

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» (ННГАСУ).

Научный руководитель: **Кочев Алексей Геннадьевич**
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РААСН

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

Ангелюк Илья Павлович
кандидат технических наук,
ФГАОУ ВО «Крымский федеральный
университет имени В.И. Вернадского»,
доцент кафедры «Теплогазоснабжения,
вентиляции, водоснабжения и водоотведения им.
акад. Б.И. Боровского»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»

Защита состоится 30 сентября 2025 года в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.276.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ауд. ГК214.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» и на сайте https://gos_att.bstu.ru/dis/Uvarov.

Автореферат разослан

«___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., доцент



Суслов Денис Юрьевич

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. 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.

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, V. 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 фрагуг, 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 гидро-газодинамики – 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 фрагуг, 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. Использованы 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. По результатам разработки комплекса мер и средств по обеспечению параметров микроклимата регулируемым воздухообменом в двух Нижегородских храмах, получены акты о внедрении результатов диссертационной работы.

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. Основные положения работы изложены в 7 публикациях, в том числе: 4 статьи в российских журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы основные цели и задачи исследования, представлена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, апробация результатов, положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлен обзор научно-технической литературы, посвященной созданию и поддержанию микроклимата в зданиях и сооружениях, с акцентом на особенности обеспечения благоприятных условий в православных храмах. Рассмотрены исторические аспекты теплообмена и развития отопительных технологий в России, начиная с дровяного отопления и перехода к более сложным системам теплообмена, изученным такими учеными, как М. В. Ломоносов, М. В. Остроградский, Г. Н. Кружилин и другие.

Обзор зарубежной и отечественной литературы охватывает исследование теоретических и практических методов регулирования микроклимата. Рассматриваются проблемы, с которыми сталкиваются исследователи, такие как уникальные архитектурные особенности храмов, неравномерность распределения воздушных потоков и влияние свечей на температурный и воздушный режим. Работы В. М. Уляшевой, исследующей численное моделирование процессов тепло- и воздухообмена, подчеркивают важность оптимального распределения температуры и воздушных потоков в различных зонах помещений.

Среди изученных исследований также представлены труды Т. А. Дацюк, которая проанализировала влияние различных типов отопительных приборов на распределение температур и комфорт микроклимата. Результаты работы показывают, что конвекторы обеспечивают более равномерное распределение тепла, что особенно важно для создания комфортных условий в зданиях с высокой посещаемостью, таких как храмы.

Исследования К. И. Логачева в области конструктивной оптимизации вентиляционных систем и отрывных течений демонстрируют практическую значимость, поскольку они позволяют повысить эффективность воздухообмена и обеспечить стабильность воздушных потоков, что имеет значение для сохранения внутреннего убранства храмов.

Значительный вклад в улучшение энергоэффективности вентиляционных систем внес А. М. Зиганшин, сосредоточившийся на моделировании течений и профилировании фасонных элементов для снижения аэродинамического сопротивления. Эти исследования актуальны для храмов, имеющих сложную архитектуру, требующую особого подхода к организации воздухообмена.

Исследования О. Н. Зайцева, посвященные тепловой инерционности стен и ее влиянию на стабильность микроклимата, подтверждают значимость выбора эффективных методов для поддержания стабильных температурных условий в помещениях при изменении внешних факторов.

На основе анализа литературы выделены основные направления для дальнейших исследований, касающихся разработки и применения математических моделей для описания конвективных процессов, а также

выявления зависимости характеристик микроклимата от архитектурных особенностей храмов.

Во **второй главе** представлена математическая модель, описывающая процессы течения и теплообмена при конвекции воздуха в православном храме.

Для моделирования изменения количества движения воздуха под воздействием внешних и внутренних сил, а также учета изменения внутренней энергии, вызванного тепловыми потоками, предложена система дифференциальных уравнений, записанная в векторно-тензорном виде. Эта система охватывает основные закономерности течения и теплообмена однокомпонентного сжимаемого вязкого и теплопроводного газа, обеспечивая точное описание физико-технических процессов в условиях храма.

$$\begin{cases} \rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho F \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \\ \rho \frac{De}{Dt} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \tau : \nabla v \end{cases} \quad (1)$$

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

В рамках моделирования принято предположение, что рассматриваемый газ обладает свойствами идеального газа. Кроме того, предполагалось, что такие параметры, как удельная теплоемкость, вязкость и теплопроводность, зависят исключительно от изменения температуры, что упрощает расчеты без значительной потери точности.

$$p = \rho RT \quad (2)$$

$$e = \int_0^T c_v dT \quad (3)$$

$$\mu = \mu(T), \quad k = k(T), \quad c_v = c_v(T) \quad (4)$$

Для построения конечно-разностного аналога выбранной системы двумерных дифференциальных уравнений была применена схема переменных направлений. Этот метод позволяет упростить решение, сводя двумерную задачу к последовательному решению одномерных задач.

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = (L_x + L_y) \varphi + f \quad (5)$$

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

$$\begin{cases} \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_x\right) \varphi^{n+1/2} = \left(E + \frac{\tau}{2} \tilde{L}_y\right) \varphi^n + \frac{\tau}{2} \tilde{f}^n \\ \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_y\right) \varphi^{n+1} = \left(E + \frac{\tau}{2} \tilde{L}_x\right) \varphi^{n+1/2} + \frac{\tau}{2} \tilde{f}^{n+1/2} \end{cases} \quad (6)$$

