На правах рукописи



Фам Тхи Хонг Тхам

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ АТРИУМОВ ЗДАНИЙ С УЧЕТОМ ИХ ТЕМПЕРАТУРНО-ВОЗДУШНОГО РЕЖИМА

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

Научный руководитель: **Соловьев Алексей Кириллович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Дацюк Тамара Александровна,**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (г. Санкт-Петербург)», кафедра «Строительная теплофизика и химия», заведующий кафедрой

Соколов Михаил Михайлович,
кандидат технический наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра «Теплогазоснабжения», доцент

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет»

Защита состоится «___» _____ 2024 г. в ___ часов ___ минут (по местному времени) на заседании диссертационного совета 39.1.001.01 при ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» по адресу: 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21, светотехнический корпус, к. 205, тел. (495) 482-40-76, факс: (495) 482-40-60.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-методическом фонде НИИ строительной физики РААСН и на сайте https://niisf.ru/.

Автореферат разослан «___»_____2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Шмаров Игорь Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время строительство атриумов с каждым годом становится все более популярным. Атриумы являются особенностью архитектуры торгово-развлекательных центров, коммерческих и других общественных зданий. Основным преимуществом проектирования зданий с атриумами является низкое энергопотребление при создании здоровой и комфортной среды за счет поступления свежего воздуха в здание.

Однако тепловой режим больших остекленных пространств недостаточно изучен. В атриуме наблюдается эффект тепловой стратификации. В результате температура внутреннего воздуха может быть выше температуры наружного воздуха. В частично кондиционированном атриуме, хотя проблемы перегрева могут быть преодолены на нижних уровнях, на верхних уровнях, может быть очень жарко круглый год.

Здесь очень важно создать оптимальное соотношение площади приточных и вытяжных отверстий внизу атриума и в стеклянном кровельном покрытии. Влияние этих проемов на тепловые характеристики атриума в связи с эффективностью естественной вентиляции для зданий с атриумами является относительно новой областью исследований. Это очень важно особенно в летних условиях в умеренном и в жарком климате, так как стоимость энергии, затрачиваемой на охлаждение, очень высока. Следовательно, необходимо проведение всестороннего исследования различных геометрических параметров конструкций и зданий с атриумами в летних условиях для эффективного применения естественной вентиляции для таких зданий с целью повышения их энергоэффективности.

Степень разработанности темы исследования.

Диссертационная работа является продолжении научного направления в области повышения энергоэффективности современных общественных зданий. В области температурно-воздушного режима зданий работали многие ученые, среди которых следует особенно отметить таких, как В. Н. Богословский, В. В. Батурин, Л. Д. Богуславский, М. М. Бродач, Ю. А. Табунщиков, Т. А. Дацюк, В. Г. Гагарин, Э. И. Реттер, В. П. Титов, А. И. Гиясов. Вопросами естественного освещение и инсоляции занимались А. Т. Дворецкий, А. К. Соловьев, Н. М. Гусев, Н. В. Оболенский, В. А. Земцов, В. К. Савин, и многие зарубежные ученые.

Исследования этих ученых указывают на большие возможности предложения комплекса архитектурных, конструктивно-планировочных и инженерных решений по повышению тепловой эффективности зданий. Однако исследований внутреннего режима атриумов проводилось мало.

Определение необходимых площадей приточных и вытяжных проемов и их соотношения может способствовать улучшению системы охлаждения помещений атриумов в жаркий период. Влияние этих параметров на температурно-воздушный режим атриумов является относительно новой областью исследований. Требуется дальнейшее исследование данной проблемы, что делает тему исследования актуальной.

Объектом исследования являются здания с атриумами.

Предметом исследования являются архитектурно-строительные решения атриумов, учитывающие комфорт их температурно-воздушного режима.

Научно-техническая гипотеза исследования. Существуют определенные площади приточных и вытяжных проемов в атриуме, их оптимальные размеры и размещение, которые обеспечивают улучшение температурно-воздушного режима атриума и прилегающих к нему помещений на разных этажах.

Целью диссертационной работы является совершенствование архитектурно-строительных решений зданий с атриумами, которые способствуют улучшению естественного воздухообмена для обеспечения высокого качества воздуха, теплового комфорта и снижению энергозатрат на вентиляцию и кондиционирование.

Задачи, поставленные для достижения цели:

1. Разработка научных принципов и проектных рекомендаций по созданию зданий с атриумами, совершенствование их конструктивных и архитектурно-строительных решений;
2. Разработка предложений по созданию эффективной системы зданий с атриумами на начальной стадии проектирования;
3. Расчет площади вытяжных и приточных проемов и определение их расположения в ограждающих конструкциях по их влиянию на тепловые характеристики, обеспечивающие минимальные затраты энергии. В основу методики положена усовершенствованная диссертантом математическая модель теплового баланса помещения с учетом естественной вентиляции, обеспечивающей комфорт внутренней среды;
4. Определение на ранней стадии проектирования атриума конструкции и площади приточных и вытяжных проемов, обеспечивающих экономию затрат энергии на создание комфортного температурно-воздушного режима в конкретных летних условиях и в условиях жаркого климата.

Научную новизну работы составляют:

1. Получены расчетные зависимости для определения воздушного режима атриума при естественной вентиляции, которые основаны на выборе рационального соотношения площади вытяжных и приточных проемов;
2. Получены регрессионные зависимости для расчета изменения температуры по высоте атриума, которые позволяют оценить энергетическую эффективность организации воздухообмена при проектировании;
3. Предложены аналитические зависимости для расчета температуры и расхода воздуха в летний период года, использование которых при проектировании зданий с атриумами позволяет минимизировать энергетические затраты на охлаждение.

Теоретическая значимость: Показано, что площади приточных и вытяжных проемов зависят от высоты атриума. Расход воздуха, значение температуры на разных уровнях атриума, рассчитанные по предлагаемой методике на начальных этапах проектирования позволяет оценить энергоэффективность предлагаемого решения.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в использовании предложенного метода расчета при определении геометрических параметров атриума (размеры в плане, высота) и геометрических параметров

приточных и вытяжных вентиляционных проемов, а также их расположения в здании. Для этого разработана программа «Программа расчета расхода и температур воздуха на разных этажах зданий с атриумами с различными геометрическими параметрами на ранних стадиях проектирования», на которую получено свидетельство о государственной регистрации № 2023668219 от 24 августа 2023 г.

Методология и методы исследования основаны на принятой в аэрационных исследованиях аналогии воздушных и жидкостных ламинарных потоков. При этом результаты теоретических расчетов проверены натурными измерениями в реальном здании с атриумом, проведенными с помощью сертифицированных приборов, пирометров, анемометров и измерителей влажности воздуха.

Степень достоверности результатов. Достоверность результатов, полученных при проведении натурных исследований, анализа полученных данных и вычислительных экспериментов, обеспечивалась использованием современных средств измерений, применением апробированных методов математического моделирования и обоснована использованием классических уравнений строительной теплофизики.

Положения, выносимые на защиту:

Методика оценки энергетических параметров атриума таких как температура, расход воздуха в зависимости от соотношения площадей приточных и вытяжных проемов в связи с проектируемой высотой атриума и его другими геометрическими параметрами и конструкциями.

Рекомендации по энергетически оптимальному соотношению площадей приточных и вытяжных проемов для летних условий при заданной высоте атриума, для конкретных климатических условий.

Личный вклад автора в результаты диссертационной работы, заключается в разработке задач диссертационной работы (совместно с руководителем), в разработке модифицированной программы для ЭВМ для расчетов воздушных потоков и их температуры в пространстве атриума, в проведении экспериментальной проверки методики расчетов в натурных условиях и в разработке рекомендаций по энергетически оптимальному соотношению площадей приточных и вытяжных проемов для летних условий при заданной высоте атриума в зависимости от климатических условий места строительства.

Апробация результатов

Результаты диссертационной работы докладывались на следующих 4 международных научных конференциях:

- Международная научная конференция, XXVI International Scientific Conference on Advanced in Civil Engineering. «Construction the Formation of Living Environment», Ташкент, Узбекистан, 26-28 апреля 2023 г.;
- Международная научная конференция – XIII-е академические чтения, посвященные памяти академика РААСН Осипова Г. Л. «Актуальные вопросы строительной физики. энергосбережение. надежность строительных конструкций и экологическая безопасность», ФГБУ НИИСФ РААСН, 5 июля 2022 г.;
- Международная научная конференция, «Моделирование и методы расчета строительных конструкций». The II International Scientific Conference «Modelling and Methods of Structural Analysis» (MMSA-2021), г. Москва, 2021 г.;

- Международная научная конференция, I International Conference on Innovations for Computing, Engineering and Materials. The 1st International Conference on «Innovations for Computing, Engineering and Materials» (ICEM-2021), Хошимин, Вьетнам, 13 июня 2021 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 научных работ, в том числе 3 работы в журналах, включенных в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук»; 5 работ в зарубежных изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science; получено 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ и 2 акта внедрения результатов НИД.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использовавшей литературы и приложений. Общий объем работы – 168 страниц, в том числе 10 страниц приложений. Работа включает 57 рисунков и 10 таблиц. Количество источников использованной литературы – 113, в том числе 70 зарубежных источников. Количество приложений – 3.

