделями, показатели остаются в пределах допустимых значений, что указывает на высокую точность расчетов, выполненных с помощью SAFHE.

Сравнение поля скоростей и температуры, рассчитанное двумя методами (*CFD* (фреймворк *SAFHE*) и регрессионные модели) и найденное экспериментально представлено на рис. 4.8 и рис. 4.9.

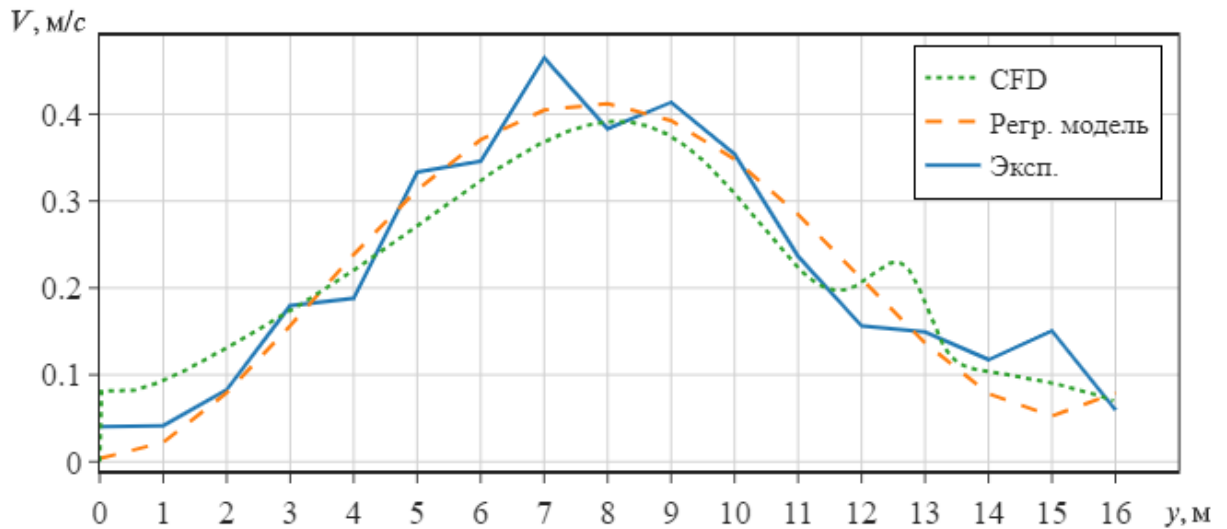


Рис. 4.8. Сравнения поля скорости на центральном продольном сечении

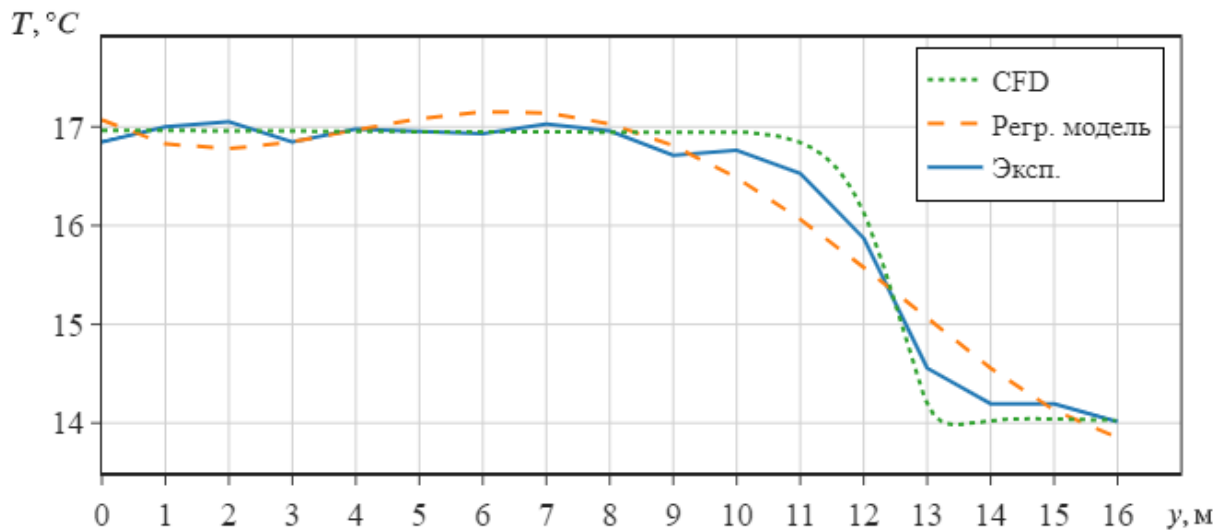


Рис. 4.9. Сравнения поля температуры на центральном продольном сечении

4.5. Технико-экономическое обоснование

Экономический эффект от внедрения системы регулируемого воздухообмена оценивается снижением расходов на отопление и вентиляцию за счет оптимизации теплопередачи и снижения тепловых потерь.

Для расчета экономии тепловой энергии был использован метод тепловых балансов, адаптированный к особенностям трех расчетных периодов года: холодного, переходного и теплого. Такой подход позволил учесть влияние различных климатических условий и адаптировать вычисления к реальной эксплуатации храмов на протяжении всего года. Расчеты учитывают как особенности сезонных теплопотерь, так и изменения в потребности тепловой энергии в зависимости от времени года.

Общая мощность системы отопления и теплопотери через ограждающие конструкции определялись на основе теплотехнического расчета, выполненного в соответствии с методикой, изложенной в [218]. Этот метод обеспечивает точность вычислений за счет учета теплопередачи через материалы, плотности тепловых потоков и геометрии ограждающих конструкций.

Дополнительно для каждого времени года было определено прогнозное распределение количества прихожан, выраженное в процентном соотношении к полной вместимости храма: минимальное – 10%, среднее – 50% и максимальное – 100%. При этом использовалась следующая пропорция: женщины составляют 50% от общего числа, мужчины – 30%, а дети – 20%. Такой подход позволяет более точно моделировать нагрузки на систему отопления в зависимости от состава и активности прихожан. Тогда общее количество теплоты, выделяемое прихожанами, имеет вид [143]:

$$Q_{\text{л}} = 0,875 \cdot n \cdot \beta_u \cdot \beta_{\text{од}} \cdot (35 - t_{\text{с}}) \cdot (2,5 + 10,36 \cdot \sqrt{v}) \quad (4.39)$$

где n – количество прихожан, β_u – коэффициент, учитывающий интенсивность работы, $\beta_{\text{од}}$ – коэффициент, учитывающий теплозащитные свойства одежды, в зависимости от периода года (1 – для летней одежды, 0,65

– для межсезонной одежды, 0,48 – для зимней одежды), v – скорость воздуха в помещении.

Количество теплоты, выделяемое в результате горения свечей, рассчитывается с использованием следующей формулы [213]:

$$Q_{св} = Q_p'' \cdot G_{св} \quad (4.40)$$

где Q_p'' – низшая теплота сгорания парафина в свечах (46810 кДж/кг), $G_{св}$ – расход свечей, кг/ч.

Расход свечей рассчитывается на основе максимальной вместимости столешниц в конкретном храме, с учетом сезонных особенностей и прогнозируемого числа прихожан [230]. Если такие данные отсутствуют, для расчетов используются ориентировочные значения, представленные в табл. 4.4. Такой подход позволяет адаптировать расчет под реальные условия эксплуатации, обеспечивая достаточную гибкость и точность в оценке расхода свечей.

Табл. 4.4. Расход свечей

Количество человек, чел.	60	300	600
Расход свечей, кг/ч.	0,5	1,5	1,55

Таким образом, суммарные тепловыделения определяются:

$$\sum Q = Q_l + Q_{св} + Q_{от} \quad (4.41)$$

Величина несбалансированного теплового потока:

$$\Delta Q_{до/после} = \sum Q - Q_{пот до/после} \quad (4.42)$$

Экономический эффект оценивается снижением расхода энергии после внедрения аэрации и применения оптимального режима открытия и закрытия фрамуг. Для этого составляются два тепловых баланса: до и после модернизации системы воздухообмена. Разница в теплопотреблении и будет представлять собой экономическую выгоду.

$$E = \Delta Q \cdot C_{энергии} \quad (4.43)$$

где $C_{энергии}$ – стоимость 1 кВт-ч тепловой энергии.

Экономия тепловой энергии ΔQ будет выражаться как разница между несбалансированным тепловым потоком до и после внедрения системы:

$$\Delta Q = \Delta Q_{\text{после}} - \Delta Q_{\text{до}} \quad (4.44)$$

Годовой показатель экономии $E_{\text{год}}$ определяется по формуле:

$$E_{\text{год}} = E_{\text{лето}} + E_{\text{межсез}} + E_{\text{зима}} \quad (4.45)$$

Далее представлены тепловые балансы для трех исследуемых храмов: церкви во имя святого благоверного князя Александра Невского, собора Рождества Пресвятой Богородицы, кафедрального собора святого благоверного князя Александра Невского.