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

В результате была получена следующая аппроксимирующая разностная схема:

$$\begin{cases} \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{xu}\right) u^{n+1/2} = \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{yu}\right) u^n + \frac{\tau}{2} \tilde{f}_u^{n+1/2} \\ \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{xv}\right) v^{n+1/2} = \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{yv}\right) v^n + \frac{\tau}{2} \tilde{f}_v^{n+1/2} \\ \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{x\rho}\right) \rho^{n+1/2} = \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{y\rho}\right) \rho^n \\ \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{xT}\right) T^{n+1/2} = \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{yT}\right) T^n + \frac{\tau}{2} \tilde{f}_T^{n+1/2} \\ \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{yu}\right) u^{n+1} = \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{xu}\right) u^{n+1/2} + \frac{\tau}{2} \tilde{f}_u^{n+1} \\ \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{yv}\right) v^{n+1} = \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{xv}\right) v^{n+1/2} + \frac{\tau}{2} \tilde{f}_v^{n+1} \\ \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{y\rho}\right) \rho^{n+1} = \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{x\rho}\right) \rho^{n+1/2} \\ \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{yT}\right) T^{n+1} = \left(E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_{xT}\right) T^{n+1/2} + \frac{\tau}{2} \tilde{f}_T^{n+1} \end{cases} \quad (7)$$

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:

$$\begin{aligned}
\tilde{L}_{xu}u^{n+1/2} &= \frac{4}{3h_x^2} \frac{\left(\mu_{i+1/2,j}u_{i+1,j}^{n+1/2} - (\mu_{i+1/2,j} + \mu_{i-1/2,j})u_{i,j}^{n+1/2} + \mu_{i-1/2,j}u_{i-1,j}^{n+1/2}\right)}{\rho_{i,j}^n C_R} - u_{i,j}^{n+1/2} \frac{u_{i+1,j}^{n+1/2} - u_{i-1,j}^{n+1/2}}{2h_x} \\
\tilde{L}_{xv}v^{n+1/2} &= \frac{\mu_{i+1/2,j}v_{i+1,j}^{n+1/2} - (\mu_{i+1/2,j} + \mu_{i-1/2,j})v_{i,j}^{n+1/2} + \mu_{i-1/2,j}v_{i-1,j}^{n+1/2}}{h_x^2 \rho_{i,j}^n C_R} - v_{i,j}^{n+1/2} \frac{v_{i+1,j}^{n+1/2} - v_{i-1,j}^{n+1/2}}{2h_x} \\
\tilde{L}_{x\rho}\rho^{n+1/2} &= -\frac{u_{i+1,j}^{n+1/2} \rho_{i+1,j}^{n+1/2} - u_{i-1,j}^{n+1/2} \rho_{i-1,j}^{n+1/2}}{2h_x} \\
\tilde{L}_{xT}T^{n+1/2} &= \frac{\chi \left(k_{i+1/2,j}T_{i+1,j}^{n+1/2} - (k_{i+1/2,j} + k_{i-1/2,j})T_{i,j}^{n+1/2} + k_{i-1/2,j}T_{i-1,j}^{n+1/2}\right)}{h_x^2 \rho_{i,j}^{n+1/2} C_{v,i,j} C_R Pr} - T_{i,j}^{n+1/2} \frac{T_{i+1,j}^{n+1/2} - T_{i-1,j}^{n+1/2}}{2h_x}
\end{aligned} \tag{8}$$

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

Для решения данной системы использовался метод прогонки, который заключается в последовательном переносе граничных условий: сначала с левого конца направо с использованием рекуррентных формул, а затем с правого конца налево с применением обратных формул прогонки. Этот метод обеспечивает точность и эффективность при численном решении.

$$A_i = \frac{a_i}{b_i - c_i A_{i-1}}, \quad B_i = \frac{f_i - c_i B_{i-1}}{b_i - c_i A_{i-1}} \quad (i = 2, 3, \dots, M-1) \tag{9}$$

$$\varphi_i = A_i \varphi_{i+1} + B_i \quad (i = M-1, \dots, 3, 2) \tag{10}$$

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 $u_{i,j}^{n+1/2}, v_{i,j}^{n+1/2}, \rho_{i,j}^{n+1/2}, T_{i,j}^{n+1/2}$.

Для гарантии точности и надежности численных решений был проведен анализ устойчивости разностной схемы. Этот этап позволил выявить условия, при которых схема сохраняет стабильность и обеспечивает корректность расчетов (11).

$$\begin{aligned}
\tau &\leq \min\{a, b\} \\
a &= \frac{1}{\frac{u}{h} + \frac{v}{\ell} + \frac{2\chi}{C_R Pr} \left(1 + \frac{h^2}{\ell^2}\right)}; \quad b = \frac{\frac{u}{h} + \frac{v}{\ell}}{\left(\frac{u}{h} + \frac{v}{\ell} + \frac{1}{h C_M} \sqrt{1 + \frac{h^2}{\ell^2}}\right)^2}
\end{aligned} \tag{11}$$

Описанный алгоритм был реализован в виде фреймворка «SAFHE», блок-схема которого представлена на рис. 1.