Содержание диссертации соответствует пунктам 3 и 4 паспорта научной специальности 2.1.3 – теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение:

3. Разработка и совершенствование систем теплогазоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха, разработка методов энергосбережения систем и элементов теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения и освещения, охраны воздушного бассейна, защиты от шума зданий и сооружений, аспирации и пневмотранспорта, включая использование альтернативных, вторичных и возобновляемых источников энергии; развитие методов моделирования многофазных потоков и динамических процессов в аэродисперсных системах.

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.

Диссертационная работа выполнена на кафедре АСПиФС НИУ МГСУ под руководством д.т.н., профессора Соловьева А. К. Автор выражает большую благодарность своему научному руководителю, кафедре АСПиФС, и всем коллегам за ценные советы и замечания.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулирована основная научно-техническая гипотеза, цели и задачи диссертационного исследования, представлены пункты научной новизны, теоретической и практической значимости диссертации, данные о методологической основе, апробация результатов исследований, а также данные об объеме и структуре диссертации.

В первой главе представлен обзор архитектурных и строительных решений атриумов, включая изучение истории развития атриумных пространств, их типов и классификацию зданий с атриумами. Освещается опыт отечественного и зарубежного строительства зданий с атриумами, демонстрирующий разнообразие принципов проектирования атриумных пространств. Подчеркиваются важные факторы, влияющие на проектирование атриумных пространств, включая климатизацию атриумов с помощью кондиционеров и вентиляции, освещение атриумов, прогнозирование уровня комфорта в атриуме, влияние атриума на внутреннюю среду смежных помещений, тепловой комфорт в атриуме и смежных помещениях. Отдельное внимание уделено влиянию озеленения атриумов на качество воздушной среды и энергоэффективность атриумов.

Во второй главе представлены натурные исследования температурно-воздушных параметров в атриуме здания УЛК-МГСУ в городе Москве в жаркий летний период, как показано на рис. 1. Эти исследования были проведены с целью изучения изменения температуры по высоте атриума.



а) б)

Рисунок 1 – Фотография атриума объекта исследования (а); внутренне пространство атриума (б)

Целями экспериментального исследования являются:

- изучение температурных полей помещения атриума для повышения тепловой эффективности здания атриума УЛК в летний период с помощью недорогого вентиляционного решения путем изменения площадей входных дверей и площадей выходных проемов в остекленном кровельном покрытии для повышения теплового комфорта;
- анализ физических параметров вентиляции путем сравнения расчетных данных и данных экспериментальных измерений. Результаты исследования сопоставлены с вычислительной моделью гидродинамики (CFD), чтобы понять, как формируется воздушный поток в различных ситуациях, включая тепловые источники, размеры и положения приточных и вытяжных проемов в условиях жаркого периода года;

- изучение температурной стратификации воздуха в пространстве атриумного здания УЛК-МГСУ при различных положениях и площадях приточных и вытяжных проемов.

Для достижения целей решаются следующие задачи:

Измерение температуры воздуха внутри и снаружи здания, включая температуру внутренней поверхности стеклянной пирамиды крыши. Измеренные данные, полученные в результате натурных исследований, особенно температура внутреннего воздуха, были использованы для анализа линейной зависимости между двумя переменными: температурой воздуха и высотой над уровнем пола атриума для оценки характеристик внутренней тепловой среды в атриуме, с точки зрения тепловой стратификации.

Были получены измеренные данные, температуры воздуха в помещении, для проверки результатов термодинамического моделирования того же атриума здания с использованием программного обеспечения CFD.

Результаты данного исследования использованы для подтверждения надежности программы CFD при проведении динамического моделирования теплового режима атриумов. Это подробно **рассмотрено в третьей главе.**

Таблица 1 – Характеристики здания УЛК-МГСУ

Параметр	**Значение**
Форма здания	Прямоугольная
Площадь плана	12 000 м^2
Габаритные размеры здания (глубина/ширина/высота)	Глубина (Длина): 60,2 м Ширина: 42,4 м 5 этажей, 1-ой этаж высотой со 4,8 м, 2-5 й этажи высотой 3,6 м Общая высота УЛК по парапету кровли: 17,3 м^2 Высота по верху фонаря: 23,7 м
Ориентация продольных фасадов здания	Северо-Восточная (С-В) и Юго-Западная (Ю-З)
Площадь плана атриума	17,4 × 21,2 м^2
Соотношение остекления кровли и площади пола атриума	100 %
Вид атриума	Четырехстенный атриум
Отношение площади открывающегося остекления на кровле к общему остеклению кровли	5 %

Распределение температуры и воздушных потоков в атриуме характеризуется измерением температуры внутреннего воздуха на каждом этаже, в дверях и проемах на крыше (температура внутренней поверхности стеклянной пирамиды). Проводилось измерение температуры снаружи здания и температуры воздуха внутри в различных точках атриума на каждом этаже, а также температуры внутренней поверхности остекления пирамиды кровли, находящихся в контакте с солнечным светом. Для измерения температуры внутреннего воздуха на каждом этаже были использованы

четыре различных точки, включая входные двери на первом этаже и окна на крыше. Распределение температуры и воздушных потоков в атриуме характеризовалось измерением температуры внутреннего воздуха, как показано на рис. 2.

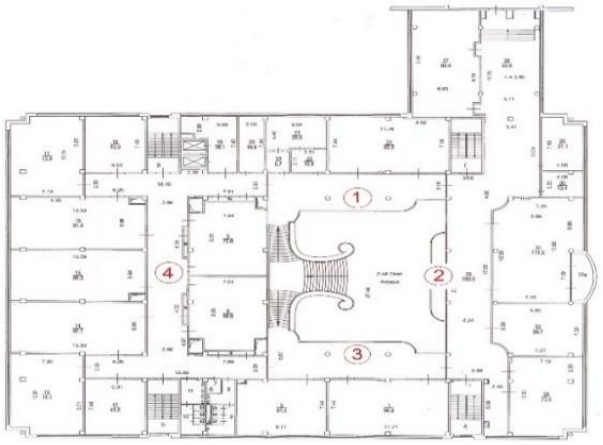


Рисунок 2 – Расположение точек измерения температуры на каждом этаже в атриуме здания УЛК МГСУ

Во время эксперимента движение воздуха и относительная влажность в каждой точке не измерялись, поскольку подвижность воздуха в атриумном пространстве была обычно слишком мала ($v < 0{,}1$ м/с) и соответствует штилевым условиям. Поэтому достаточно было одного измерения в день, чтобы проверить это условие. В течение 15 дней экспериментальных измерений были выбраны четыре различных случая открытия и закрытия проемов, показанные ниже:

Случай 1. Полностью закрыты двери первого этажа, отключена система искусственной вентиляции и полностью закрыты окна на прозрачной стеклянной крыше площадью 20,16 м^2.

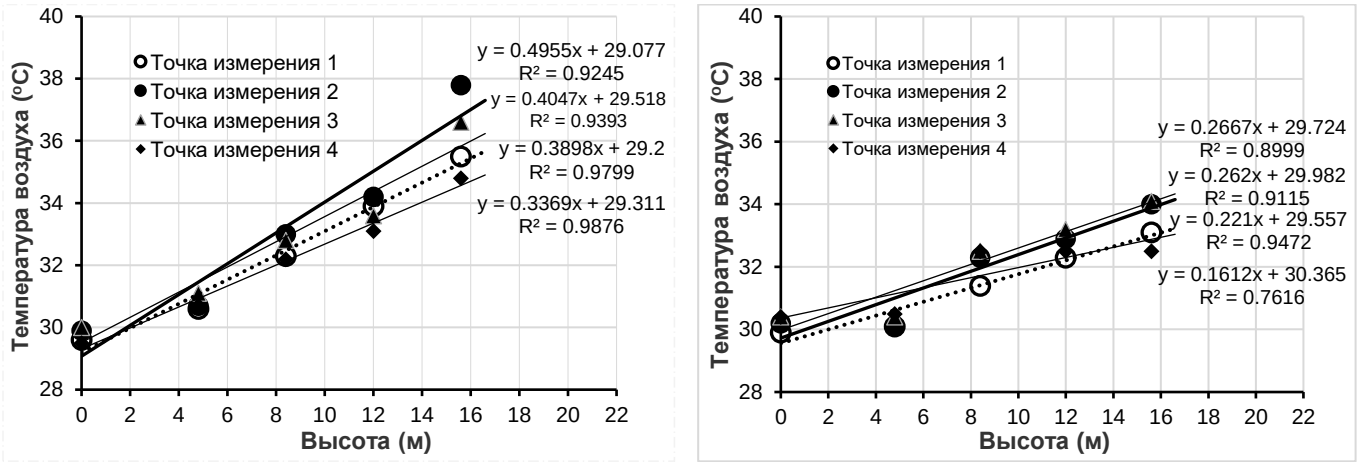
Случай 2. Полностью закрыты двери на первом этаже, отключена искусственная вентиляция и полностью открыты окна на прозрачной стеклянной крыше площадью 20,16 м^2.

Случай 3. Полностью открыты двери на первом этаже площадью 8,19 м^2, отключена система искусственной вентиляции и полностью закрыты окна на прозрачной стеклянной крыше.

Случай 4. Полностью открыты двери на первом этаже площадью 8,19 м^2, отключены системы искусственной вентиляции и полностью открыты окна на прозрачной стеклянной крыше площадью 20,16 м^2.