Табл. 4.5. Тепловой баланс церкви во имя святого благоверного князя Александра Невского

Пер. года	$Q_{\text{пот до}}$	$Q_{\text{пот пос}}$	Прих. чел	Тепловыделения, Вт				$\Delta Q_{\text{до}}$	$\Delta Q_{\text{пос}}$
				$Q_{\text{л}}$	$Q_{\text{св}}$	$Q_{\text{от}}$	ΣQ		
Зима	31849	30398	60	2775	23086	36298	62159	30309	31760
			300	13751	68637		118686	86836	88287
			600	27254	70283		133835	101985	103436
Межс	7283	6967	60	3724	22879	19194	45797	38513	38829
			300	18397	67808		105399	98115	98431
			600	36905	70283		126382	119098	119414
Лето	0	0	60	2098	22741	0	24839	24839	24839
			300	10522	68429		78951	78951	78951
			600	21110	70925		92035	92035	92035

Табл. 4.6. Тепловой баланс собора Рождества Пресвятой Богородицы

Пер. года	$Q_{\text{пот до}}$	$Q_{\text{пот пос}}$	Прих. чел	Тепловыделения, Вт				$\Delta Q_{\text{до}}$	$\Delta Q_{\text{пос}}$
				$Q_{\text{л}}$	$Q_{\text{св}}$	$Q_{\text{от}}$	ΣQ		
Зима	37049	35334	60	3225	26831	42186	72242	35192	36908
			300	16001	79871		137733	101008	102724
			600	31755	81892		155182	118783	120499
Межс	8479	8243	60	4334	26624	22308	53266	44787	45023
			300	21445	79042		122795	114316	114552
			600	43001	81892		147201	138722	138958
Лето	0	0	60	2443	26486	0	28929	28929	28929
			300	12250	79664		91914	91914	91914
			600	24565	82534		107099	107099	107099

Табл. 4.7. Тепловой баланс кафедрального собора святого благоверного князя Александра Невского

Пер. года	$Q_{пот до}$	$Q_{пот пос}$	Прих. чел	Тепловыделения, Вт				$\Delta Q_{до}$	$\Delta Q_{пос}$
				$Q_{л}$	$Q_{св}$	$Q_{от}$	ΣQ		
Зима	56170	54174	60	4856	40406	63530	108792	52621	54618
			300	24848	124026		212404	156233	158230
			600	47727	123082		234339	178168	180165
Межс	12789	12177	60	6692	41108	33595	81395	68606	69217
			300	33459	123324		190378	177589	178200
			600	61201	116552		211348	198559	199170
Лето	0	0	60	3619	39235	0	42854	42854	42854
			300	18208	118408		136616	136616	136616
			600	36417	122356		158773	158773	158773

Годовые показатели технико-экономических эффектов для всех трех храмов представлен в табл. 4.8.

Табл. 4.8. Технико-экономический эффект при реализации системы контролируемого воздухообмена

Объект	Экономия тепловой энергии ΔQ , Вт	Годовой показатель экономии $E_{год}$, руб.
Церковь во имя святого благоверного князя Александра Невского	5301	78,521.10
Собор Рождества Пресвятой Богородицы	5856	86,706.70
Кафедральный собор святого благоверного князя Александра Невского	7824	115,920.19

4.6. Выводы по четвертой главе

1. Проведены измерения скоростных и температурных полей в характерных точках «церкви во имя святого благоверного князя Александра Невского» в Богородском районе Нижегородской области.

2. Экспериментальные исследования показали, что в основном объеме храма температура воздуха колебалась в диапазоне 16–18 °С, а скорость воздушных потоков составляла от 0,05 до 0,6 м/с. В барабане наблюдались более низкие температуры (13–15 °С) и меньшие скорости (0,05–0,2 м/с), что указывает на неравномерное распределение тепловых условий внутри храма.

3. Проведен углубленный анализ, подтвердивший воспроизводимость, устойчивость и согласованность экспериментальных данных, полученных при измерении температуры и скорости воздуха в центральной части нефа. Анализ продемонстрировал стабильность результатов: коэффициент вариации для температуры составил 4,23%, а для скорости воздуха – 13,64%. Эти показатели свидетельствуют о высокой надежности полученных данных и достоверности выполненных измерений.

4. Разработан вычислительный алгоритм для построения уравнения полиномиальной регрессии степени n , позволяющего определить зависимости скорости и температуры воздуха от трех ключевых факторов. Этот алгоритм обеспечивает точное моделирование и учет влияния переменных на исследуемые параметры.

5. Построенные на основе экспериментальных данных регрессионные модели продемонстрировали высокую степень точности. Коэффициенты детерминации составили 0,9235 для температуры и 0,909 для скорости воздуха, что указывает на способность моделей объяснять более 90% наблюдаемой вариации данных, подтверждая их надежность и применимость. Модели, реализованные в фреймворке SAFHE, также показали высокие значения коэффициентов детерминации (0,936 для температуры и 0,8812 для скорости воздуха), что свидетельствует о сопоставимой точности и эффективности данного подхода.

5. Сравнение результатов расчетов, выполненных с помощью фреймворка SAFHE, с экспериментальными данными и моделями регрессии показало хорошее соответствие полей температур и скоростей воздушных потоков, что подтверждает адекватность используемых методов моделирования.

6. В результате технико-экономического обоснования внедрения системы регулируемого воздухообмена в православных храмах был выявлен значительный экономический эффект тепловой энергии в пределах от 5301 до 7824 Вт, что привело к финансовой выгоде в диапазоне от 78521,10 до

115920,19 рублей в год, заключающийся в сокращении расходов на отопление за счет снижения тепловых потерь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная задача создание и поддержание микроклимата православных храмов регулируемым воздухообменом на основе математического моделирования течения и теплообмена.

Итоги выполненного исследования

1. Разработана математическая модель течения и теплообмена при конвекции идеального сжимаемого вязкого и теплопроводного газа внутри православного храма с программно-алгоритмической реализацией. Сеточная сходимость по числу Нуссельта показала, что на детализированной сетке с 37356 узлами ошибка составила 2,7%, а на грубых сетках – более 42,6%. Модель выявила зоны циркуляционного движения воздуха в центральной части и барабане купола, обусловленные неравномерным распределением плотностей и подъемных сил, что подтверждает её эффективность для анализа микроклимата и оптимизации вентиляции.

2. С помощью фреймворка «SAFHE» определены распределения давления, плотности, температуры и компонентов скорости. Построены графики линий тока и полей температуры. Валидация результатов показала хорошее совпадение с экспериментальными данными: коэффициенты детерминации составили 0,9235 для температуры и 0,909 для скорости воздуха в случае регрессионных моделей, и 0,936 и 0,8812 соответственно – для модели SAFHE. Во всех случаях средняя абсолютная процентная ошибка не превышала 5%, что подтверждает высокую точность и надёжность обоих подходов для анализа микроклимата в храмах.

3. Разработаны компьютерные модели воздушных течений в трех исследуемых храмах с использованием ANSYS Fluent. Доказана сеточная сходимость по числу Нуссельта: адаптивные сетки с 1,4–2,1 млн ячеек обеспечили ошибку 2,5–3,2% против 40–47% на менее детализированных

сетях. Модели позволили получить точные распределения температурных полей и линий тока, что важно для анализа микроклимата и проектирования систем вентиляции и отопления.

4. Для каждого теплового режима исследуемых храмов методом градиентного спуска определены оптимальные углы открытия приточных и вытяжных фрамуг, обеспечивающие соответствие нормативным параметрам внутреннего воздуха. В церкви во имя святого благоверного князя Александра Невского (д. Березовка) оптимальные углы открытия приточных фрамуг варьировались от 0° зимой до 60° летом, а вытяжных – до 60° в зимний и летний периоды. В соборе Рождества Пресвятой Богородицы (с. Катунки) и кафедральном соборе святого благоверного князя Александра Невского (г. Нижний Новгород) углы приточных фрамуг также изменялись в пределах 0 – 60° в зависимости от сезона, что обеспечивало стабильный микроклимат.

5. На основании разработанных моделей определены очертания линий тока и полей скорости и температуры внутри всех трех храмов для каждого теплового режима в рамках года, что позволило выявить зоны циркуляционного движения воздуха в центральной части храма и в области барабана купола. Эти зоны образуются вследствие неравномерного распределения плотностей и подъемных сил, что требует точной настройки вентиляционных систем для обеспечения нормируемых параметров микроклимата.

6. Проведены экспериментальные исследования температурных и скоростных полей воздуха в зимний период в центральной части «церкви во имя святого благоверного князя Александра Невского» (д. Кожевенное, Нижегородская область). Температура в основном объеме храма составляла 16 – 18°C , скорость воздушных потоков – $0,05$ – $0,6$ м/с. В барабане купола зафиксированы более низкие температуры (13 – 15°C) и скорости ($0,05$ – $0,2$ м/с), что указывает на неравномерность тепловых условий, учитываемую при дальнейшей оптимизации микроклимата.