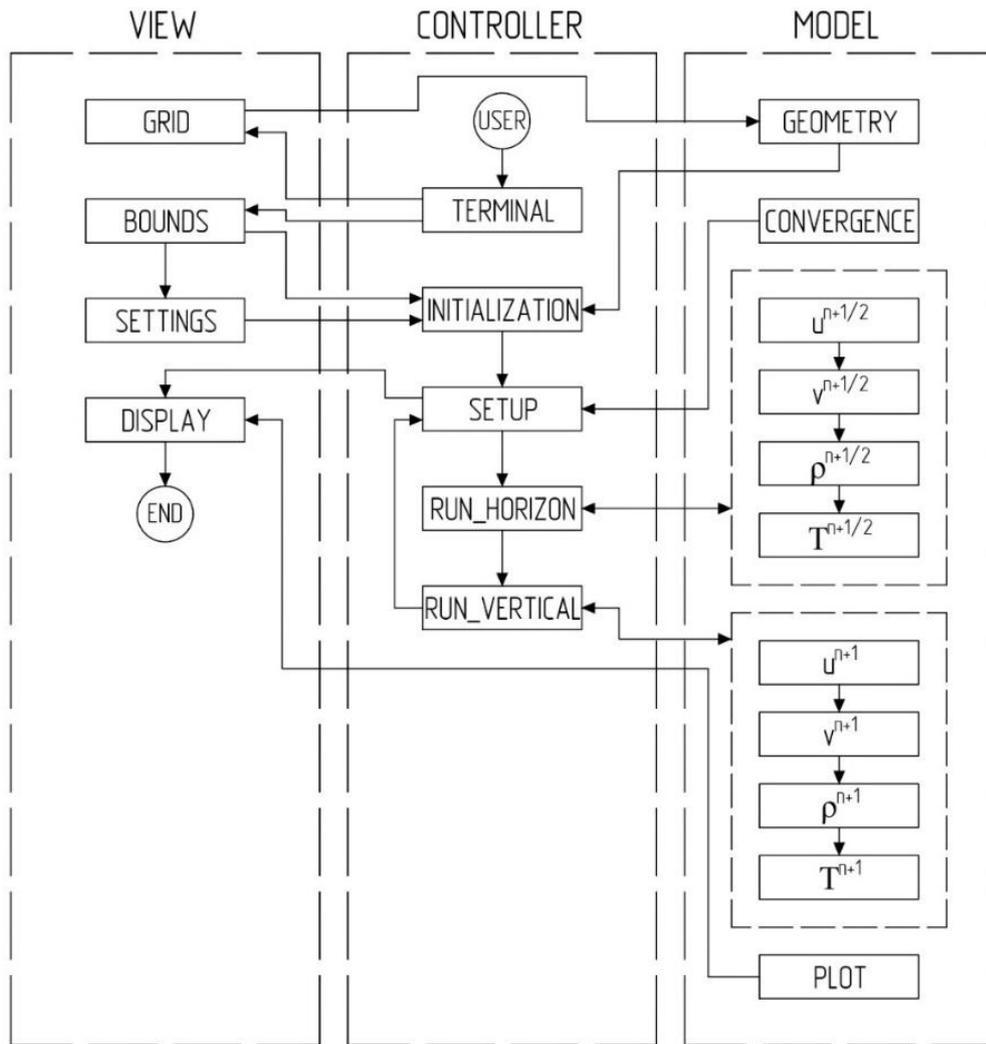


Рис. 1. Блок-схема фреймворка «SAFHE»

На основе созданного фреймворка выполнены расчеты течения и теплообмена при конвекции сжимаемого вязкого теплопроводного газа в замкнутой области православного храма. Полученные результаты представлены в виде иллюстраций, отображающих линии тока и температурные поля (рис. 3).

Для оценки точности, проверки сходимости, а также выявления дисперсионных ошибок и искусственных осцилляций в полученном решении был проанализирован характер влияния величины шага разностной сетки по пространственной координате $h(\ell)$ на погрешность вычислений на стационарном режиме (рис. 2).

Исследование проводилось путем вычисления среднеквадратичной ошибки (12) среднего числа Нуссельта (13), определенного для последовательной группы расчетных сеток.

$$E_h = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{Nu}_{h_i} - \bar{Nu}_{h_{i+1}})^2} \quad (12)$$

$$\bar{Nu}_{wL} = \frac{\bar{q}_w L}{k_w (T_{w2} - T_{w1})} \quad (13)$$

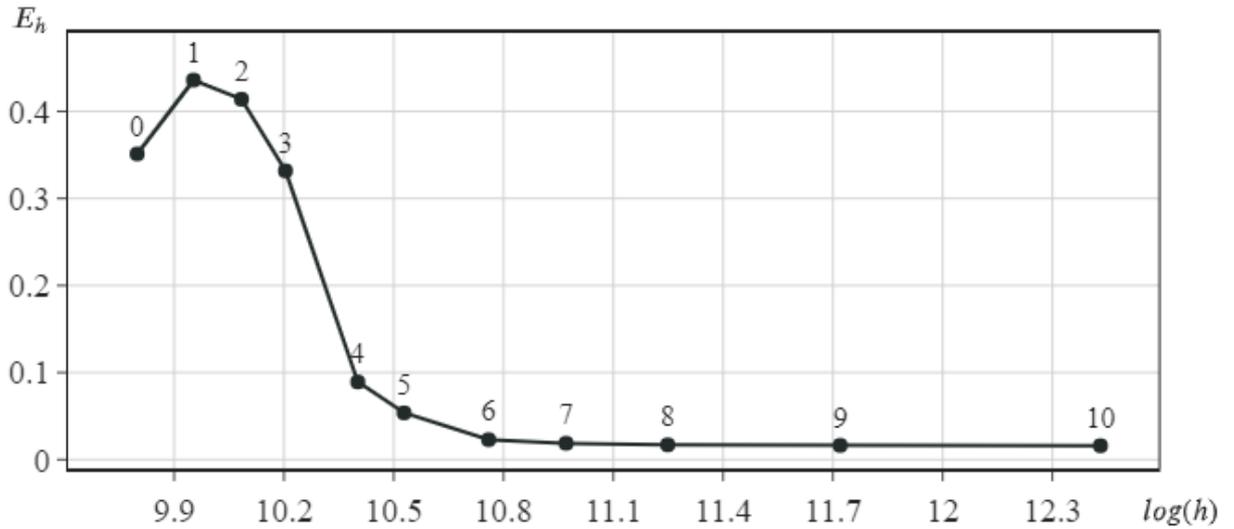


Рис. 2. Влияние изменения числа узлов сетки на среднеквадратичную ошибку числа Нуссельта