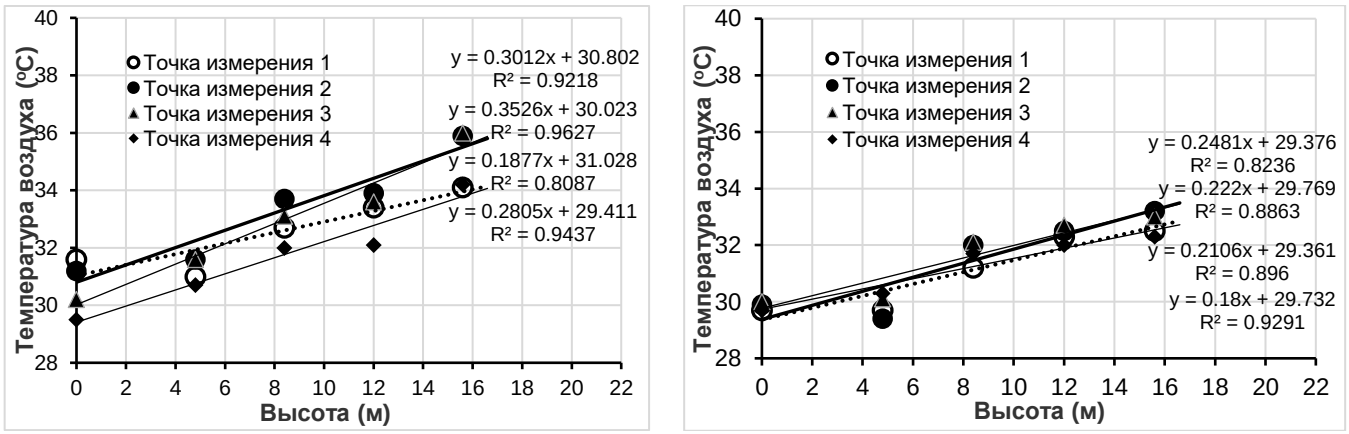
Результаты натурных исследований показывают, что различия в расположении и размерах проемов в прозрачной стеклянной крыше атриума при не работающей системе вентиляции оказывают существенное влияние на температурное поле внутри зданий с атриумом. В частности, стратификация температуры воздуха в атриумном пространстве значительно уменьшается при увеличении расположения и размеров проемов в вершине остекления атриума. Среди всех вариантов охлаждение атриума имеет самую высокую эффективность в случае 4 за счет на 50 % открытых дверей на первом этаже и всех вытяжных проемов на прозрачной стеклянной крыше. При этом условии, люди, находящиеся в

атриуме, будут чувствовать себя комфортно. Это показано на рис. 3 и 4, где видно, как изменяется температура по высоте атриума для всех исследованных вариантов.



а) б)

Рисунок 3 – График распределения температуры воздуха по разным этажам здания с атриумом: а) при закрытых светопрозрачных проемах и закрытых внизу входных дверях на 100 % (случай 1); б) при открытых светопрозрачных проемах и закрытых внизу входных дверях на 100 % (случай 2)



а) б)

Рисунок 4 – График распределения температуры в атриуме по этажам в здании с атриумом: а – при закрытых светопрозрачных вытяжных проемах и открытых внизу входных дверях на 100 % (случай 3); б – при открытых светопрозрачных вытяжных проемах и открытых внизу входных дверях на 100 % (случай 4)

Таким образом, тепловые характеристики атриума можно улучшить за счет размера и расположения приточных и вытяжных проемов при условии, что остекление в атриуме достаточно велико, а дверной проем по площади ограничен и степень открытия проемов варьируется в зависимости от климатических условий наружного воздуха.

С помощью натурного эксперимента мы получили возможность определить линейный коэффициент подъема графика температур воздуха по высоте атриума. Вертикальный профиль подъема температур может быть рассчитан в зависимости от температуры пограничного слоя на полу, температуры в центре вытяжного отверстия и его высоты (см. рис. 13).

В третьей главе исследуется возможность использования вычислительной гидродинамики (CFD), для моделирования внутренней тепловой среды в атриуме. Эта CFD-модель была создана не только для исследования системы вентиляции, основанной исключительно на силе тяги, внутри здания с различными положениями и размерами вытяжных проемов, но и для дополнения результатами измерений расчетной программы разработанной нами в процессе работы. Прогнозы модели CFD были подтверждены сравнением с измеренными данными о температуре воздуха в помещении. Мы обнаружили, что предсказания модели CFD хорошо согласуются с результатами измерений. Главные геометрические размеры модели здания, применяемые в CFD-моделировании в данной главе, как показано на рис. 5.

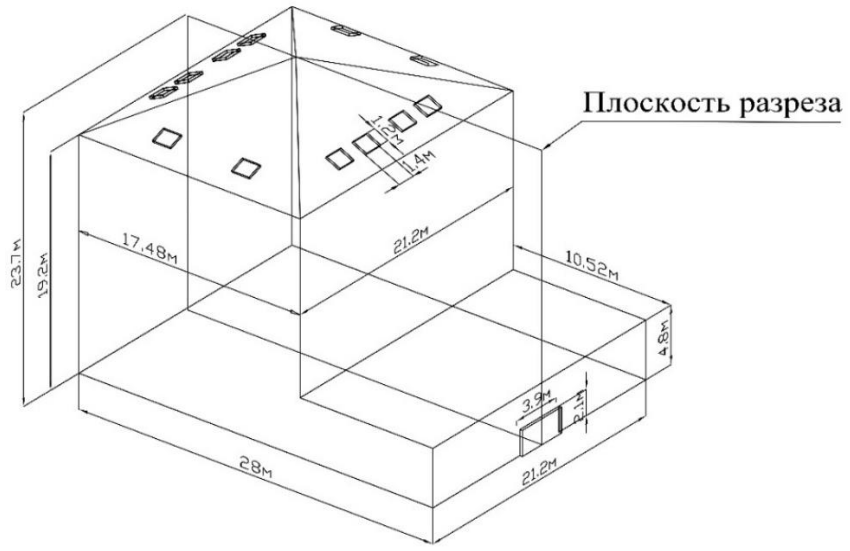


Рисунок 5 – Геометрические параметры модели атриума, взятые для теоретического исследования

Среднее отклонение между прогнозируемой и измеренной температурой воздуха составляло от 2 до 6 %. Вероятной причиной этого расхождения может быть экспериментальная ошибка, ошибка, вызванная допущениями, принятыми в численной модели, то есть тепловой массой стен, которые принимались за изолированные во время моделирования, и другие источники тепла в атриуме, которые не были учтены в моделировании.

Полученные расчетные значения дают величины, которые относительно хорошо согласуются с экспериментальными результатами с такой точностью, что их можно использовать, по крайней мере, при предварительном проектировании атриума. Графики показывают также, что квазилинейный характер их объясняется расположениям точек измерения по сторонам атриума, где влияние теплоты стен достаточно велико. Было замечено, что в присутствии солнечной радиации эффект свободной конвекции проявляется в формировании воздушного потока, движущегося вверх огибая нагретые поверхности балконов. Более высокая температурная стратификация воздуха в пятиэтажном атриуме наблюдалась в случае закрытых светопрозрачных проемов и полностью закрытой входной двери внизу. Напротив, более низкая температурная стратификация наблюдалась, когда светопрозрачные

проемы полностью открыты, а входные двери внизу открыты на 100 %. Сильный эффект дымовой трубы создает приток воздуха в нижних этажах и приводит к сильному потоку воздуха на верхних этажах и в открытых проемах в крыше. Графики сравнения измерений температур и их расчетов по CFD показаны на рис. 6 а, б, в и г.

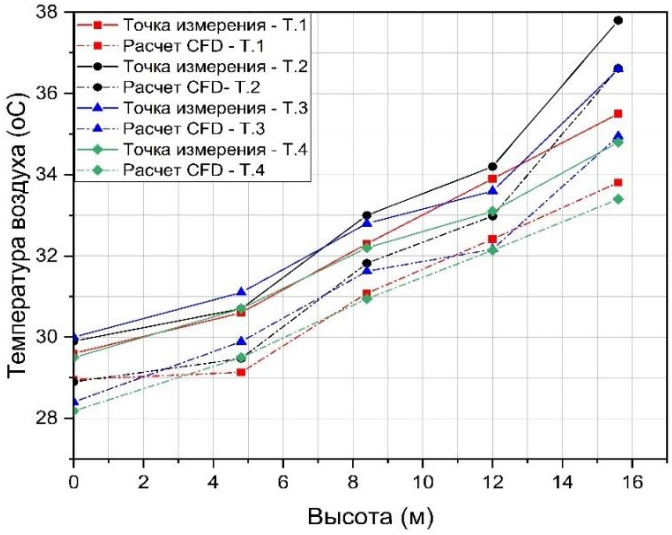


Рисунок 6 а – Графики температуры воздуха по результатам экспериментальных измерений и численных прогнозов для случая 1 в зависимости от высоты точки измерения

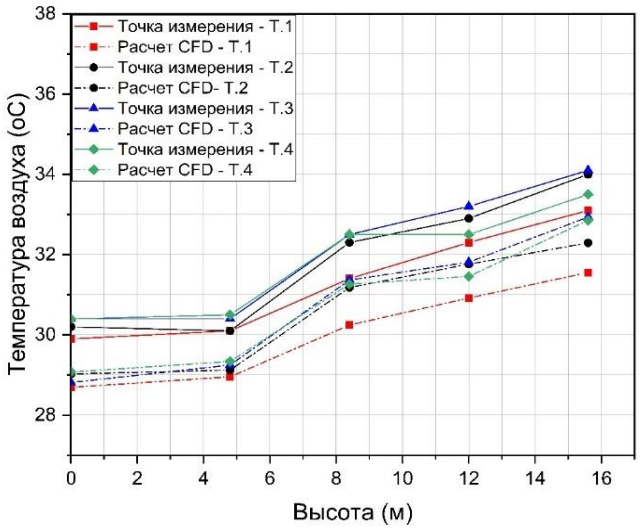


Рисунок 6 б – Графики температуры воздуха по результатам экспериментальных измерений и численных прогнозов для случая 2 в зависимости от высоты точки измерения