7. Доказана воспроизводимость экспериментальных исследований с использованием коэффициента вариации, анализа конкордации Кендалла и критерия Кохрена. Коэффициент вариации составил 4,23% для температуры и 13,64% для скорости воздуха, что подтверждает стабильность измерений. Конкордация Кендалла показала согласованность серий измерений с коэффициентами 0,885 и 0,712 соответственно. Критерий Кохрена (значения ниже 0,394) подтвердил однородность дисперсий, а данные соответствовали контрольным картам Шухарта, что доказывает надежность результатов.

8. На основе экспериментальных данных получены уравнения полиномиальной регрессии 4-й степени, описывающие скорость и температуру воздуха в центральной части храма. Средняя абсолютная процентная ошибка составила 1,57% для температуры и 2,45% для скорости, что свидетельствует о высокой точности моделей. Проверка данных с помощью тестов Бреуша-Пагана и Дарбина-Уотсона показала, что ошибки в моделях не зависят от времени и имеют равномерное распределение. Тест Джарка-Бера подтвердил, что распределение ошибок близко к нормальному. Значимость моделей подтверждена тестом Фишера ($p\text{-value} < 0,001$), что говорит об их надёжности при описании тепловых процессов.

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы могут быть **рекомендованы** для внедрения в деятельность по проектированию, строительству и эксплуатации систем отопления и вентиляции православных храмов.

Перспективы дальнейшей разработки темы: улучшение методов численного моделирования и создание более точных и комплексных моделей микроклимата православных храмов; применение PINN нейронных сетей для моделирования микроклимата православных храмов [130]; применение интернет вещей (IoT), для мониторинга и управления микроклиматом в режиме реального времени (разработка умных систем управления климатом); повышение энергоэффективности различных решений по аэрации и исследование их воздействия на экологию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. – Atlanta: ASHRAE, 2019. – 60 p.
2. Aste N., Leonforte F., Del Pero C., Testa D., Vanoli G.P. CFD Comfort Analysis of a Sustainable Solution for Church Heating. // Energy Procedia. – 2017. – v. 105. – p. 2797-2802.
3. Bianco F., Puppo G., Russo G. High-order central schemes for hyperbolic systems of conservation laws. // SIAM J. Sci. Comput. – 1999. vol. 21, № 1. p. 294–322.
4. Breusch T. S., Pagan A. R. A Simple Test for Heteroscedasticity and Random Coefficient Variation. – Canberra: University of Southampton and Australian National University, 1979. – p. 1287.
5. Carlos M. J., Anil K. B. A Test for Normality of Observations and Regression Residuals. // International Statistical Review. – 1987. – v. 55, No. 2. – p. 163-172.
6. Chenari B., Dias Carrilho J., da Silva M.G. Towards sustainable, energy-efficient and healthy ventilation strategies in buildings: A review. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. – v. 59. – p. 1426-1447.
7. Chorin A. J. Numerical solution of incompressible flow problems. – Philadelphia: Soc. for Industr. and Appl. Math., 1968 – p. 64–70.
8. Ciocan V., Turcanu E. F., Verdes M., Luciu R. S., Balan M. C., Hudisteanu1 S. V., Burlacu A. Thermal comfort assessment for different heating system using CFD-modelling inside of an orthodox church. // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. – 2019. – v. 586(1).
9. Courant R., Friedrichs K. O, Lewy H. Uber die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik. // Mathematische Annalen. – 1928. – B. 100. – S. 32–74.

10. Douglas C. Montgomery, Elizabeth A. Peck, G. Geoffrey Vining. Introduction to Linear Regression Analysis. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2012. – p. 672.
11. Douglas J. On the Numerical Integration of $u_{xx} + u_{yy} = u_t$ by Implicit Methods. // Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. – 1955. – v. 3. – p. 42–65.
12. Douglas J., Rachford H. H. On the numerical solution of heat conduction problems in two and three space variables. // Trans. Amer. Math. Soc. – 1955. – v. 82. – p. 421–439.
13. Draper, Norman R., Harry Smith. Applied Regression Analysis. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 1998. – p. 736.
14. Durbin, J., Watson G. S. Testing for Serial Correlation in Least Squares Regression. // Biometrika. – 1950. – v. 37, No. 3-4. – p. 409–428.
15. EKPE W. K. Numerical solutions to two-dimensional Navier-Stokes equations: PhD. Applied Mathematics: Zululand, 2015. – p. 46.
16. EN 15759-1:2011. Conservation of cultural property – Indoor climate – Part 1: Guidelines for heating churches, chapels and other places of worship. – Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2011. – 20 p.
17. Evans M. W., Harlow F. H. The Particle-in-Cell method for hydrodynamic calculations. // Los Alamos Sci. Lab.. – 1957. – Rept. No. LA-2139.
18. Frankel S. P. Convergence rates of iterative treatment of partial differential equations. – 4 p. – England. Cambridge: Math. Tables and Other Aids to Computation, 1950.
19. Harlow F. H., Amsden A. A. Numerical calculation of almost incompressible flow. // J. of Comput. Phys. – 1968. – v. 3. – p. 80–93.
20. Harlow F. H., Welch J. E. Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface. // Phys. of Fluids. – 1965. – v. 8, No.12. – p. 2182–2189.

21. Harlow F. H., Fromm J. E. Dynamics and heat transfer in the von Karman wake of a rectangular cylinder. // *Phys. of Fluids*. – 1964. – v. 7, No. 8. – p. 1147–1156.
22. James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R. *An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R*. – New York.: Springer, 2013. – p. 426.
23. Jelle B.P. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities. // *Energy and Buildings*. 2011. – v. 43, № 10. – p. 2549-2563.
24. Kurganov A. A., Levy D. Third-Order Semidiscrete Central Scheme for Conservation Laws and Convection-Diffusion Equations. // *SIAM J. Sci. Comput.* 2000. – vol. 22, № 4. – p. 1461–1488.
25. Kurkin, E. I. Algebraic and k - ε Turbulence Model Comparison in the Problem of the Boundary Layer on the Walls of a Rotating Axisymmetric Diffuser // *Procedia Computer Science*. – 2015. – v. 65(1). – p. 133–139.
26. Kurzrock J. W., Mates R. E. Exact Numerical Solutions of the Time-Dependent Compressible Navier-Stokes Equations. // *AIAA Paper*. – 1966. – v. 66, 30.
27. Lax P. D. Weak solutions of nonlinear hyperbolic equations and their numerical computation. // *Comm. Pure and Appl. Math.* – 1953. – v. 7. – p. 159–193.
28. Lax P. D., Wendroff B. Systems of conservation laws. // *Comm. Pure and Appl. Math.* – 1960. – v. 13. – p. 217–237.
29. Levy D., Bryson S. Relaxed High-Resolution Schemes for Hyperbolic Conservation Laws. // *J. of Scientific Computing*. – 2006. – vol. 27, № 1. – p. 163–175.
30. Logachev K. I., Popov E. N., Kozlov T. A., Ziganshin A. M., Averkova O. A., Tiron O. V. Improved aerodynamic performance of the exhaust hood with triple-faced flange. // *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 91. - p. 109664.
31. Logachev K. I., Popov E. N., Kozlov T. A., Ziganshin A. M., Gao R., Averkova O. A., Tiron O. V. Numerical and experimental studies of airflows at

exhaust hoods with inlet extensions. // *Building and Environment*. 2024. Vol. 63. - p. 105490.

32. Logachev K. I., Ziganshin A. M., Averkova O. A. Simulations of dust dynamics around a cone hood in updraft conditions. // *J. Occup. Environ. Hyg.* 2018. Vol. 15, - № 10. - p. 715–731.

33. Logachev K. I., Ziganshin A. M., Huang Y., Wang Y., Averkova O. A., Popov E. N., Kozlov T. A. Developing a mathematical simulation method for three-dimensional separated airflow at inlet of local exhaust devices. // *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 261. - p. 111753.

34. Lopez-Carreón I., Jahan E., Yari M.H., и др. Moisture Ingress in Building Envelope Materials: (II) Transport Mechanisms and Practical Mitigation Approaches // *Buildings*. 2025. – v. 15, № 5. – p. 762.

35. Ludford G., Polachek H., Seeger R. J. On unsteady flow of compressible viscous fluids. // *Appl. Phys.* – 1953. – v. 24. – p. 490–495.

36. Macagno E. O. Some new aspects of similarity in hydraulics. // *La Houille Blanche*. – 1965. – t. 20, No. 3. – p. 751–759.

37. Mader C. L. The two-dimensional hydrodynamic hot spot. // *Los Alamos Sci. Lab.*. – 1964. – LASL Rept. LA-3077.

38. McCorquodale P., Colella P. A. high-order finite-volume method for conservation laws on locally refined grids. // *Comm. App. Math. and Comp. Sci.* vol. 6, № 1. – p. 1–25

39. O'Brien G. G., Hyman M. A. Kaplan S. A study of the numerical solution of partial differential equations. // *J. Math and Phys.* – 1950. – v. 29. – p. 223–251.

40. Patankar S. V., Spalding D. B. A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows. // *International Journal of Heat Mass Transfer*. – 1972. – v. 15, No.10. – p. 1787–1806.