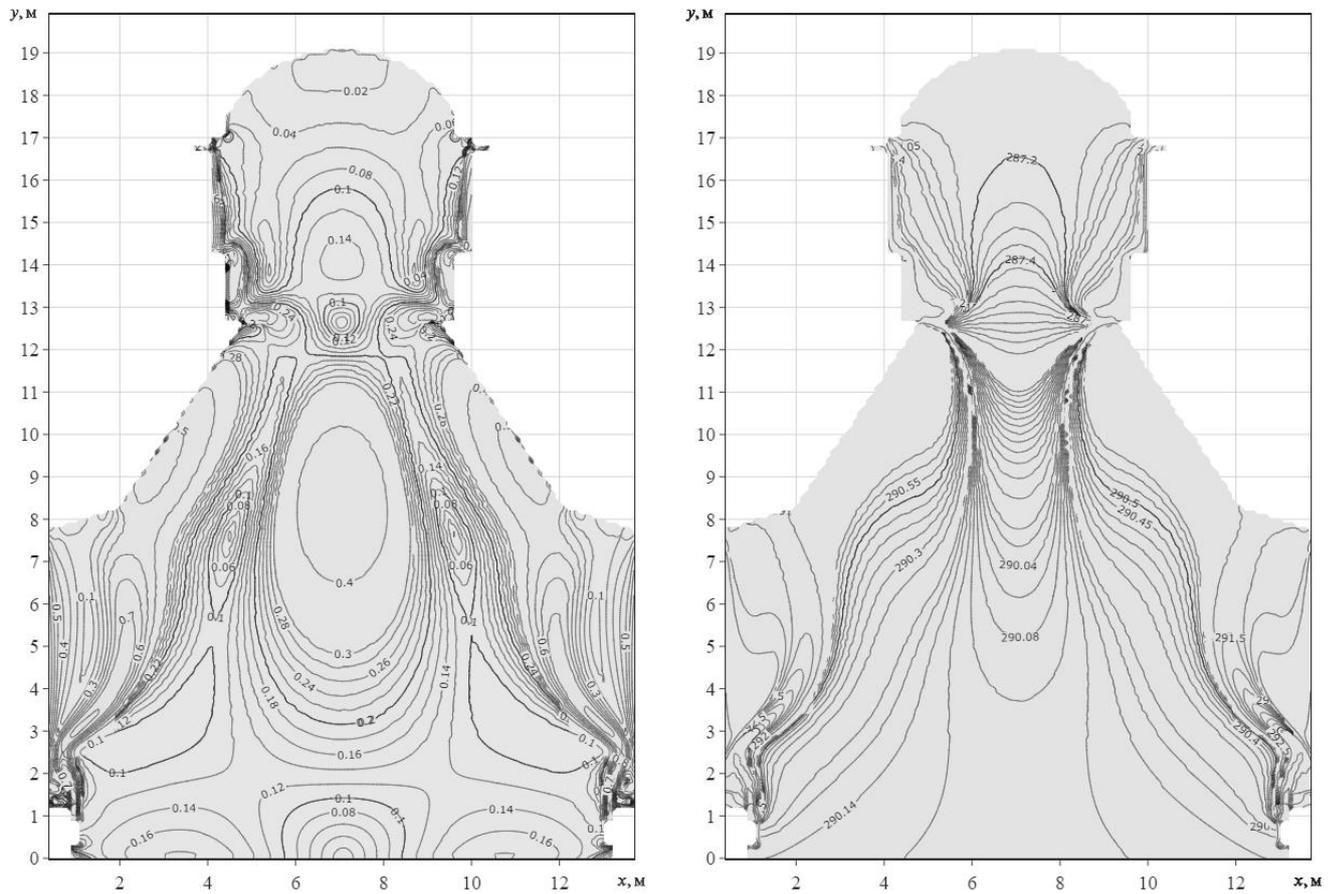


Рис. 3. Линии тока и поле температуры

Анализ полученных данных показал удовлетворительное согласование результатов по распределению плотности и температуры. Однако согласование по распределению скорости оказалось менее точным, что связано с использованием аппроксимации первого порядка для плотности на границе (14).

$$\frac{\rho_{1,j}^{n+1/2} - \rho_{1,j}^n}{\tau/2} = -\rho_{1,j}^n \frac{u_{2,j}^{n+1/2}}{h} \quad \text{или} \quad \rho_{1,j}^{n+1/2} = \rho_{1,j}^n \left(1 - \frac{u_{2,j}^{n+1/2} \tau}{2h} \right) \quad (14)$$

В третьей главе представлены результаты численного моделирования воздушных течений в трех православных храмах: церкви во имя святого благоверного князя Александра Невского, соборе Рождества Пресвятой Богородицы и кафедральном соборе святого благоверного князя Александра Невского. Моделирование позволило проанализировать особенности воздушных потоков и теплового режима каждого из храмов, что является важным для обеспечения оптимальных условий микроклимата.

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

$$\begin{cases}
 \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{cases} \tag{15}$$

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

$$\frac{\partial(\bar{\rho}k)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}k\bar{u}_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{\rho}k\bar{u}_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{\rho}k\bar{u}_z)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \quad (16)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right] + P_k - \bar{\rho}\varepsilon$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\varepsilon\bar{u}_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{\rho}\varepsilon\bar{u}_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{\rho}\varepsilon\bar{u}_z)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \quad (17)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \bar{\rho} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu\varepsilon}}$$

В табл. 1 представлены значения эмпирических констант, используемых для выбранной модели турбулентности «k-ε».

Табл. 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

Задачи решались в трехмерной постановке. Для моделирования были созданы исходные твердотельные 3D-модели помещений храмов с использованием программного комплекса *Autodesk Revit*, реализующего концепцию информационного моделирования зданий (*Building Information Modeling, BIM*). Характерные геометрические параметры помещений были определены на основе данных, полученных в ходе детальных обмеров.

При создании компьютерных моделей некоторые элементы расчетных областей, такие как оконные рамы, колонны и другие сложные детали, были упрощены. Это позволило оптимизировать модели для численных расчетов, сохранив при этом основные геометрические и физические характеристики.

Далее задача решалась в трехмерной постановке с использованием программного комплекса вычислительной гидро-газодинамики – ANSYS Fluent.