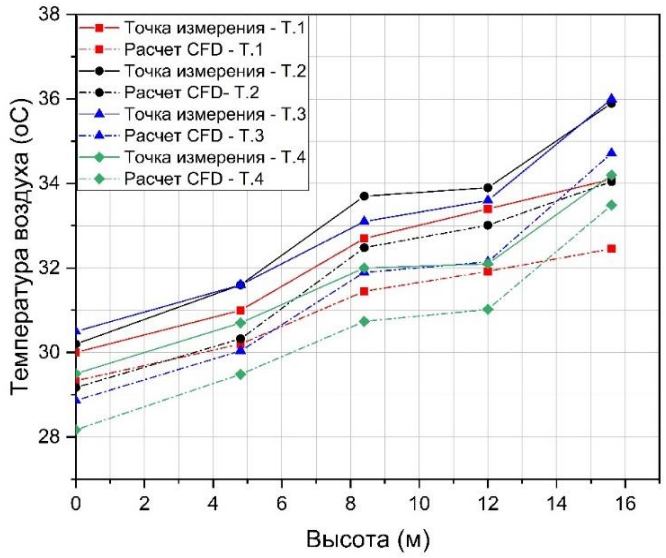


Рисунок 6 в – Графики температуры воздуха по результатам экспериментальных измерений и численных прогнозов для случая 3 в зависимости от высоты точки измерения

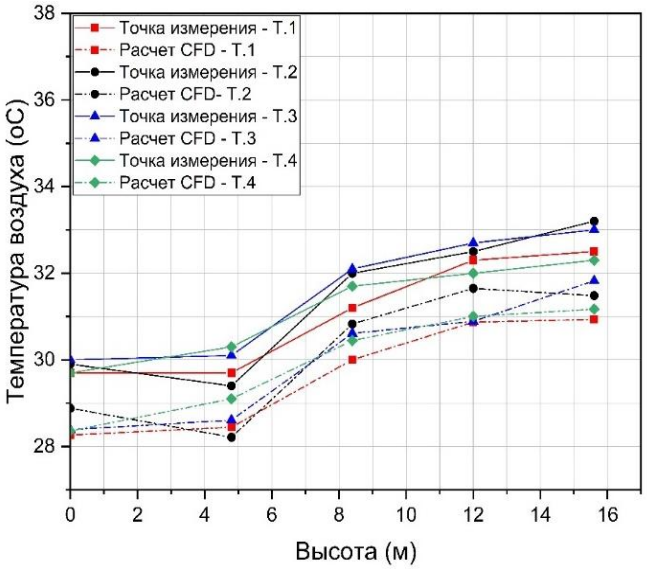
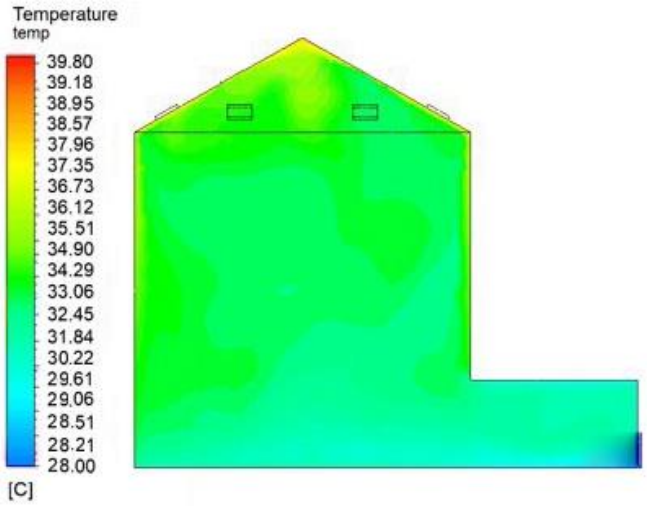
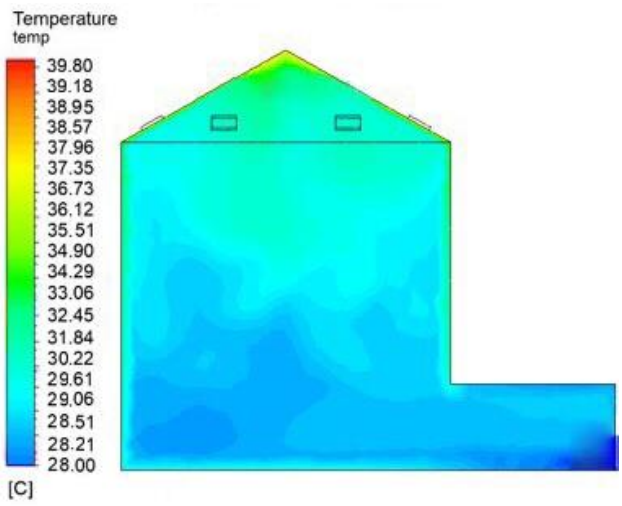


Рисунок 6 г – Графики температуры воздуха по результатам экспериментальных измерений и численных прогнозов для случая 4 в зависимости от высоты точки измерения

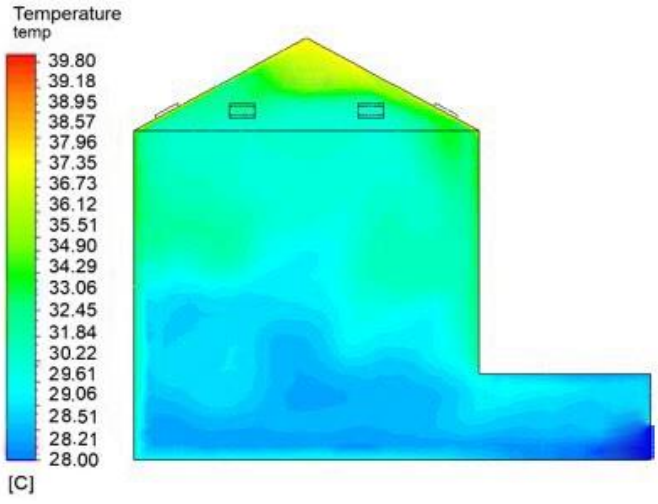
Графики 7 а, б, в и г показывает расчетную визуализацию распределения температур по разрезу атриума, полученную с использованием программы CFD. На основании этого исследования, а также из наблюдений других авторов в литературе был сделан вывод, что CFD оказалась надежным инструментом для моделирования потока и теплопередачи в атриумном пространстве, интегрированном с гибридной вентиляцией, с учетом явления теплопроводности, конвекции и радиационного теплообмена. С помощью численного метода можно проанализировать скорость потока и распределение температуры в атриуме.



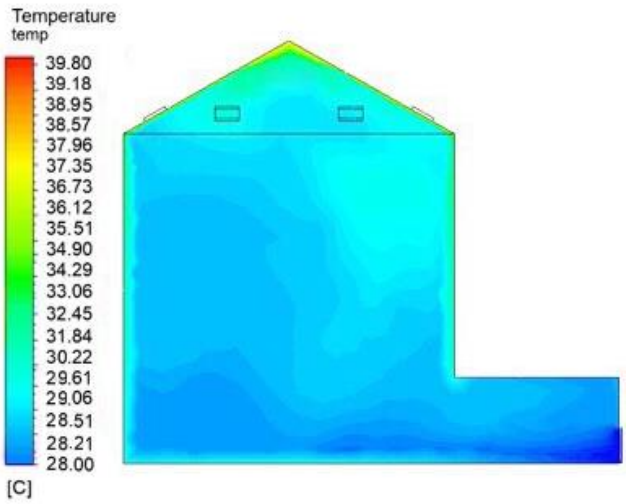
а) случай 1



б) случай 2



в) случай 3



г) случай 4

Рисунок 7 – Графическое визуальное распределение температуры в здании с атриумом, для случаев с 1 по 4

В четвертой главе выполнена разработка метода расчета геометрических параметров конструкций атриума здания и включение его в теоретическую модель для расчета расхода воздуха при использовании заданных параметров

вентиляционных проемов в зданиях с атриумами в связи с его высотой, как показано на рис. 8.