41. Peaceman D. W., Rachford H. H., Jr. The numerical solution of parabolic and elliptic differential equations. // *Soc. Indust. Appl. Math.* – 1955. – v. 3, No. 1. – p. 28–41.

42. Peric M. A Finite Volume Method for the Prediction of Three-Dimensional Fluid Flow in Complex Ducts.: Ph.D. Engineering Department: Imperial College, London, 1985.
43. Phillips H., Wiener N. Nets and the Dirichlet program. // J. Math and Phys. – 1923. – v. 2. – p. 105–124.
44. Poljak M., Ponechal R. Microclimatic Monitoring-The Beginning of Saving Historical Sacral Buildings in Europe. // Energies. 2023. – v. 16, № 3. – p. 1156.
45. Richardson L. F. The approximate arithmetical solution by finite differences of physical problems involving differential equations, with an application to the stresses in a masonry dam. // Trans. Roy. Soc. London, Ser. A. – 1910. – v. 210. – p. 307–357.
46. Richtmyer R. D. A survey of difference methods for no steady fluid dynamics. – 63, 2 p. – Boulder, Colorado: NCAR Technical, 1963.
47. Richtmyer R. D. Difference methods for initial-value problems. – 4 p. – New York: Interscience Publishers, Inc., 1957 – p. 240.
48. Rimon Y., Cheng S. I. Numerical solution of a uniform flow over a sphere at intermediate Reynolds numbers. // Phys. of Fluids. – 1969. – v. 12 No.5. – S. 949–959.
49. Rupp R.F., Vásquez N.G., Lamberts R. A review of human thermal comfort in the built environment // Energy and Buildings. 2015. –v. 105. – p. 178-205.
50. Southwell R. V. Relaxation methods in theoretical physics. – New York: Oxford Univ. Press, 1946.
51. Strang G. Differential Equations and Linear Algebra. – Cambridge, 2014. – p. 512.
52. Sukhanova, I. Numerical modeling of the microclimate and air quality of an Orthodox church in Saint-Petersburg. // E3S Web of Conferences. – 2019. – Vol. 91.

53. Thom A. The flow past circular cylinders at low speeds. – 141 p. – England. London: Proc. Roy. Soc. London, Ser. A, 1933. – p. 651–666.
54. Thoman D. C., Szewczyk A. A. Numerical solutions of time dependent two-dimensional flow of a viscous, incompressible fluid over stationary and rotating cylinders. – 66, 14 p. – Eng. Univ. of Notre Dame: Heat Transfer and Fluid Mech. Lab., 1966.
55. Thompson J. F., Warsi S., Mastin C. W. Numerical grid generation – foundations and applications. – Amsterdam: North-Holland, 1985. – p. 502.
56. Trevor Hastie, Robert Tibshirani, Jerome Friedman. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. – New York: Springer, 2009. – p. 745.
57. Turcanu E. F., Ancas A. D., Profire M., Verdes M., Balan M. C. Thermal comfort modeling of a church heated with static heaters. // Applied Engineering Sciences. – 2019. – v. 9(1). – p. 121–124.
58. Turcanu E. F., Verdes M., Ciocan V., Burlacu A., Luciu R. S., Balan M. S., Sosoi G. Numerical analysis of the thermal comfort in a church building. // E3S Web of Conferences. – 2019. – v. 85.
59. Turcanu F.E., Verdeş M., Ciocan V. Simulation and modelling of microclimate in a building with high thermal mass during the winter season. // E3S Web of Conferences. – 2019. – v. 85. Art. 01006. – 7 p.
60. von Neumann J., Richtmyer R. D. A method for the numerical calculation of hydrodynamic shocks. // Appl. Phys. – 1950. – v. 21. – p. 232–257.
61. Weisberg, Sanford. Applied Linear Regression. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2005. – p. 310.
62. Wheeler, Donald J. Understanding Variation: The Key to Managing Chaos. – Knoxville, TN: SPC Press, 1993. – p. 222.
63. Ziganshin A.M., Logachev K. I. Minimizing local drag by shaping a flanged slotted hood along the boundaries of vortex zones occurring at inlet. // J. Build. Eng. 2020. Vol. 32. – P. 101666.

64. Аверкова О. А, Логачев, К. И, Логачев, И. Н. Моделирование отрывного течения на входе в квадратный всасывающий канал. // Изв. ВУЗов. Строительство. – 2013. – № 6. – С. 97–104.
65. АВОК Стандарт-2-2004. Храмы православные. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха.: дата введения 09.06.2004. – М.: АВОК, 2004. – 14 с.
66. Алымов И. П. О тяги печи парового котла. // СбП. – 1864. – №9.
67. Альтшуль А. Д. Гидравлика и аэродинамика: Основы механики жидкости – М.: Стройиздат, 1975. – 323 с.
68. Алямовский, А. А., Собачкин А. А., Одинцов Е. В., Харитонович А. И., Пономарев Н. Б. Компьютерное моделирование в инженерной практике. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 1040 с.
69. Аржаников Р. Г. Реконструкция системы отопления Исаакиевского собора. // Здания высоких технологий. - 2016. - №2. - С. 46-49.
70. Багриновский К. А., Годунов С. К. Разностные методы для многомерных задач. // Докл. АН СССР. – 1957. – №115, 3. – С. 431–433.
71. Батурин В. В. Основы промышленной вентиляции. – М.: Профиздат, 1990. – 448 с.
72. Белоцерковский О. М., Давыдов Ю. М. Нестационарный метод «крупных частиц» для газодинамических расчетов. // Вычисл. матем. и матем. физ.. – 1971. – №11, 1.
73. Белоцерковский О. М., Чушкин П. И. Численный метод интегральных соотношений. // Вычисл. матем. и матем. физ.. – 1962. – №2, 5. – С. 731–759.
74. Беляев К. В., Гарбарук А. В., Никулин Д. А., Стрелец М. Х. Опыт оптимизации воздухораспределения и параметров микроклимата в православном храме. // АВОК. – 2021. – №7. – С. 60–67.
75. Биберман Л. М. Перенос излучения в спектральных линиях. – М.: Мир, 1965. – 15 с.

76. Богословский В. Н. Аспекты создания здания с эффективным использованием энергии. // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2000. – № 5. – с. 34–39.

77. Богословский В. Н. Выбор расчетных характеристик наружных климатических условий по коэффициенту обеспеченности заданного теплового режима помещений. // Водоснабжение и санитарная техника. – 1969. – № 11. – с. 19–24.

78. Богословский В. Н. Отопление. – М.: Стройиздат, 1991. – 735 с.

79. Богословский В. Н. Строительная теплофизика: Теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. – М.: Высш. шк., 1982. – 415 с.

80. Богословский В. Н. Тепловой режим здания. – М.: Стройиздат, 1979. – 248 с.

81. Богословский В. Н. Теплофизика аппаратов утилизации тепла систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. – М.: Стройиздат, 1983. – 320 с.

82. Браиловская И. Ю. Разностная схема для численного решения двумерных уравнений Навье-Стокса для сжимаемого газа. // Докл. АН СССР. – 1965. – №160, 5. – С. 1042–1045.

83. Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов. – М.: Мир, 1987. – 525 с.

84. Бреббия К., Уокер С. Применение метода граничных элементов к технике. – М.: Мир, 1982. – 248 с.

85. Брилик П. К расчету теплообмена между воздухом и поверхностью ограждающих конструкций // Жилищное строительство. – 1963. – № 4. – С. 20–23.

86. Васильев Е. И. W-Модификация метода С. К. Годунова и ее применение для двумерных нестационарных течений запыленного газа. // Вычисл. матем. и матем. физ.. – 1996. – №36, 1. – С. 122–135.

87. Васильев Л. Л. Теплофизические свойства пористых материалов. – Минск: Наука и техника, 1971. – 266 с.
88. Ведешкина К. А., Левина З. Ф., Ломнев С. П., Прудковский Г. П., Растопчина Т. В., Рубен Г. В., Юрченко В. В. Решение задач методом «крупных частиц». – М.: Изд. ВЦАН СССР, 1970.
89. Волков В. В. Моделирование конвективного теплообмена в замкнутом объеме при совместном действии свободной и вынужденной конвекции.: дис. канд. тех. наук: 05.14.05. – Москва, 1995. - 140 с.
90. Вышнеградский И. А. Механическая теория теплоты. – СПб.: Литогр. – 1871.
91. Гавей О. Ф., Старкова Л. Г. Исследование воздушных режимов и оптимизация отопления и вентиляции в православных храмах. // Вестник МГСУ. – 2011. – №7. – С. 283–287.
92. Гавей О. Ф., Старкова Л. Г. Оптимизация вентиляции в православных храмах. // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2013. – №6. – С. 74–75.
93. Гавриленко А. П. Паровые котлы. – М.: Рус. т-ва печ. и изд. дела, 1900. – 573 с.
94. Гельфанд И. М., Локуциевский О. В. Метод прогонки для решения разностных уравнений. – М.: Наука, 1962. – 340 с.
95. Глушко Г. С. Турбулентный пограничный слой на плоской пластине в несжимаемой жидкости. // Изв. АН СССР. Сер. механика. – 1965. – №4. – с. 13–23.
96. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика – 12-е изд. – М.: Юрайт, 2022. – 479 с.
97. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика – 8-е изд. – М.: Юрайт, 2020. – 480 с.
98. Годунов С. К. Разностные методы решения уравнений газовой динамики. – Новосибирск: Изд. Новосиб. ун-та, 1962.