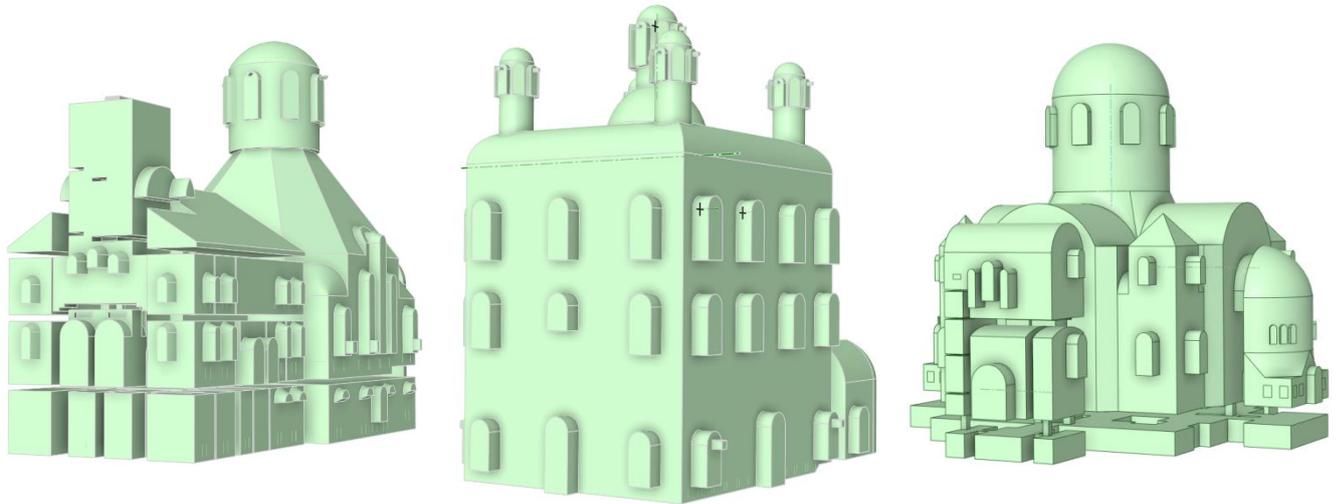


Рис. 4. Геометрия расчетных областей исследуемых храмов

В рамках данного исследования рассматривалось 3 тепловых режима помещения для различных периодов года: летний, зимний и переходный. В качестве текущей среды (рабочей средой) принят воздух, который задается во всех областях моделей, со следующими параметрами: температура $T = 288.16$ К; давление $P_{атм} = 101325$ 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).

Сетки, полученные в процессе моделирования, были проанализированы на наличие «сеточной зависимости». Для этого рассчитывалась разность среднего числа Нуссельта (13) между последовательными сетками, что позволило оценить влияние размера ячеек на точность и стабильность результатов.

На основе разработанных моделей был выполнен поиск оптимальных углов открытия приточных и вытяжных фрамуг с использованием метода градиентного спуска. В качестве целевой функции (19) использовалось суммарное отклонение температуры, скорости и расхода воздуха от расчетных параметров микроклимата, установленных для обслуживаемой зоны основных помещений храма. Эти параметры были определены в соответствии с требованиями СП 391.1325800.2017 «Храмы православные. Правила проектирования».

$$f(\theta) = w_T (T(\theta) - T_{target})^2 + w_Q (Q(\theta) - Q_{target})^2 + w_v (v(\theta) - v_{target})^2 \quad (18)$$

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

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \frac{\eta \hat{m}_t}{\sqrt{\hat{v}_t + m}} \quad (19)$$

где η – скорость обучения.

Для улучшения сходимости в процессе оптимизации использовался адаптивный метод изменения скорости обучения. Этот подход учитывал накопленный градиент предыдущих шагов, что обеспечивало экспоненциальное сглаживание траектории оптимизации и способствовало более стабильному достижению решения.

Из-за высоких вычислительных требований, предъявляемых к моделям при решении оптимизационных задач, угол открытия фрамуги исследовался не в полном диапазоне от 0° до 90°, а в рамках ограниченного набора значений: 0°, 30°, 60°. Такое ограничение позволило снизить нагрузку на вычислительные ресурсы, сохранив при этом возможность анализа ключевых параметров.

По результатам проведенных расчетов сформированы таблицы содержащие значения оптимальных углов открытия фрамуг и соответствующие им расчетные параметры внутреннего воздуха (табл. 2) в обслуживаемой зоне для каждого теплового режима работы храмов.

Используемый алгоритм поиска оптимальных углов открытия приточных и вытяжных фрамуг был реализован в фреймворке «SAFHE» для задач 2D, на основе моделей, предназначенных для машинного обучения: модель *GradientBoostingClassifier* (*scikit-learn*), модель *CatBoost* (Яндекс) и модель *LightGBM* (*Microsoft*).

Табл. 2. Соответствие параметров внутреннего воздуха в обитаемой зоне оптимальным углам открытия фрагуг

Храм	Период	Средняя скорость	Средняя температура	Массовый расход	Погрешность массового баланса
Церковь во имя святого благоверного князя Александра Невского	Зима	0.294 м/с	15.42 °С	0.77 кг/с	-0.52%
Церковь во имя святого благоверного князя Александра Невского	Лето	0.371 м/с	22.56 °С	0.93 кг/с	0.11%
Церковь во имя святого благоверного князя Александра Невского	Переходный	0.333 м/с	16.23 °С	0.81 кг/с	0.64%
Собор Рождества Пресвятой Богородицы	Зима	0.227 м/с	14.98 °С	0.92 кг/с	-0.13%
Собор Рождества Пресвятой Богородицы	Лето	0.301 м/с	21.17 °С	1.14 кг/с	-0.09%
Собор Рождества Пресвятой Богородицы	Переходный	0.256 м/с	15.66 °С	1.03 кг/с	-0.11%
Кафедральный собор святого благоверного князя Александра Невского	Зима	0.340 м/с	16.18 °С	1.12 кг/с	1.39%
Кафедральный собор святого благоверного князя Александра Невского	Лето	0.413 м/с	23.66 °С	1.39 кг/с	0.87%
Кафедральный собор святого благоверного князя Александра Невского	Переходный	0.368 м/с	16.97 °С	1.24 кг/с	1.46%

На рис. 5, рис. 6 представлены результаты численного моделирования храмов в зимний период.