В основе метода расчета лежат следующие предположения:

- закон сохранения расхода массы, энергии и импульса. При стабильных условиях, учитывая, что воздух в здании несжимаемый из-за его малой скорости, потоки на входе и выходе из здания практически одинаковы;
- энергия, получаемая за счет теплопроводности через стены и от излучения через стеклянную крышу здания, сохраняется и стабильна, но температуры воздуха различны;
- основываясь на результатах эксперимента для принятия решений предполагается, что температура линейно распределяется по высоте. Поступающий воздух рассеивается и заполняет все здание, прежде чем покинуть его. Это означает, что параметры температуры и давления в поперечном сечении по высоте одинаковы;
- считается, что температура наружного воздуха не изменяется в пределах высоты атриума. Это предположение вполне оправдано в контексте данной задачи, поскольку высота атриума здания оценивается всего в 20-30 метров, в то время как температура воздуха в тропосфере земли, как правило, изменяется с каждым подъемом на 1000 метров и снижается на 6,5 градуса. В данном случае будем считать ($T_o = T_s$), где T_o – температура в нейтральной плоскости снаружи здания атриума, $°C$, равная T_s – температуре наружного воздуха на входных проемах, $°C$.
-

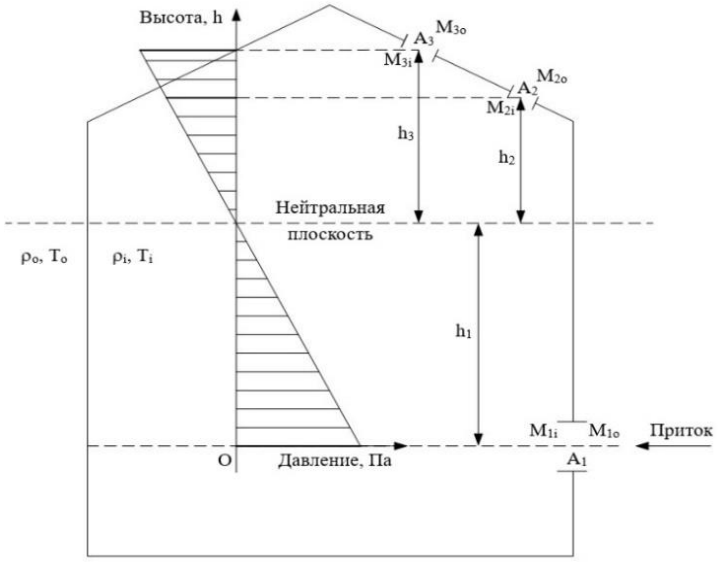


Рисунок 8 – Расчетная схема

где: A_1 – площадь приточных проемов (м^2); A_2, A_3 – площадь вытяжных проемов, (м^2); T_o – наружная температура воздуха, (^{o}C); T_i – внутренняя температура воздуха, (^{o}C); M_{1o} – массовый расход воздуха снаружи через приточные проемы, (кг/с); M_{1i}, – массовый расход воздуха внутри через приточные проемы, (кг/с); M_{2o}, M_{3o} – массовый расход воздуха снаружи через приточные проемы, (кг/с); M_{2i}, M_{3i} – массовый расход воздуха внутри через приточные проемы, (кг/с); ρ_o, ρ_i – плотность

воздуха снаружи и внутри, (кг/м^3); h_1, h_2, h_3 – высота между нейтральной плоскостью и проемом, (м); g – ускорение свободного падения, (м/с^2).

Рассматривается воздушный поток в контрольном объеме, как показано на рисунке 9. По закону сохранения расхода масс, имеется уравнение (1):

$$\rho_o C_{d1} A_1 v_{1.Teop.} - \rho_i C_{d2} A_2 v_{2.Teop.} - \rho_i C_{d3} A_3 v_{3.Teop.} = 0 \qquad (1)$$

где: $v_i = C_i v_{i,Teop.}$ – скорость воздуха в потоке, м/с; ρ_i – плотность воздуха, кг/м^3; A_i – площади приточного и вытяжного проемов, м^2; индексы “1”, “2”, “3” представляют вход и выходы, соответственно; индексы “i” и “o” означают параметры воздуха внутри и снаружи здания; C_d – коэффициент потери скорости потока на приточных и вытяжных проемах. Обычно, $C_d = 0,6 \div 0,75$.

Предполагается, что распределение температурного поля по высоте подчиняется линейному закону. Температура воздуха в атриуме изменяется вверх за счет нагрева воздуха у пола, как показано на рисунке 10. Вертикальный профиль температуры внутри помещения изменяется по формуле (2): $T = T_b + \gamma H_{1,2}$ (2)

где: T – температура на любой высоте, $°C$; T_b – температура пограничного слоя на полу, $°C$; γ – изменяющийся линейный коэффициент; H_1, H_2 – высота между приточным и вытяжным проемами, м.

Линейный коэффициент γ определяется из экспериментальных данных о T_b, T_{e1} и T_{e2} путем решения системы из 2-х линейных уравнений: $\begin{cases} T_{e1} = T_b + \gamma H_1 \\ T_{e2} = T_b + \gamma H_2 \end{cases}$

$\Rightarrow \gamma = \dfrac{T_{e1} - T_{e2}}{H_1 - H_2}$ $\Rightarrow T_b = T_{e1} - \gamma \cdot H_1$. Вывод имеется в диссертации.

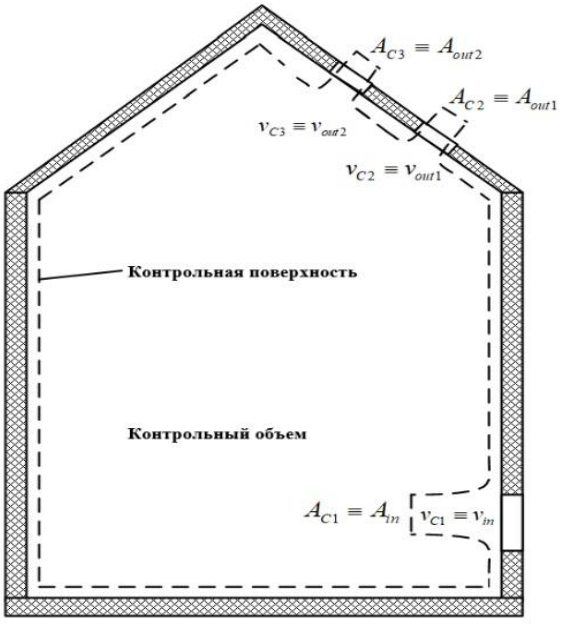


Рисунок 9 – Контрольный объем и контрольная поверхность

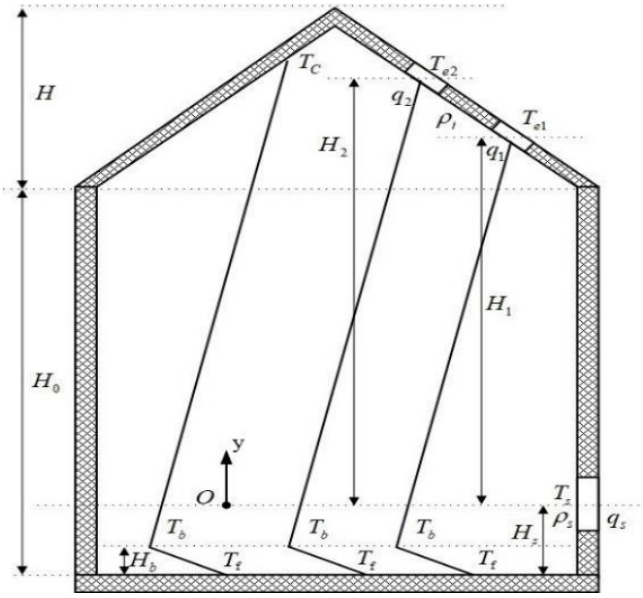


Рисунок 10 – Схема изменения температуры воздуха от пола T_f до покрытия T_c за счет излучения снаружи

Высота нижнего приточного проема принимается за базовый уровень, а начало координат выбирается в центре его. Давление воздуха внутри и снаружи помещения на любой высоте можно записать по формуле (3):

$$p_i(h) = p_{i0} - \int_0^h \rho_i g dh; \qquad p_o(h) = p_{o0} - \int_0^h \rho_o g dh \tag{3}$$

Разность давлений между наружным и внутренним воздухом на любой высоте представлена формулой (4): $\Delta p(h) = -\int_0^h (\rho_o - \rho_i) g dh - (p_{i0} - p_{o0})$ (4)

$\Delta p = p_i - p_o$ – это разница давлений внутри и снаружи здания на любой высоте h. За счет этой разницы воздух поступает снаружи внутрь. Используя формулу (1), предположим, что поток воздуха несжимаем, на нейтральной поверхности всегда существует положение, при котором давление внутри и снаружи одинаково: $p_i(h_n) = p_0(h_n)$

где: h_n – высота нейтральной поверхности, (м); g – ускорение свободного падения (м/с^2); $\rho_{o,}\rho_i$ – плотность воздуха снаружи и внутри, (кг/м^3), T_o – температура в нейтральной плоскости снаружи здания атриума, $°C$.

Поскольку $\frac{\rho_o - \rho_i}{\rho_i} \approx \frac{T_i - T_o}{T_o}$ и температура изменяется линейно $T_i(h) = T_b + \gamma h$.

Подставляя $T(h)$ в уравнение (4), получаем:

$$\Delta p(h) = -\Delta p_0 - \frac{\rho g}{T_o}\int_0^h (T_b - T_o + \gamma h) dh = -\Delta p_0 - \frac{\rho g}{T_o}\left[(T_b - T_o)h + 0{,}5\gamma h^2\right] \tag{5}$$

При $h = 0$; $\Delta p(0) = -\Delta p_0 < 0$. Наружный воздуха затягивается в здание как при естественной вентиляции.

На высоте проема H_1 и H_2 разница давления равна:

$$\Delta p_1 = -\Delta p_o - \frac{\rho g}{T_o}\left[(T_b - T_o)H_1 + 0{,}5\gamma H_1^2\right]; \ \Delta p_2 = -\Delta p_o - \frac{\rho g}{T_o}\left[(T_b - T_o)H_2 + 0{,}5\gamma H_2^2\right] \tag{6}$$

Применив уравнение Бернулли к потоку воздуха в любом проеме, получим:

$$p_o = p_i + \rho_i \frac{v_i^2}{2}; \ v_i = \sqrt{\frac{-2\Delta p}{\rho_i}}; \text{ Тогда: } q_i = C_d A_i v_i = C_d A_i \sqrt{\frac{-2\Delta p}{\rho_i}}$$

где: C_d – коэффициент потери скорости потока на приточных и вытяжных отверстиях. Обычно, $C_d = 0{,}6 \div 0{,}75$; A_i – площади приточного и вытяжного проемов; q_i – расход воздуха на i-том уровне.