99. Годунов С. К. Разностный метод численного расчета разрывных решений уравнений газовой динамики. // Матем сб. – 1959. – №3, 47. – С. 271–306.
100. Годунов С. К., Прокопов Г. П. Вариационный подход к решению больших систем линейных уравнений, возникающих в сильно эллиптических задачах. – М.: Препринт ин-та прикл. матем. АН СССР, 1958.
101. Годунов С. К., Рябенский В. С. Канонические виды систем линейных обыкновенных разностных уравнений с постоянными коэффициентами. // Вычисл. матем. и матем. физ.. – 1963. – №3, 2.
102. Годунов С. К., Рябенский В. С. Разностные схемы (введение в теорию). – М.: Наука, 1977. – 440 с.
103. Головизнин В.М., Зайцев М.А., Карабасов С.Ф., Короткин И.А. Новые алгоритмы вычислительной гидродинамики для многопроцессорных вычислительных комплексов. – М.: Изд-во МГУ, 2013. – 467 с.
104. Гоман, О. Г. Численное моделирование осесимметричных отрывных течений несжимаемой жидкости. – М.: Машиностроение, 1993. – 288 с.
105. Гриневецкий В. И. Графический расчет парового котла. – М.: тип. А. Евреинова, 1905. – 211 с.
106. Губернский Ю. Д. Гигиенические основы кондиционирования микроклимата жилых и общественных зданий. – М.: Медицина, 1978. – 192 с.
107. Гухман А. А. К теории предельных состояний движущегося газа. // Журнал технической физики. – 1939. – №5. – с. 411–423.
108. Гухман А. А. Физические основы теплопередачи. – М–Л.: ОНТИ - Госэнергоиздат, 1934. – 315 с.
109. Дацюк Т. А., Васильев В. Ф., Дерюгин Ю. П. Новая технология проектирования систем обеспечения микроклимата зданий. // Вестник гражданских инженеров. – 2005. – № 3. – с. 57–62.

110. Дацюк Т. А., Гримитлин А. М., Денисихина Д. М. Математическое моделирование в проектировании систем вентиляции и кондиционирования. – СПб.: АВОК, 2013. – 192 с.
111. Дацюк Т. А., Дерюгин В. В., Леонтьева Ю. Н. Совершенствование принципов расчета систем обеспечения микроклимата зданий. // Изв. ВУЗов. Строительство. – 2002. – № 8. – с. 67–73.
112. Дацюк Т. А., Пухкал В. А., Ивлев Ю. П. Результаты моделирования микроклимата жилых помещений при различных типах отопительных приборов. // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – № 6. – с. 12–22.
113. Джалурия Й. Естественная конвекция: Тепло- и массообмен: пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 400 с.
114. Джалурия Й., Гебхарт Б., Махаджан Б., Самакия Р. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен: пер. с англ. В 2 кн. Кн. 1. – М.: Мир, 1991. – 678 с.
115. Джалурия Й., Гебхарт Б., Махаджан Б., Самакия Р. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен : пер с англ. В 2 кн. Кн. 2. – М.: Мир, 1991. – 528 с.
116. Дмитриева Л. С., Кузьмина Л. В., Мошкарнев Л. М. Планирование эксперимента в вентиляции и кондиционировании воздуха. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1984. – 210 с.
117. Дородницын А. А. Пограничный слой в сжимаемом газе. // Прикладная матем. и мех. – 1942. – №6. – с. 449–486.
118. Дородницын А. А. Лекции по численным методам решения уравнений вязкой жидкости. – М.: Изд. ВЦАН СССР, 1969.
119. Дроздов В. А. Строительная теплофизика: (Микроклимат и теплоизоляция зданий) – М.: НИИСФ, 1979. – 133 с.
120. Дроздов В. А. Теплообмен в светопрозрачных ограждающих конструкциях. – М.: Стройиздат, 1979. – 307 с.

121. Дьяконов Е. Г. Разностные схемы с расщепляющимся оператором для многомерных стационарных задач. // Вычисл. матем. и матем. физ.. – 1962. – №2, 4.
122. Дьяконов Е. Г., Лебедев В. И. Метод расщепления для третьей краевой задачи // Вычисл. методы и программирование. – М.: Изд-во МГУ, 1967. – С. 121–143.
123. Дьяченко В. Ф. Об одном новом методе численного решения нестационарных задач газовой динамики с двумя пространственными переменными. // Вычисл. матем. и матем. физ.. – 1965. – №5, 4.
124. Зайцев О. Н, Поднебесный С. В., Богатикова Н. П. Влияние на тепловой режим помещения инерционности ограждающих конструкций и отопительных приборов. // Строительство и техногенная безопасность. – 2016. – № 3. – с. 87–91.
125. Зельдович Я. Б. К теории горения не перемешанных газов. // Журнал технической физики. – 1949. – №10. – с. 1199–1210.
126. Зельдович Я. Б. Предельные законы свободно-восходящих конвективных потоков. // Журн. эксп. и теор. физ. – 1937. – №12. – с. 1463–1465.
127. Зиганшин А. М. Совершенствование методов расчета и конструирования механических систем вентиляции сниженной энергоёмкости: дис. докт. техн. наук: 05.23.03. - Белгород, 2021. - 409 с.
128. Зиганшин А. М., Логачев К. И. Вихревая вентиляция. Профилированные элементы систем вентиляции сниженной энергоёмкости. – Ижевск: ИКИ, 2022 – 336 с.
129. Ивакин В. П., Кирдяшкин А. Г., Черняховский Л. И. Исследование структуры турбулентного пограничного слоя при естественной конвекции у вертикальной пластины / В. П. Ивакин, А. Г. Кирдяшкин, Л. И. Черняховский. // Пристенное турбулентное течение: сборник. – Новосибирск, 1975. – Ч.2. – с. 256–269.

130. Игнатьев А. А. Разностная схема для вязкости Навье–Стокса. // Матем. моделирование. – 2001. – №13, 8. – С. 107–116.
131. Канторович Л. В., Акилов Г. П. Функциональный анализ в нормированных пространствах. – М.: Физматгиз, 1959.
132. Кирпичев М. В. Новые идеи в области паровых котлов. – М.: Изд-во АН СССР, 1936. – 42 с.
133. Кирш К. В. Котельные установки. – М.: б. и., 1915. – 89 с.
134. Ковеня В. М., Яненко Н. Н. Метод расщепления в задачах газовой динамики. – Новосибирск: Наука, 1981. – 304 с.
135. Козлов Т. А. Моделирование воздушных течений при входе в местные отсосы-раструбы с составными полками: дис. канд. техн. наук: 02.01.03. - Белгород, 2024. - 154 с.
136. Кохрен У. Методы выборочного исследования. // Перевод с англ. Сони́на И. М., под. ред. Волкова А. Г. – М.: Статистика, 1976. – 440 с.
137. Колмогоров А. Н. Уравнения турбулентного движения несжимаемой жидкости. // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1942. – №1-2. – с. 176–188.
138. Копылова А. И., Богомоллова А. К., Немова Д. В. Влажностный режим ограждающей конструкции с облицовкой силикатным кирпичом. // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. – № 6(33). – с. 74-86.
139. Кочев А. Г. Задачи, решаемые при разработке микроклиматических условий в церквях. // Известия вузов. Сер. «Строительство». – 1999. – №6. – с. 88–93.
140. Кочев А. Г. Инженерная методика расчета требуемого воздухообмена в православных храмах. // Известия вузов. Сер. «Строительство». – 2004. – №3. – с. 63–67.
141. Кочев А. Г. Исследование влияния аэродинамических параметров на естественный воздухообмен в церквях. // Известия вузов. Сер. «Строительство». – 2001. – №7. – с. 73–76.

142. Кочев А. Г. Исследование влияния аэродинамических параметров на естественный воздухообмен в церквях // Известия вузов. Строительство. – 2001. – № 7. – С. 73-76.
143. Кочев А. Г. Микроклимат православных храмов: монография. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2004. – 449 с.
144. Кочев А. Г. Особенности обеспечения микроклимата в строящихся, восстанавливаемых и реконструируемых культовых сооружениях. // Известия вузов. Сер. «Строительство». – 1997. – №8. – с. 62–65.
145. Кочев А. Г. Расчёт температурного режима ограждающих конструкций уникальных сооружений методом дробных шагов // Известия вузов. Строительство. – 1994. – №4. – С. 61-62.
146. Кочев А. Г., Соколов М. М., Уваров В. А, Федотов А. А. Особенности сохранения исторического облика фасадов православных храмов при проектировании инженерных систем. // Жилищное строительство. – 2024. – № 12. – с. 123-133.
147. Кочев А. Г., Соколов М. М., Уваров В. А. Влияние температурного режима на сохранность культовых зданий. // Строительство и техногенная безопасность. Научно-технический журнал по строительству и архитектуре. – 2023. – № 6. – с. 274-280.
148. Кочев А. Г., Соколов М. М., Уваров В. А. Применение нейронной сети для моделирования микроклимата в храме святого благоверного князя Александра Невского. // Проблемы современной теплоэнергетики. – 2024.
149. Кочев А. Г., Соколов М. М., Уваров В. А. Создание температурных условий в православных храмах. // Приволжский научный журнал. – 2023. – № 3. – с. 58-65.
150. Кочев А. Г., Соколов М. М., Уваров В. А. Численное исследование течения при конвекции воздуха в храме святого благоверного князя Александра Невского. // Известия КГАСУ. – 2024. №2 (68). – с. 17-25.