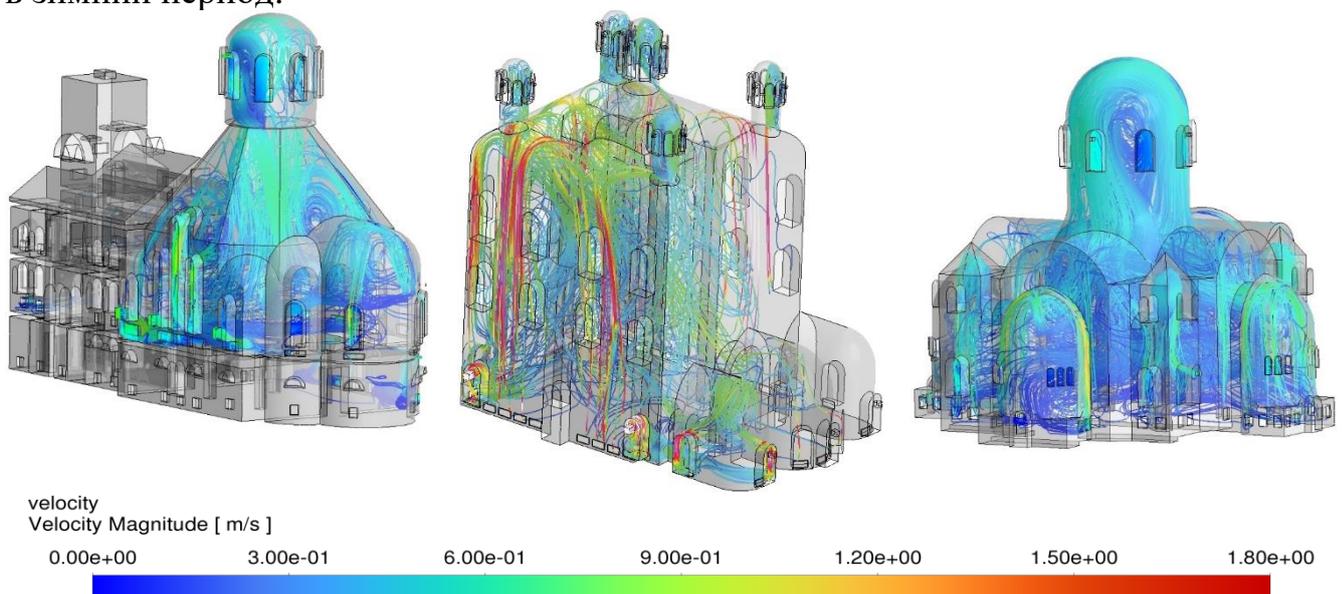


Рис. 5. Линии тока в зимний период в исследуемых храмах

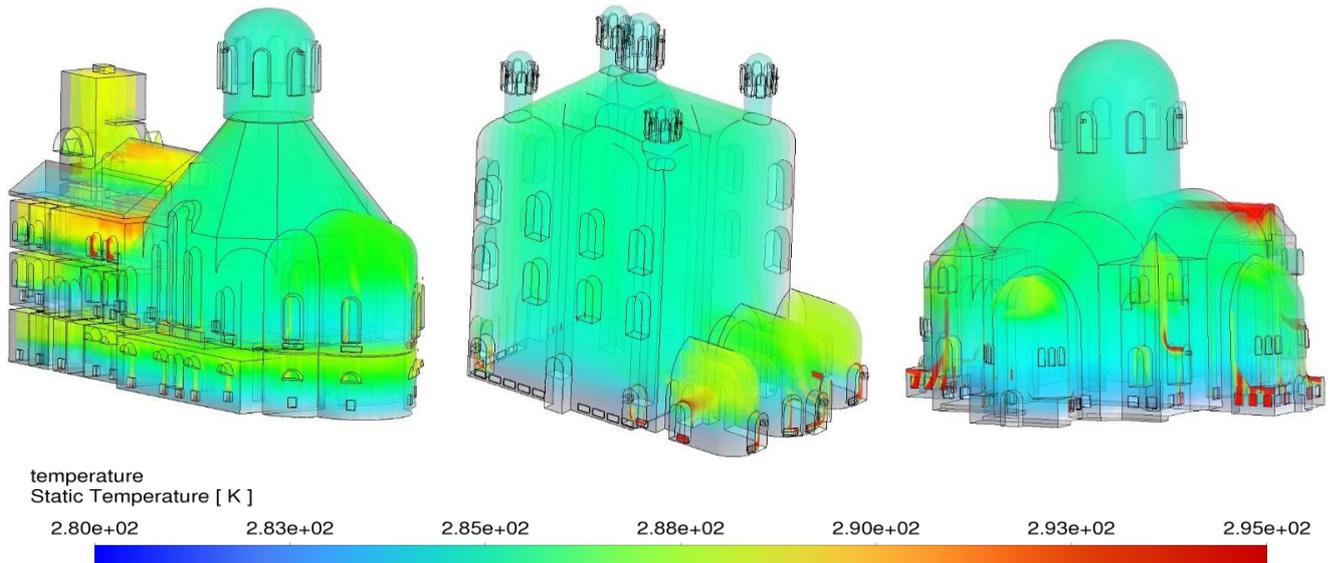


Рис. 6. Поля температуры в зимний период в исследуемых храмах

Четвертая глава посвящена экспериментальным методам изучения воздушных потоков, которые позволяют детально описать распределение скорости и температуры воздуха в православных храмах.

Для проверки точности модели, разработанной во второй главе, были проведены замеры температурных и скоростных полей воздуха в зимний период (в режиме работы системы отопления). Измерения выполнялись в центральной части церкви во имя святого благоверного князя Александра Невского, расположенной в деревне Кожевенное Богородского района Нижегородской области (год постройки – 2015).