В итоге расход воздуха на входе и на выходе составляет:

$$q_s = C_d A_1 \sqrt{\frac{-2\Delta p_o}{\rho}} \tag{7}$$

Например: $q_1 = C_d A_2 \sqrt{\frac{-2\Delta p_1}{\rho}} = C_d A_2 \sqrt{\frac{2\left[\Delta p_o + \rho g \beta\left[(T_b - T_o)H_1 + 0{,}5\gamma H_1^2\right]\right]}{\rho}}$ (8)

$$q_2 = C_d A_3 \sqrt{\frac{-2\Delta p_2}{\rho}} = C_d A_3 \sqrt{\frac{2\left[\Delta p_o + \rho g \beta \left[\left(T_b - T_o\right) H_2 + 0{,}5\gamma H_2^2\right]\right]}{\rho}} \qquad (9)$$

Обозначим, что $\beta = \frac{1}{T_o}$. Из уравнений (8) и (9) получаем уравнение (10). Общий расход воздуха через два приточных и два вытяжных проема:

$$q_s = q_1 + q_2 \qquad (10)$$

где: q_s – расход воздуха в приточных проемах, м^3/с; q_1, q_2 – расход воздуха в вытяжных проемах, м^3/с

Согласно первому закону термодинамики, было сделано несколько предположений: 1) приточный воздух распределяется по всей площади помещения без потерь; 2) температура поверхности потолка равна температуре воздуха около него и равна температуре вытяжного воздуха; 3) уравнения излучения линеаризованы из-за умеренной разницы температур.

Уравнение сохранения энергии: $E = E_1 + E_2$ (11)

где: $E_1 = \rho c_p q_1 \left(T_{e_1} - T_s\right)$ и $E_2 = \rho c_p q_2 \left(T_{e2} - T_s\right)$; T_{e1}, T_{e2} – температура в вытяжном отверстии, $°C$; T_s – температуре наружного воздуха на входных проемах ($T_o = T_s$), $°C$; ρ – плотность воздуха внутри здания (он предполагается несжимаемым), (кг/м^3); c_p – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К); q_1, q_2 – расход воздуха в вытяжном отверстии, м^3/с; E – тепловая энергия, полученная от источника тепла в помещении и от солнечного излучения, кВт.

Предположив, что распределение температуры линейно, мы имеем:

$$T_{e_1} = T_b + \gamma H_1; \qquad T_{e_2} = T_b + \gamma H_2 \qquad (12)$$

где: T_{e1}, T_{e2} – температура в вытяжном проеме; $°C$; T_b – температура пограничного слоя на полу, $°C$; γ – линейный коэффициент подъёма температуры; H_1, H_2 – высота между приточным и вытяжным вертикальными проемами, м.

Кроме того, на уровне пола происходит конвекционный теплообмен между воздухом, входящим в здание, и от пола. Эта энергия выражается следующим уравнением: $E_3 = \alpha_f \tau_e A_f \left(T_f - T_b\right)$ (13)

где: A_f – это площадь пола здания, м^2; T_b – температура пограничного слоя на полу, $°C$; T_f – температура поверхности верхнего слоя пола, $°C$; α_f – коэффициент конвективной теплоотдачи на полу Вт/(м^2·К); τ_e – коэффициент пропускания инфракрасной части энергетического спектра.

Энергия E_3 вычисляется следующим способом: когда здание достигает теплового равновесия, конвективный теплообмен уравновешивается тепловой энергией, создаваемой излучением от стеклянной крыши здания к полу.

E_3 – вычисляется по формуле: $E_3 = \int_0^H dE_3 = \frac{\alpha_r \tau_e LH}{2\sin\alpha}\left[T_b + \gamma H_o + \gamma\frac{H}{3}\right]$ (14)

где: L – ширина крыши, м; Н – высота крыши, м; H_o – высота от пола до карниза, м; α – угол наклона крыши; γ – изменяющийся линейный коэффициент; α_r – коэффициент радиационной теплоотдачи на полу Вт/(м^2.К).

Таким образом, мы имеем три энергетических уравнения следующего вида:

$$E = \rho c_p q_1\left(T_b + \gamma H_1 - T_s\right) + \rho c_p q_2\left(T_b + \gamma H_2 - T_s\right) \quad (15)$$

$$\frac{2\alpha_r \tau_e LH}{\sin\alpha}\left(T_b + \gamma H_o + \gamma\frac{H}{3}\right) = \alpha_f \tau_e A_f\left(T_f - T_b\right) \quad (16)$$

$$\rho c_p q_s \tau_e\left(T_b - T_s\right) = \alpha_f \tau_e A_f\left(T_f - T_b\right) \quad (17)$$

В первом уравнении (15) показано, что общая теплота в помещении переносится вентиляционным воздухом без потерь. Во втором уравнении (16) показано, что излучаемая теплота от остекления, поглощаемая полом, передается слою воздуха над полом. Третье уравнение (17) выражает то, что вентилируемый воздух получает тепловую энергию за счет конвекции у пола.

Приход энергии получается за счет прохождения солнечной энергии через стеклянную крышу и от источников тепла, уже имеющихся в здании, (люди, компьютеры, отопительные приборы, и т. д).

Подставив температуру пола T_b, температуру притока T_s и γ в формулу (15) можно получить общую энергию E, содержащуюся в здании. Зная общую энергию E из двух уравнений (17) и (18) мы можем получить расход воздуха в приточных и вытяжных проемах:

$$q_s = q_1 + q_2; \quad q_s = \frac{2\alpha_r LH}{\sin\alpha}\frac{1}{\rho c_p}\frac{T_b + \gamma H_o + \gamma\frac{H}{3}}{T_b - T_s} \quad (18)$$

Изменяя площади приточных и вытяжных отверстий по значению q_s мы можем выбрать их площадь, не прибегая к энергетическим расчетам

В целях облегчения расчетов была создана компьютерная прикладная программа «Программа для расчета расходов и температур воздуха на разных этажах зданий с атриумами с различными геометрическими параметрами на ранних стадиях проектирования». Результатами работы программы являются параметры расхода воздуха и температуры на любой высоте атриума.

Программа предназначена для расчета максимального расхода воздуха и температуры на любой высоте в зависимости от высоты, размера, формы и геометрии атриума на ранних этапах проектирования зданий с атриумами. Программой предусмотрен ввод данных в виде геометрических параметров атриума и температурных условий наружного воздуха. Блок-схема алгоритма показана на рисунке 11 а и б.

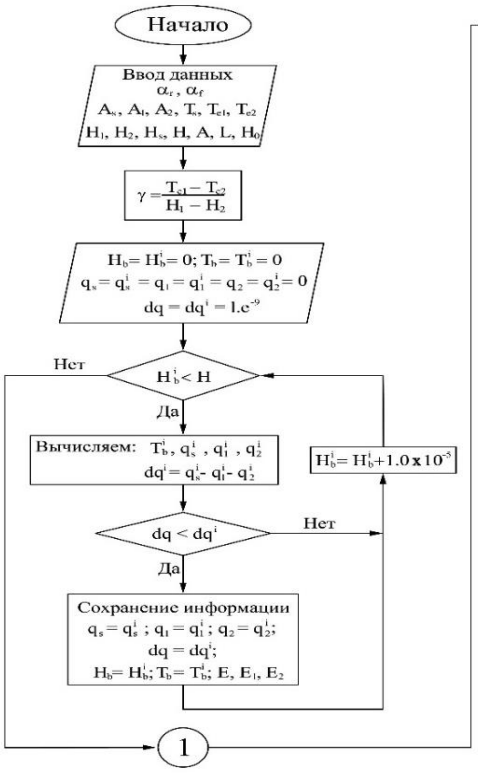


Рисунок 11 а – Блок схема первой стадии программы

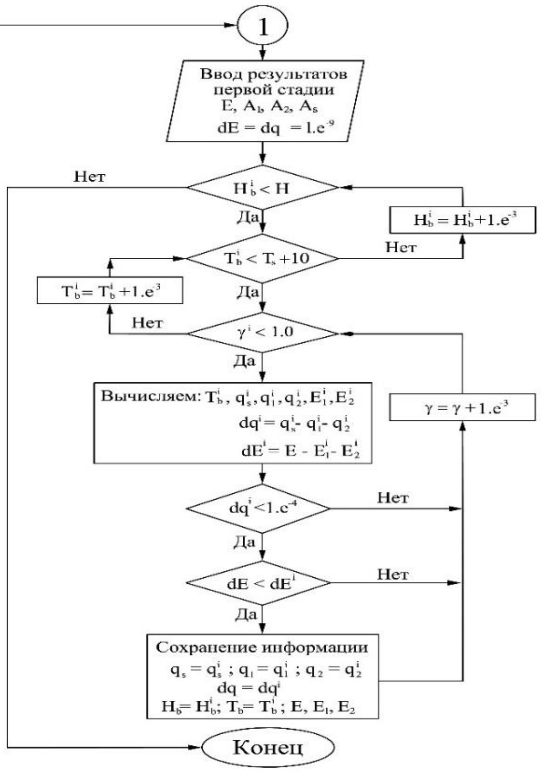


Рисунок 11 б – Блок-схема второй стадии разработки программы

Расчет примера атриума с вытяжными проемами

Размер каждого вытяжного отверстия в крыше составляет 1,2 м. по ширине, 1,4 м. по длине. На крыше имеется в общей сложности двенадцать окон в положении высоты H_1 и четыре окон в положении высоты H_2, которые полностью открываются. Здание имеет только один входной проем с многими дверьми, которые могут изменять площадь приточного проема.