151. Кочев А. Г., Уваров В. А. Моделирование системы воздухообмена храма Александра Невского д. Кожевенное. // XIII Всероссийский Фестиваль науки. – 2023. – № 13. – с. 233-234.
152. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе И. В. Теоретическая гидромеханика. Часть 2. – М.: Физматгиз, 1963. – 728 с.
153. Кружилин Г. Н. Исследование теплового пограничного слоя. // Журнал технической физики. – 1936. – №3. – с. 561–572.
154. Кувшинов Ю. Я. Круглогодичный тепловой режим зданий и расход энергии системами кондиционирования микроклимата.: дис. канд. тех. наук: 05.23.03. – М., 1973. – 175 с.
155. Куропатенко В. Ф. Метод построения разностных схем для численного интегрирования уравнений газодинамики. // Изв. вузов. Математика. – 1962. – №3, 28.
156. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. – М.: Атомиздат, 1979. – 415 с.
157. Кучерук В. В. Регулирование аэрации. – М.: Профиздат, 1937. – 15 с.
158. Ландау Л. Д., Лифшиц И. М. Механика сплошных сред. – М.: ГИТТЛ, 1953. – 788 с.
159. Лебедев А. С., Черный С. Г. Практикум по численному решению уравнений в частных производных. – Новосибирск: Новосибирский гос. университет, 2000. – 136 с.
160. Логачев К. И., Логачев И. Н. Аэродинамические основы аспирации. – Монография. – Санкт-Петербург: Химиздат, 2005. – 658 с.
161. Логачев К. И. Экологическая индустрия: Математическое моделирование систем вентиляции промпредприятий. // Инженерная экология. – 1999. – №1. – 8–18 с.
162. Логачев К. И., Аверкова О. А., Зиганшин А. М., Крюкова О. С., Уваров В. А., Гольцов А. Б. Численное моделирование движения пылевых

частиц вблизи бокового всасывающего канала. // Строительство и техногенная безопасность. 2019. Т. 69, - № 17. - С. 119–128.

163. Лойцянский Л. Г. Ламинарный пограничный слой. – М.: Физматгиз, 1962. – 524 с.

164. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1987. – 840 с.

165. Ломоносов М. В. Размышления о причине теплоты и холода. – СПб.: Новые комментарии Петербургской академии наук. – 1747.

166. Лукьянов, И.И. Современные подходы к моделированию турбулентных течений. // Символ науки. – 2016. – №12-1. – 731–759 с.

167. Лыков А. В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.

168. Лычев А. С. Статистическая обработка опытных данных и планирование эксперимента. – Куйбышев: КГУ, 1977. – 69 с.

169. Львов Н. А. Русская пиростатика. – Санктпетербург: Печатано в типографии Корпуса чужестранных единовѣрцев. – 1801.

170. Мазья, В. Г. Граничные интегральные уравнения. // Итоги науки и техн. сер. соврем. пробл. мат. фундам. направления. – 1988. – №27. – с. 131–228.

171. Мартыненко О. Г. Свободно-конвективный теплообмен. – Минск: Наука и техника, 1982. – 399 с.

172. Марчук Г. И., Яненко Н. Н. Применение метода расщепления (дробных шагов) для решения задач математической физики. // Некоторые вопросы вычислительной и прикладной математики. – Новосибирск.: Наука, 1966. – С. 5–22.

173. Марчук Г. И., Яненко Н. Н. Решение многомерного кинетического уравнения методом расщепления. // Докл. АН СССР. – 1964. – №157, 6. – С. 1291–1292.

174. МДС 31-9.2003. Православные храмы. В трех томах. Том 1. Идея и образ.: дата введения 01.01.2003. – М.: ФГУП ЦПП, 2004. – 332 с.

175. МДС 31-9.2003. Православные храмы. В трех томах. Том 2. Православные храмы и комплексы.: дата введения 01.01.2003. – М.: ФГУП ЦПП, 2004. – 182 с.
176. МДС 31-9.2003. Православные храмы. В трех томах. Том 3. Примеры архитектурно-строительных решений.: дата введения 01.01.2003. – М.: ФГУП ЦПП, 2004. – 201 с.
177. Минко, В.А. Основы промышленной вентиляции и пневмотранспорта. – М., 1975. – 140 с.
178. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
179. Никурадзе И. Закономерности турбулентного движения в гладких трубах // Проблемы турбулентности. М–Л.: Изд-во ОНТИ НКТП, 1936. с. 75–150.
180. Остроградский М. В. Об уравнении распространения тепла в жидкости. // Мем. I'Acad. – 1836. – v. 1, No.4. – 25–26 с.
181. Павлов Н. Н., Шиллер Ю. И. Справочник проектировщика. Внутренние санитарно-технические устройства. Часть 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. – М.: Стройиздат, 1992. – 172 с.
182. Павловский А. К. Курс отопления и вентиляции в 3 ч. Ч. 2. Центральные системы отопления. Вентиляция. Искусственное охлаждение помещений. – М.: Гос. изд-во, 1924. – 417 с.
183. Павловский А. К. Курс отопления и вентиляции в 3 ч. Ч.1. Общие сведения и местные приборы. – М.: Гос. изд-во, 1923. – 332 с.
184. Петров Н. П. Курс паровых котлов. – СПб.: Литогр, 1879. – 340 с.
185. Письменный Д. Т. Конспект лекций по высшей математика. В 2 ч. Ч. 1. – 2-е изд. – М.: Айрис-пресс, 2003. – 288 с.
186. Письменный Д. Т. Конспект лекций по высшей математика. В. 2 ч. Ч. 2. – 2-е изд. – М.: Айрис-пресс, 2003. – 256 с.
187. Погодин А. И. Теоретический курс паровых машин Морского инженерного училища. – СПб.: Мор. инж. уч-ще, 1901. – 318 с.

188. Полежаев В. И. Расчет течения и теплообмена сжимаемого вязкого газа в замкнутой области. // Научно-технический отчет №3801 НИИ-1. – М.: НИИ Тепловых Процессов, 1966.
189. Полежаев В. И. Численное решение системы одномерных нестационарных уравнений Навье-Стокса для сжимаемого газа. // Докл. АН СССР. – 1966. – №6. – С. 34–44.
190. Полежаев В. И. Численное решение уравнений Навье-Стокса для течения и теплообмена в замкнутой двумерной области: дис. канд. техн. наук. – Москва, 1967. - 196 с.
191. Полежаев В. И., Бунэ А. В., Вerezуб Н. А. Математическое моделирование конвективного теплообмена на основе уравнений Навье-Стокса. – М.: Наука, 1987. – 274 с.
192. Поляк Г. Л. Лучистый теплообмен тел с произвольными индикаторами отражения поверхностей. // Конвективный и лучистый теплообмен. М.: Изд. ЭНИН АН СССР, 1960. – 123 с.
193. Попов С. Г., Лебедев, В. С. Моделирование конвективного теплообмена в системе турбулентного потока с использованием модели Realizable k-ε. // Инженерная теплофизика. – 2015. – №34(2). – С. 253–262.
194. Попов Ю. П., Самарский А. А. Полностью консервативные разностные схемы. // Вычисл. матем. и матем. физ.. – 1969. – №4. – С. 953–958.
195. Прандтль Л. Гидроаэромеханика: пер. с нем. – Ижевск: Регуляр. и хаот. динамика, 2000. – 576 с.
196. Предтеченский А. И. Курс паровых котлов. – Харьков: тип. и лит. Зильберберга, 1895. – 404 с.
197. Прохоров А. В., Ушаков В. Г., Ушаков Н. Г. Задачи по теории вероятности: Основные понятия. Предельные теоремы. Случайные процессы. – М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1986. – 325 с.
198. Рихман Г. В. Труды по физике / Ин-т истории естествознания и техники. – М.: Изд-во Акад. Наук СССР, 1956. – 711 с.