Экспериментальные исследования скоростных и температурных полей проводились в натуральных условиях внутри помещений храма. Для измерений использовался термоанемометр ТТМ-2/1-06-2А, который обеспечивает измерение скорости воздуха в диапазоне 0,01–30 м/с с погрешностью $\pm 1\% + 1d$ и температуры в пределах 0–45 °С с погрешностью ± 1 °С.

На рис. 7 представлена схема точек замера температуры и скорости воздуха.

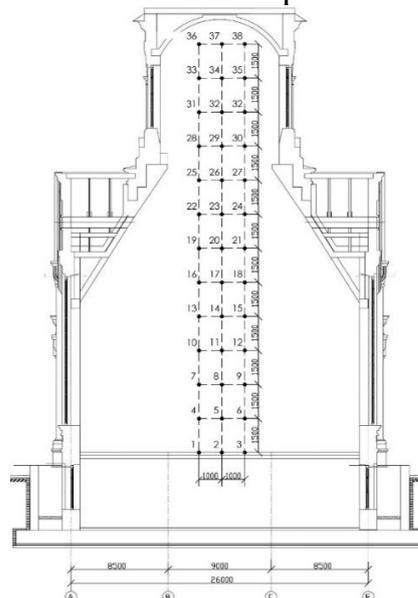


Рис. 7. Схема точек замера температуры и скорости воздуха

Для оценки воспроизводимости экспериментальных исследований был проведен комплекс статистических анализов, включающий расчет коэффициента вариации, применение конкордационного анализа Кендалла и использование критерия Кохрена. Итоги проведенных исследований представлены в табл. 3.

Табл. 3. Анализа воспроизводимости экспериментальных исследований

№	Метод	Обозначение	Температура воздуха (Т)	Скорость воздуха (V)
1	Коэффициент вариации	<i>CV</i>	4.23%	13.64%
2	Анализ конкордации Кендалла	<i>W</i>	0.885	0.712
3	Критерий Кохрена	<i>C</i>	0.335	0.381

Для визуального анализа сходимости данных и обнаружения статистически значимых отклонений были построены контрольные карты Шухарта, отображающие средние значения и размахи температуры. Эти карты позволили детально оценить стабильность результатов и выявить возможные отклонения от нормы.

Уравнение линейной регрессии для температуры T (20) и скорости воздуха V (21) в зависимости от трех переменных: координата по оси x , координата по оси y и температура наружного воздуха T_{out} было найдено как полином 4 степени.

$$\begin{aligned}
 T = & 0.2817 + 0.9024 \cdot x + 1.8935 \cdot x^2 - 0.3325 \cdot x \cdot y - \\
 & 0.1402 \cdot y \cdot T_{out} + 0.000222 \cdot x^3 - 0.3994 \cdot x \cdot y^2 + 0.0417 \cdot y^3 - \\
 & 0.0159 \cdot y \cdot T_{out}^2 - 0.005732 \cdot x^4 + 0.0227 \cdot x^3 \cdot y + 0.00246 \cdot x^2 \cdot y^2 - \\
 & 0.00312 \cdot y^4 + 0.000481 \cdot y^2 \cdot T_{out}^2 + 0.000009 \cdot y \cdot T_{out}^3
 \end{aligned} \tag{20}$$

$$\begin{aligned}
 V = & 100.291 + 2.9583 \cdot T_{out} + 6.2618 \cdot x \cdot T_{out} + 0.0229 \cdot y^2 + 1.0132 \cdot T_{out}^2 + \\
 & 0.0163 \cdot x^2 \cdot y - 0.9546 \cdot x^2 \cdot T_{out} - 0.0118 \cdot x \cdot y^2 - 0.000264 \cdot y \cdot T_{out}^2 + \\
 & 0.0274 \cdot T_{out}^3 - 0.00162 \cdot x^3 \cdot y + 0.0481 \cdot x^3 \cdot T_{out} + 0.000882 \cdot x^2 \cdot y^2 + \\
 & 0.000046 \cdot y^4 + 0.000050 \cdot y^3 \cdot T_{out} + 0.000032 \cdot y^2 \cdot T_{out}^2 + 0.000275 \cdot T_{out}^4
 \end{aligned} \tag{21}$$

Для каждой из построенных моделей был выполнен статистический анализ, направленный на оценку полноты и достоверности. Анализ включал расчет следующих показателей: коэффициент детерминации, коэффициент корреляции Пирсона, тест Бреуша-Пагана для проверки гетероскедастичности, тест Дарбина-Уотсона для анализа автокорреляции остатков, тест Джарка-Бера для проверки нормальности распределения остатков, критерий Фишера для оценки общей значимости модели, а также средней абсолютной процентной ошибки (MAPE). Результаты исследования представлены в табл. 4.

Табл. 4. 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 -value	$7.25 \cdot 10^{-10}$	$1.27 \cdot 10^{-9}$
Тест Бреуша-Пагана	BP	47.723	31.668
	p -value	0.142	0.582
Теста Дарбина-Уотсона	d	1.86	1.992
Тест Джарка-Бера	JB	1.012	4.207
	p -value	0.603	0.122
Тест Фишера	F	990.4	10.079
	p -value	$1.7 \cdot 10^{-108}$	$2.07 \cdot 10^{-24}$
Средняя абсолютная процентная ошибка	$MAPE$	1.57 %	2.45 %

Аналогичный анализ была проведен для результатов, полученных с использованием фреймворка *SAFHE*. Результаты тестов и метрик, представлены в табл. 5.

Табл. 5. 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 -value	$8.13 \cdot 10^{-10}$	$4.27 \cdot 10^{-9}$
Тест Бреуша-Пагана	BP	62.111	38.428
	p -value	0.091	0.62
Теста Дарбина-Уотсона	d	1.77	2.48
Тест Джарка-Бера	JB	1.51	5.4
	p -value	0.401	0.2
Тест Фишера	F	870.03	16.15
	p -value	$6.05 \cdot 10^{-123}$	$9.12 \cdot 10^{-19}$
Средняя абсолютная процентная ошибка	$MAPE$	4.61 %	1.98 %

Данные значения продемонстрировали способность полученных моделей в полной мере учитывать структуру экспериментальных данных.