Чтобы определить энергию E, которую получает здание, мы измеряли температуру на приточных и вытяжных проемах для случая, когда открываются двенадцать окон на высоте H_1 и четыре окна на высоте H_2: A_{H_1} = 1,4 × 1,2 × (12 отв.) = 20,16 м^2 (длина х ширина х количество вытяжных проемов в крыше); A_{H_2} = 1,4 × 1,2 × (4 отв.) = 6,72 м^2 (длина х ширина х количество вытяжных проемов в крыше), а площадь входа составляет: A_s = 2,1 × 1,3 × 3 = 8,19 м^2 (длина х ширина х количество дверей входа). Геометрические параметры измеряемого здания следующие: H_0 = 19,6 м; H = 5,0 м; H_1 = 22,88 м; H_2 = 20,84 м; L = 18,54 м. По прошествии достаточно длительного времени тепловые параметры в здании достигают стабильного состояния. Мы измеряем температуру на приточных отверстиях T_s = 29 ^{o}C; температура на вытяжных отверстиях на высоте H_1 равна: T_{e1} = 37,8 ^{o}C; температура на вытяжных отверстиях на высоте H_2 равна: T_{e2} = 36,9 ^{o}C. Поместив эти параметры в разработанную программу, мы можем вычислить полученную энергию E, от излучения и от факторов, которые выделяются в здании, связанных с человеком и оборудованием. Расчет показал, что полученная энергия равна: E = 118 кВт. Энергия E будет оставаться постоянной, так как площадь стеклянной крыши для этого здания постоянна как и энергия поступающая извне. После получения значения энергии E =

118 (кВт), мы изменяем площадь приточного отверстия. Она изменяется в следующих пределах: A_s = [2,1 x 1,3 x (1 отв.) до 2,1 x 1,3 x (21 отв.)] (м^2) и получаем следующие графики: (рис. 9 и рис. 10).

На рисунке 12 представлен пример зависимости расхода воздуха q_s от площади приточных отверстий, соответствующий условиям проведения натурного эксперимента и расчетной программы, учитывающей плоскую картину разреза атриума. Площадь вытяжных проемов, с одной стороны: A_{H_1} = 1,4 x 1,2 x (5 отв.) = 8,4 м^2; A_{H_2} = 1,4 x 1,2 x (3 отв.) = 5,04 м^2. Мы видим, что, когда вытяжные отверстия полностью закрыты, воздухообмена с внешней средой нет, расход воздуха равен нулю. Когда открываются приточные отверстия, поток воздуха (dq/dA) очень быстро увеличивается, но затем градиент потока воздуха dq/dA уменьшается по мере увеличения площади открывающихся приточных отверстий, а затем насыщается примерно при расходе 20 м^3/с.

На рисунке 13 представлена зависимость температуры поверхности пола от температуры пограничного слоя. Из-за поглощения тепла от излучения стеклянной крыши температура пограничного слоя воздуха у пола всегда выше температуры поверхности пола.

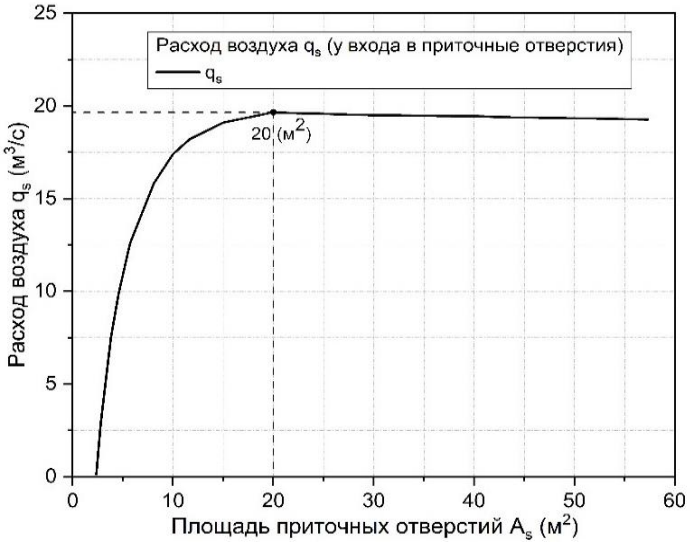


Рисунок 12 – Зависимость расхода воздуха от площади приточных проемов при постоянной площади вытяжных проемов A_{H_1} = 1,4 x 1,2 x (5 отв.) = 8,4 м^2; A_{H_2} = 1,4 x 1,2 x (3 отв.) = 5,04 м^2

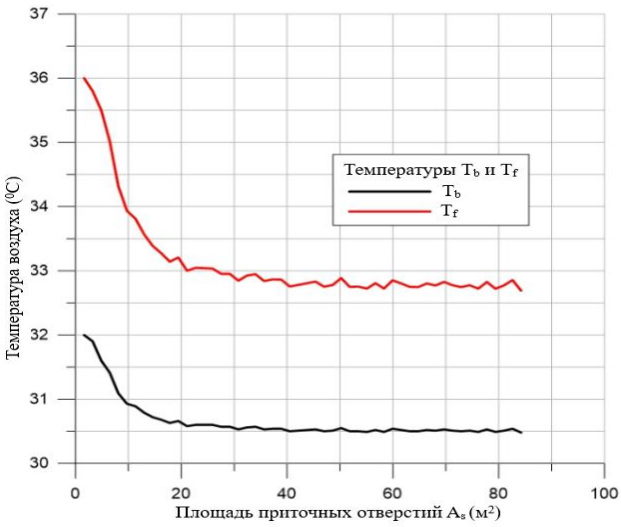


Рисунок 13 – Зависимость температуры поверхности пола T_f и температуры пограничного слоя T_b от площади приточных проемов

На рисунке 14 представлена температурная стратификация на разных высотах при изменении площади приточных проемов. Мы видим, что по мере постепенного увеличения площади приточных отверстий коэффициент γ постепенно уменьшается и зависит от параметров: H, T, T_S. При закрытых дверях здание представляет собой почти закрытую коробку. Тепло, от излучения, нагревает воздух в здании. Маленькая площадь приточных отверстий приводит к более высокой температуре пограничного

слоя. По мере увеличения площади притока, большее количество воздуха внутри здания обменивается с наружным воздухом. Это приводит к уменьшению температур на разных высотах здания, что приводит к уменьшению коэффициента $\gamma = d(T_i - T_s)/dH$. При увеличении площади приточных проемов с 5 до 40 м^2, температура на высоте 5 этажа уменьшается на 6 ^{o}C. В данном примере максимальная площадь притока A_s = 8,19 м^2. Это значит, что температура на 5-м этаже атриума (14,4 м) уменьшается всего на 4,4 ^{o}C.

На рисунке 15 представлен пример зависимости расхода воздуха от площади вытяжных отверстий при изменении площади вытяжных проемов от A_{H_1} = [1,4 x 1,2 x (1 отв.) → 1,4 x 1,2 x (18 отв.)] (м^2) и постоянной (неизменной) площади вытяжных отверстий A_{H_2} = 1,4 x 1,2 x (1 отв.) = 1,68 (м^2), соответствующий условиям проведения натурного эксперимента и расчетной программы, учитывающей площадь приточного проемов A_s = 8,19 м^2. Мы видим, что при неизменных площадях приточных проемов A_s и вытяжных проемов A_2 и увеличении площади вытяжного отверстия A_1, расход воздуха (dq_1/dA) увеличивается очень быстро. Однако затем градиент воздушного потока dq_1/dA уменьшается по мере увеличения площади открывающихся вытяжных проемов A_1 и затем насыщается примерно при расходе 15 м^3/с, при этом расход воздуха остается, по существу, постоянным.

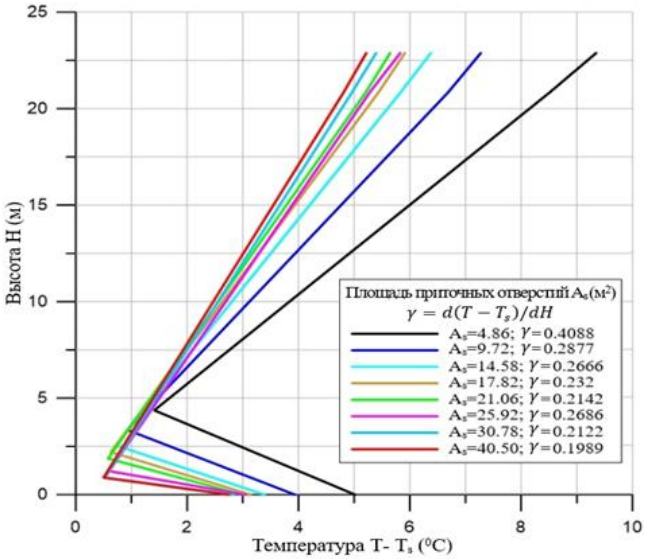


Рисунок 14 – Зависимость температурной стратификации от высоты над уровнем пола при различных площадях приточных проемов: T – температура воздуха на любой высоте, T_s – температура воздуха у приточных проемов

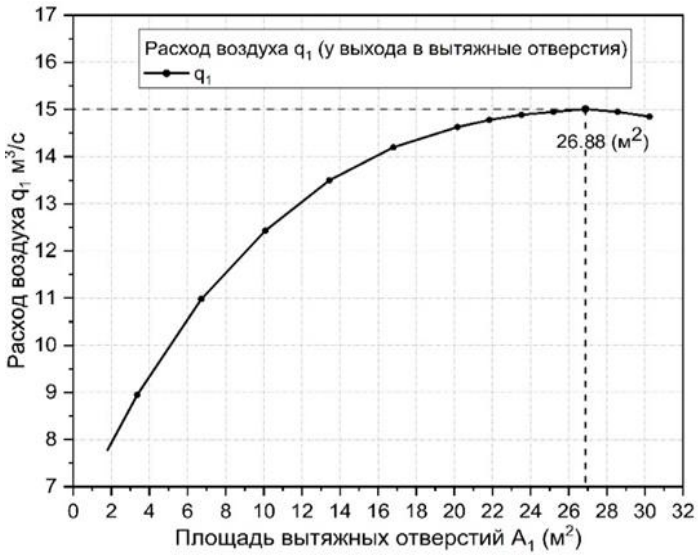


Рисунок 15 – Зависимость расхода воздуха от площади вытяжных проемов при изменении площади вытяжных проемов от A_{H_1} = [1,4 x 1,2 x (1 отв.) = 1,68 до 1,4 x 1,2 x (18 отв.) = 30,24] (м^2) и постоянной площади вытяжных проемов A_{H_2} = 1,4 x 1,2 x (1 отв.) = 1,68 (м^2)

По прошествии достаточно длительного времени тепловые параметры в здании достигают стабильного состояния. Мы измеряем температуру на приточных отверстиях T_s = 29 ^{o}C; температура на вытяжных отверстиях на высоте H_1 равна: T_{e1} =

37,8 °C; температура на вытяжных отверстиях на высоте H_2 равна: T_{e2} = 36,9 °C. Поместив эти параметры в разработанную программу, мы можем вычислить полученную энергию E, от излучения и от факторов, которые выделяются в здании, связанных с человеком и оборудованием, Расчет показал, что полученная энергия равна: E = 125 кВт. В данном случае, после получения значения энергии E = 125 (кВт), мы изменяем площадь вытяжного отверстия. Она изменяется в следующих пределах: A_{H_1} = [1,4 x 1,2 x (1 отв.) = 1,68 до 1,4 x 1,2 x (18 отв.) = 30,24] ($м^2$) и мы получаем следующий график: по рисунку 12 видно, что при площади более 20 $м^2$ увеличивать вытяжные проемы не имеет смысла. В нашем примере эта площадь составит 26,88 $м^2$, что больше требуемого. При этом расход воздуха составит q_1 = 15 $м^3/с$. Это является максимальным расходом воздуха, при котором температура на 5 этаже атриума будет около 35 °C. Таким образом, площадь приточных проемов является более важной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В данном исследовании разработан новый метод определения расхода воздуха, обусловленного тягой (гравитационным давлением) в атриуме с несколькими приточными проемами с помощью математических формул. Это было оценено по данным программной интерпретации CFD гидродинамического моделирования. В итоге было построено полуэмпирическое уравнение модели. Затем это уравнение было использовано для получения наибольшего расхода воздуха и определения оптимальных вариантов проемов. Был определен максимальный расход и рассчитана оптимальная площадь приточных и вытяжных отверстий в атриуме УЛК-МГСУ. Она составляет соответственно 20 $м^2$ и 26,88 $м^2$.

2. Результаты и выводы данного исследования помогут архитекторам и инженерам принимать обоснованные решения о предполагаемых тепловых средах и воздушных потоках. Они смогут выбрать оптимальные места расположения проемов, их размеры и площадь приточных и вытяжных проемов в своих проектах. Кроме того, эти результаты помогут сократить время на оценку новых случаев, прогнозирования комфорта в помещениях, оценить эффективность вентиляции, сделать выбор оптимальных конструкций проемов в здании и снизить энергопотребление в системах механической вентиляции.

3. Если вытяжные проемы в атриуме УЛК предназначены только для дымоудаления при пожаре, то в обычных условиях они всегда закрыты. При удалении воздуха из атриума только за счет работы системы искусственной вентиляции потребляется значительное количество электроэнергии. Поэтому для экономии энергии целесообразно проектировать вытяжные проемы в кровле, которые служили бы для естественной вентиляции и дымоудаления одновременно. Площадь приточных проемов (двери) может регулироваться путем устройства воздухопроницаемых решеток, которые при открытых дверях летом не препятствуют притоку воздуха, но ограничивают его доступ в здание.

4. При максимально возможном открывании приточных и вытяжных проемов (20 $м^2$ и 26,88 $м^2$) достигается насыщение притока и вытяжки воздуха. Можно было бы ограничиться даже меньшей площадью открытых проемов, восполнив недостающий

расход воздуха за счёт механической вентиляции. Возможно, что для экономии энергии зимой это имеет смысл. Летом проемы могут быть открытка максимально.

5. Расчет энергии, требуемой для поддержания температуры воздуха в атриуме на 5-м этаже, которая будет меньше, чем температура на выходе (у вытяжных проемов) на 2 °C (37-35 °C), показывает, что эта энергия, создаваемая за счет механической вентиляции, равна E = 125 кВт. Если открыть приточные и вытяжные проемы, энергия, необходимая для обеспечения таких показателей только за счет открывания проемов составит 118 кВт. Таким образом получаем экономию энергии 7 кВт т. е 5,6 % за день. За жаркий период в течение 1 месяца можно сэкономить 21 кВт электроэнергии. В южных районах России эта энергия может доходить до 60-70 кВт, что говорит об энергетической эффективности атриума в здании.

РЕКОМЕНДАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ ТЕМЫ

На основании полученных результатов исследований, приведенных в данной работе, можно говорить, что перспективными направлениями дальнейших исследований по созданию комплексной системы проектирования атриумов для обеспечения энергосбережения за счет архитектурно-строительных решений атриумов зданий являются:

1. В дальнейших исследованиях необходимо рассмотреть возможности применения систем предварительного охлаждения, испарительного охлаждения, интегрированных с естественной вентиляцией, и контроля влажности в условиях жаркого и влажного климата;
2. Дальнейшие исследования могут быть направлены для изучения влияния приточных и вытяжных проемов на здания с различными типами крыш, включая крыши с мониторами, пилообразными крышами и зенитными фонарями с различными геометрическими характеристиками, такими как ширина, высота и материалы, ориентация.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий:

1. Фам Тхи Хонг Тхам, Алексей Кириллович Соловьев, Сергей Сергеевич Корнеев. Натурное исследование влияния проемов на тепловые характеристики при естественном охлаждения зданий с атриумами. // Вестник МГСУ. 2022. №2 (17). С. 149–158. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.2.149-158
2. Фам Тхи Хонг Тхам, Зыонг Де Тай, Алексей Кириллович Соловьев. Метод расчета геометрических параметров конструкций атриума здания с учетом комфорта температурно-воздушного режима. // Вестник МГСУ. 2024. №3 (19). С. 349–357. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.349-357

3. Соловьев А. К., Фам Т.Х.Т. Голографические оптические элементы. Преимущества и недостатки для эффективного освещения, солнцезащиты и фотоэлектрического энергообеспечения зданий. // Светотехника. 2022. №1. С. 9–14.

Статьи, опубликованные в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus, Web of Science и др.:

4. Y.Q.N., Sa Nguyen-Tan, Hong-Tham T. Pham, Ai Manh-Thuy, Trieu Huynh-Nhat, “Performance of a Solar Chimney for Cooling Building Façades under Different Heat Source Distributions in the Air Channel”, International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology, Vol. 11, №. 1, Pp. 158–164, 2021. DOI:10.18517/ijaseit.11.1.12666.

5. Tue Nguyen Duy and Hong-Tham T. Pham. CFD Based Investigation on the Performance of Solar Chimney for Room Natural Ventilation / Tue Nguyen Duy and Hong-Tham T. Pham // AIP Conference Proceedings, 2021. Vol. 2420, – P. 020027. DOI: 10.1063/5.0068461.

6. Tue Nguyen Duy, Hong-Tham T. Pham, Alexei K. Solovyov. Impact of angle of solar chimney inclination on natural ventilation – A study based on CFD / Tue Nguyen Duy, Hong-Tham T. Pham, Alexei K. Solovyov // AIP Conference Proceedings, 2023. Vol. 2497, – P. 030004. DOI: 10.1063/5.0104380.

7. Hong-Tham T. Pham. Thermal Comfort and Energy Efficiency on Air-Conditioned University Classrooms by means of CFD-Simulation / Hong-Tham T. Pham, Thuan T. Le, Phuong Ha, Alexei K. Solovyov // E3S Web of Conferences, 2023. – P. 04001. – DOI 10.1051/e3sconf/202341004001

8. Alexei K. Solovyov and Hong-Tham T. Pham. Holographic Optical Elements: Advantages and Disadvantages for Efficient Lighting, Sun Protection and Photovoltaic Power supply of Buildings / Alexei K. Solovyov and Hong-Tham T. Pham // Light & Engineering. – 2021. – Vol. 29(5). – Pp. 10–15. – DOI 10.33383/2021-076