199. Рихтмайер Р., Мортон К. Разностные методы решения краевых задач. – М.: Мир, 1972. – 421 с.
200. Русанов В. В. Об устойчивости метода матричной прогонки. // Вычислительная математика. – 1960. – №6. – С. 74–83.
201. Русанов В. В., Бабенко К. И. Разностные методы решения пространственных задач газовой динамики. – Труды II Всесоюзного съезда по механике вып. 2.– М.: Наука, 1965.
202. Рябенский В. С., Филиппов А. Ф.. Об устойчивости разностных уравнений. – М.: Гостехиздат, 1956.
203. Самарский А. А. Введение в теорию разностных схем. – М.: Наука, 1971.
204. Самарский А. А. Необходимые и достаточные условия устойчивости двухслойных разностных схем. // Докл. АН СССР. – 1968. – №181, 4.
205. Самарский А. А. О монотонных разностных схемах для эллиптических и параболических уравнений в случае несамосопряженного эллиптического оператора. // Вычисл. матем. и матем. физ.. – 1965. – №5, 3.
206. Самарский А. А. Об одном экономичном алгоритме численного решения систем дифференциальных и алгебраических уравнений. // Вычисл. матем. и матем. физ.. – 1964. – №4, 3.
207. Самарский А. А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1989. – 616 с.
208. Самарский А. А. Экономичные разностные схемы для гиперболической системы уравнений со смешанными производными и их применение для уравнений теории упругости. // Вычисл. матем. и матем. физ.. – 1965. – №5, 1.
209. Саутин, С. Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии. Ленинград: Химия. Ленингр. отделение, 1975. – 48 с.

210. Сергиенко А. С. Тепловой и воздушный режимы оконных проемов культовых сооружений на примере православных храмов.: дис. канд. тех. наук: 05.23.03. – Нижний Новгород, 2003. – 283 с.
211. Серрин Д. Математические основы классической механики жидкостей. – М.: Иностранная литература, 1963. – 256 с.
212. Соболев С. Л. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1966.
213. Соколов М. М. Влияние внешней аэродинамики на микроклимат православных храмов: дис. канд. техн. наук: 05.23.03. - Москва, 2013. - 132 с.
214. Софронов И. Д. О методе прогонки для решения краевых задач для разностных уравнении. // Вычисл. матем. и матем. физ.. – 1964. – №4, 2.
215. СП "Отопление, вентиляция и кондиционирование. Требования пожарной безопасности" от 21.02.2013 № 7.13130.2013 // МЧС России. – 2013 г. – № 116.
216. СП «Общественные здания и сооружения» от 29.12.2011 № 118.13330.2012 // Минстрой России. - 2014 г. – № 438/пр. – с изм. и допол. в ред. от 17.09.2019.
217. СП «Объекты религиозного назначения. Требования пожарной безопасности» от 23.11.2016 № 258.1311500.2016 // МЧС России. – 2016 г. – № 615.
218. СП «Тепловая защита зданий» от 01.07.2013 № 50.13330.2012// Минрегион России. – 2012. – № 265.
219. СП «Храмы православные. Правила проектирования» от 22.12.2017 № 391.1325800.2017 // Минстрой России. – 2018 г. – № 1703/пр.
220. СП 31-103-99. Здания, сооружения и комплексы православных храмов.: дата введения 27.12.1999. – М.: Арххрам, 1999. – 38 с.
221. СП 60.13330.2016. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха.: дата введения 17.06.2017. – М.: Минстрой России, 2016. – 49 с.
222. Старкова Л. Г., Морева Ю. А., Новоселова Ю. Н. Оптимизация микроклимата в православном храме методом числового моделирования

воздушных потоков. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: строительство и архитектура. – 2018. – №18, 3. – С. 53–59.

223. Стрелец М. Х., Никулин Д. А., Чумаков Ю. С. Разработка компьютерной модели аэродинамики и процессов теплопереноса в помещении Исаакиевского собора, ее экспериментальная верификация и применение для оптимизации системы теплоснабжения собора. // Технический отчет по договору между ГУК ГМП «Исаакиевский собор» и ГОУ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2007. – 76 с.

224. Суринов Ю. А. Об основных методах современной теории лучистого теплообмена. // ИЗД. ЭНИН АН СССР. Проблемы энергетики. – 1959. – с. 423–469.

225. Талиев В. Н. Аэродинамика вентиляции. – М.: Стройиздат, 1979. – 295 с.

226. Темам Р. Уравнения Навье – Стокса. Теория и численный анализ. – 2-е изд. – М.: Мир, 1981. – 408 с.

227. Тихонов А. Н., Самарский А. А. О сходимости разностных схем в классе разрывных коэффициентов. // Докл. АН СССР. – 1959. – №124, 3. – С. 3.

228. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Однородные разностные схемы на неравномерных сетках. // Вычисл. матем. и матем. физ.. – 1962. – №2, 5.

229. Уваров В. А. Применение нейронной сети для моделирования микроклимата в храме святого благоверного князя Александра Невского / А. Г. Кочев, М. М. Соколов, В. А. Уваров // Сборник трудов Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию специальности «Промышленная теплоэнергетика» в ЛГТУ, 70-летию Липецкой области и 90-летию Новолипецкого металлургического комбината [сост. А.Г. Арзамасцев, А.Г. Ярцев]. - Казань: Изд-во Бук, 2024. – с. 320-329.

230. Уваров В. А. Создание условий для продления сроков долговечности православных храмов / А. Г. Кочев, М. М. Соколов, В. А. Уваров // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды = Indoor air quality and environment: материалы XXI Международной науч. конф., посвященной 100-летию со дня рождения академика РААСН В.Н. Богословского. 27-30 сентября 2023 г., г. Москва /Мин-во строит. и ЖКХ РФ; НИИ строит. физики РААСН; Российское общество инженеров строительства; Научный Совет РААСН «Энергоэффективная среда жизнедеятельности»; Нижневолжское представительство южного регионального отделения ЮГО РААСН [сост. А.Н. Гвоздков]. –Волгоград: Изд-во ВолгГМУ, 2023.–с. 98–104.

231. Уляшева В. М., Васильев В. Ф., Канев М. А., Рябев Г. А. О применении моделей турбулентности при численном моделировании процессов тепло-, воздухо- и массообмена. // Журнал Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2016. – № 12. – с. 66–69.

232. Уляшева В. М., Вдовичев А. А., Дацюк Т. А., Аверьянов В. К. Режимы работы пластинчатых рекуператоров систем вентиляции и кондиционирования воздуха. // Промышленное и гражданское строительство. – 2024. – № 3. – с. 34–40.

233. Уляшева В. М., Иванова Ю. В., Аверьянов В. К., Цыганков А. В. Особенности обеспечения параметров микроклимата плавательных бассейнов. // Промышленное и гражданское строительство. – 2024. – № 3. – с. 11–16.

234. Уляшева В. М., Ильин Е. А. Численное моделирование воздушного режима "чистого помещения" фармацевтического производства. // Строительство и техногенная безопасность. – 2023. – № S1. – с. 300–305.

235. Уляшева В. М., Мартьянова А. Ю., Аншукова Е. А., Шевцова Е. А. Создание климатических систем культурно-досугового центра в условиях крайнего севера. // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 7. – с. 580–583.

236. Уляшева В. М., Позин Г. М. Распределение параметров воздуха в помещениях с источниками тепловыделений. // Magazine of Civil Engineering. – 2012. – № 6. – с. 42–47.
237. Уляшева В. М., Шевцова Е. А. Численное моделирование ветрового давления на здание в условиях крайнего севера. // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды. – 2023. – № 21. – с. 87–93.
238. Умов Н. А. Уравнение движения энергии в телах. – Одесса, 1874. – 99 с.
239. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: справочник: пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.
240. Фабрикант Н. Я. Аэродинамика: общий курс. – М.: Госиздат, 1964. – 816 с.
241. Федеральный закон «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 25.12.2009 № 384 // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2009.
242. Хакимзянов Г. С., Черный С. Г. Методы вычислений. Часть 3. Численные методы решения задач для уравнений параболического и эллиптического типов. – Новосибирск: Редакционно-издательский центр НГУ, 2008. – 163 с.
243. Хакимзянов Г. С., Черный С. Г. Методы вычислений. Часть 4. Численные методы решения задач для уравнений гиперболического типа. – Новосибирск.: Редакционно-издательский центр НГУ, 2009. – 206 с.
244. Цянь Сюэ-Сень. Физическая механика. – М.: Мир, 1965. – 545 с.
245. Чаплин В. М. Курс отопления и вентиляции. Вып.1. Отопление. – М.: Госиздат, 1928. – 376 с.
246. Чаплин В. М. Курс отопления и вентиляции. Вып.2. Вентиляция. – М.: Госиздат, 1928. – 164 с.
247. Шаныгин С. И. Корреляционный и регрессионный анализ: учебник для вузов. – М.: Юрайт, 2024. – 70 с.

248. Шваб В. А. Связь между температурами и скоростными полями газового факела. // Исследование процессов горения натурального топлива. М–Л.: Госэнергоиздат, 1948. с. 231–248.

249. Широков М. Ф. Теория теплообмена и гидравлического сопротивления при больших скоростях потока. // Журнал технической физики. – 1937. – №3. – с. 267–281.

250. Яненко Н. Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. – Новосибирск: Наука, 1967.

251. Яненко Н. Н. О слабой аппроксимации систем дифференциальных уравнений. // Сиб. матем. – 1964. – №6.

252. Яненко Н. Н., Анучина Н. Н., Петренко В. Е., Шокин Ю. И. О методах расчета задач газовой динамики с большими деформациями. // Численные методы механики сплошной среды. – 1970. – №1, 1.

253. Яненко Н. Н., Демидов Г. В. Исследование задачи Коши методом слабой аппроксимации. // Докл. АН СССР. – 1966. – №167, 6. – с. 1242–1244.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024690233

**«Моделирование температурных и скоростных полей в
помещениях православных храмов»**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный архитектурно-
строительный университет» (RU)*

Авторы: *Кочев Алексей Геннадьевич (RU), Уваров Валерий
Александрович (RU), Соколов Михаил Михайлович (RU)*

Заявка № 2024689879

Дата поступления 06 декабря 2024 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 13 декабря 2024 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Документ, подтверждающий внедрение разработок организацией (предприятием), в которых отсутствует отчетность по форме Р-10 ЦСУ РФ



УТВЕРЖДАЮ"

Руководитель предприятия (организации)

Д.Л.Щеголев

16 января 2025 г.

А К Т

о внедрении результатов научно-исследовательской (опытно-конструкторской) работы

Разработка(и) Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета, а именно

Разработка систем вентиляции с регулируемым воздухообменом в Соборе

(полное наименование разработки или перечня разработок)

Всемилошного Спаса и Происхождения Честных древ Животворящего Креста

Господня по ул. Ярмарочный проезд, д.10, г. Нижнего Новгорода

выполненной(ых) по

договору на передачу проектно-исследовательских разработок

(хоздоговору, госбюджету, внутриминистерскому (внутриведомственному) заказам, договору на

передачу научных достижений, договору о содружестве, наименовании темы, дата начала и

окончания, объем затрат на НИР, № госрегистрации)

и переданные

Приходу собора Всемилошного Спаса и Происхождения Честных древ Животворящего Креста Господня

(наименование организации (предприятия) заказчика)

внедрены с декабря месяца 2024 года в Соборе Всемилошного Спаса и

(организация (предприятие), где

Происхождения Честных древ Животворящего Креста Господня

внедрена(ы) разработка(и))

в составе мероприятий по созданию и поддержанию параметров микроклимата

(указать наименование объекта, системы, в составе которых нашла(и) практическое

за счёт регулируемого воздухообмена

применение вузовская(ие) разработка(и) или в качестве самостоятельного объекта)

в соответствии с

договором о сотрудничестве

(документы, на основании которых проводилось внедрение разработки(ок))

вуза, по какому плану проводились работы)

Назначение внедренной(ых) разработки(ок)

разработан комплекс мер и средств по

(раскрыть конкретные рабочие функции

обеспечению параметров микроклимата в храме регулируемым воздухообменом

внедренной(ых) разработка(ок))

Технический уровень разработки (ок)

(№№ авторских свидетельств на изобретения, лицензий, патентов)

Вид внедрения рациональная эксплуатация систем создания и поддержания
 (эксплуатация изделий и сооружений, изготовление продукции (серийное,
микроклимата регулируемым воздухообменом для изменения
 уникальное, единичное производство), выполнение производственных работ, функционирование
параметров внутреннего воздуха и исключения переувлажнения конструкций
 систем организации и управления и т.д.)
 Акт внедрения по форме Р-10 ЦСУ организацией (предприятием) не представляется по
 (указать причину и № документа несоставления акта по форме Р-10 ЦСУ)

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ

1. Организационно-технические преимущества повышение продолжительности
 (параметры, характеризующие степень качественного улучшения
сохранности памятников истории, архитектуры и культуры
 функциональных или эксплуатационных показателей по сравнению с базовым или заменяемым вариантом)
2. Социальный эффект обеспечение населения информацией об истории,
 (подробно раскрыть конкретный вид эффекта: защита здоровья человека;
архитектуре, культуре и традициях древней Руси
 охрана окружающей среды; повышение престижа страны; совершенствование структур
 управления; развитие науки и научных исследований и т.д.)
3. Экономический эффект от внедрения разработки(ок) достигнут за счет
повышения обеспеченности параметров микроклимата;
 (количественная характеристика экономии материальных, энергетических и трудовых ресурсов,
снижения капитальных затрат по периодическому ремонту
 сокращение капитальных вложений, повышение качества продукции и т.д.)
и обслуживанию

При этом получен фактический (ожидается получить) экономический эффект с момента внедрения

(сумма цифрами и прописью)
 Долевое участие ННГАСУ 100%

Уведомление о получении фактического экономического эффекта (в случае, когда разработка внедрена с ожидаемым экономическим эффектом и по ней разработчику представляется акт) будет вузу сообщено дополнительно в

_____ 2025 ____ г.
 (квартал)

Руководитель цеха, где
 внедрена разработка
 Иерей Илия Трушкин

Главный бухгалтер

Руководитель ПЭО

Проректор по научной работе

Монич Д.В.

Исполнители

Кочев А.Г.

Соколов М.М.

Уваров В.А.

Федотов А.А.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Документ, подтверждающий внедрение разработок организацией (предприятием),

которых отсутствует отчетность по форме Р-10 ЦСУ РФ

"УТВЕРЖДАЮ"

Руководитель предприятия (организации)

Д.Л.Щеголев

20 " сентября 2024 г.



А К Т

о внедрении результатов научно-исследовательской
(опытно-конструкторской) работы

Разработка(и) Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета, а именно

Разработка систем вентиляции с регулируемым воздухообменом

(полное наименование разработки или перечня разработок)

в Соборной церкви в честь Живонаначальной Троицы

по ул. Овражная, д.94, г. Нижнего Новгорода

выполненной(ых) по

договору на передачу проектно-исследовательских разработок

(хоздоговору, госбюджету, внутриминистерскому (внутриведомственному) заказам, договору на

передачу научных достижений, договору о содружестве, наименование темы, дата начала и

окончания, объем затрат на НИР, № госрегистрации)

и переданные

Православному Приходу Соборной церкви в честь Живонаначальной Троицы

(название организации (предприятия) заказчика)

внедрены с сентября месяца 2024 года в

(организация (предприятие), где

Соборной церкви в честь Живонаначальной Троицы

внедрена(ы) разработка(и))

в составе мероприятий по созданию и поддержанию параметров микроклимата

(указать наименование объекта, системы, в составе которых нашла(и) практическое

за счёт регулируемого воздухообмена

применение вузовская(ие) разработка(и) или в качестве самостоятельного объекта)

в соответствии с договором о сотрудничестве

(документы, на основании которых проводилось внедрение разработки(ок))

вуза, по какому плану проводились работы)

Назначение внедренной(ых) разработки(ок) разработан комплекс мер и средств по

(раскрыть конкретные рабочие функции

обеспечению параметров микроклимата в храме регулируемым воздухообменом

внедренной(ых) разработка(ок))

Технический уровень разработки (ок)

(№№ авторских свидетельств на изобретения, лицензий, патентов)

Вид внедрения рациональная эксплуатация систем создания и поддержания
 (эксплуатация изделий и сооружений, изготовление продукции (серийное,
микроклимата регулируемым воздухообменом для изменения
 уникальное, единичное производство), выполнение производственных работ, функционирование
параметров внутреннего воздуха и исключения переувлажнения конструкций
 систем организации и управления и т.д.)
 Акт внедрения по форме Р-10 ЦСУ организацией (предприятием) не представляется по
 (указать причину и № документа несоставления акта по форме Р-10 ЦСУ)

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ

1. Организационно-технические преимущества повышение продолжительности
 (параметры, характеризующие степень качественного улучшения
сохранности памятников истории, архитектуры и культуры
 функциональных или эксплуатационных показателей по сравнению с базовым или замесным вариантом)
2. Социальный эффект обеспечение населения информацией об истории,
 (подробно раскрыть конкретный вид эффекта: защита здоровья человека;
архитектуре, культуре и традициях древней Руси
 охрана окружающей среды; повышение престижа страны; совершенствование структур
 управления; развитие науки и научных исследований и т.д.)
3. Экономический эффект от внедрения разработки(ок) достигнут за счет
повышения обеспеченности параметров микроклимата;
 (количественная характеристика экономии материальных, энергетических и трудовых ресурсов,
снижения капитальных затрат по периодическому ремонту
 сокращение капитальных вложений, повышение качества продукции и т.д.)
и обслуживанию

При этом получен фактический (ожидается получить) экономический эффект с момента внедрения

(сумма цифрами и прописью)
 Долевое участие ННГАСУ 100%

Уведомление о получении фактического экономического эффекта (в случае, когда разработка внедрена с ожидаемым экономическим эффектом и по ней разработчику представляется акт) будет вузу сообщено дополнительно в

2024 г.
 (квартал)

Руководитель цеха, где
 внедрена разработка
 Протоиерей Сергий Савушин

Главный бухгалтер

Руководитель ПЭО

Проректор по научной работе
 Мониц Д.В.

Исполнители

Кочев А.Г.

Соколов М.М.

Уваров В.А.

Федотов А.А.