Далее было выполнено сравнение полей скоростей и температуры, рассчитанных двумя различными подходами: методом вычислительной гидродинамики (*CFD*, с использованием фреймворка *SAFHE*) и регрессионными моделями. Полученные результаты были сопоставлены с экспериментально измеренными значениями для оценки точности и согласованности данных (рис. 8, рис. 9).

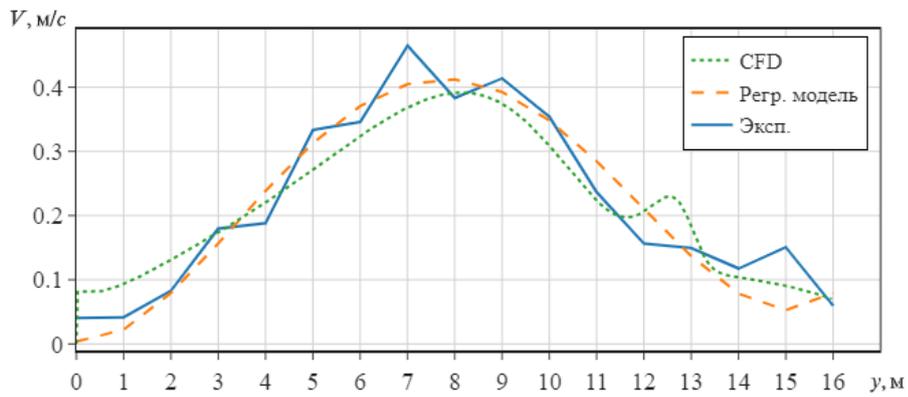


Рис. 8. Сравнения поля скорости на центральном продольном сечении

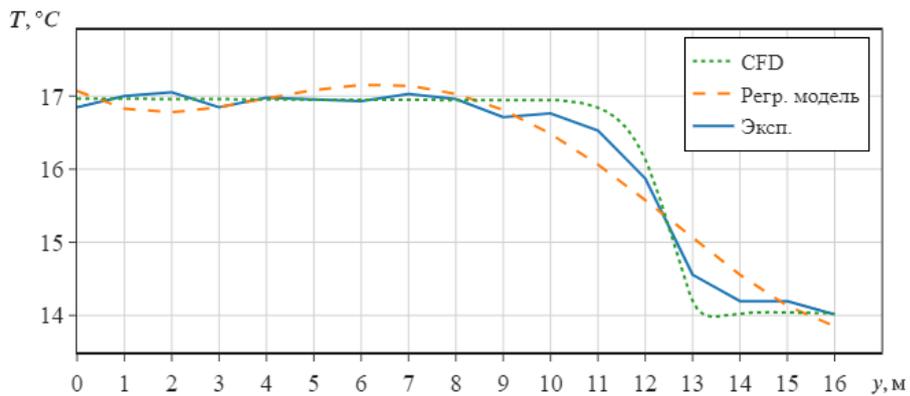


Рис. 9. Сравнения поля температуры на центральном продольном сечении

На основе разработанных моделей был рассчитан экономический эффект от внедрения системы регулируемого воздухообмена, выраженный в снижении расходов на отопление и вентиляцию. Экономия достигалась за счет оптимизации теплопередачи и уменьшения тепловых потерь.

Для учета сезонной специфики различных климатических условий применялся метод тепловых балансов, разделенных на три расчетных периода года: холодный, переходный и теплый. Такой подход позволил адаптировать расчеты к реальным условиям эксплуатации храмов в течение года, обеспечив точную оценку энергозатрат и потенциальной экономии.

Годовые показатели технико-экономических эффектов для всех трех храмов представлен в табл. 6.

Табл.6. 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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 сетках. 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 °С, скорость воздушных потоков – 0,05–0,6 м/с. В барабане купола зафиксированы более низкие температуры (13–15 °С) 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; 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 НАУЧНЫХ ТРУДОВ,
В КОТОРЫХ ИЗЛОЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ
В журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий,
рекомендованных ВАК РФ**

1. *Кочев А. Г.* Влияние температурного режима на сохранность культовых зданий / А. Г. Кочев, М. М. Соколов, **В. А. Уваров** // Строительство и техногенная безопасность. Научно-технический журнал по строительству и архитектуре. – 2023. – № 6. – С. 274-280.

2. *Кочев А. Г.* Создание температурных условий в православных храмах / А. Г. Кочев, М. М. Соколов, **В. А. Уваров** // Приволжский научный журнал. – 2023. – № 3. – С. 58-65.

3. *Кочев А. Г.* Численное исследование течения при конвекции воздуха в храме святого благоверного князя Александра Невского / А. Г. Кочев, М. М. Соколов, **В. А. Уваров** // Известия КГАСУ. – 2024. №2 (68). – С. 17-25.

4. *Кочев А. Г.* Особенности сохранения исторического облика фасадов православных храмов при проектировании инженерных систем / А. Г. Кочев, М. М. Соколов, А. А. Федотов, **В. А. Уваров** // Жилищное строительство. – 2024. – № 12. – С. 123-133.

Статьи в сборниках научных трудов и сборниках конференций

5. *Кочев А. Г.* Моделирование системы воздухообмена храма Александра Невского д. Кожевенное / А. Г. Кочев, **В. А. Уваров** // XIII Всероссийский Фестиваль науки: сборник докладов. – 2023. – С. 233-234.

6. *Кочев А. Г.* 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.

7. *Кочев А. Г.* 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.

Объекты интеллектуальной собственности

1. Свид. 2024690233 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Моделирование температурных и скоростных полей в помещениях православных храмов / А. Г. Кочев, **В. А. Уваров**, М. М. Соколов; заявитель и правообладатель ФГОУ ВО ННГАСУ (RU). – № 2024689879; заявл. 06.12.2024; опубл. 13.12.2024, Бюл.№12. – 1 с.

УВАРОВ ВАЛЕРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

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

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук