ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Соловьев Алексей Кириллович

Москва – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗДАНИЙ С АТРИУМАМИ И ИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ 14
1.1 Обзор архитектурно-строительных решений атриумов 14
1.1.1 История развития атриумных пространств 14
1.1.2 Классификация зданий с атриумами 23
1.1.3 Отечественный и зарубежный опыт строительства зданий с атриумами 26
1.2 Принципы проектирования атриумных пространств 35
1.2.1 Нормативная база по проектированию атриумных пространств 36
1.2.2 Факторы, влияющие на проектирование атриумных пространств. 37
1.2.3 Климатизация атриумов с помощью кондиционеров и вентиляции 41
1.2.4 Освещение атриумов 47
1.2.5 Прогнозирование уровня комфорта в атриуме 48
1.3 Влияние атриума на внутреннюю среду смежных помещений 54
1.3.1. Тепловой комфорт в атриуме и в смежных помещениях 54
1.3.2. Влияние озеленения атриумов на качество воздушной среды 55
1.4 Энергоэффективность атриумов 58
1.5 Выводы по главе 1 62
ГЛАВА 2. НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВОЗДУШНЫХ ПАРАМЕТРОВ В АТРИУМЕ ЗДАНИЯ УЛК-МГСУ В ГОРОДЕ МОСКВА В ЖАРКИЙ ЛЕТНИЙ ПЕРИОД 63
2.1 Общая характеристика климатических условий в городе Москве 63
2.2 Исследования тепловых и воздушных характеристик атриумов и прилегающих помещений, опубликованные в зарубежной литературе 66
2.3 Натурные экспериментальные исследования температурно-воздушного режима в здании УЛК-МГСУ 74
2.3.1 Цели, задачи и планирование экспериментального исследования .. 74

2.3.2 Проведение натурных исследований в здании учебно-лабораторного корпуса УЛК -МГСУ. 76
2.3.3 Методы анализа натурных исследований 84
2.3.4 Анализ результатов 86
2.4 Выводы по главе 2 92
ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-ВОЗДУШНЫХ ПАРАМЕТРОВ В АТРИУМЕ ЗДАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА CFD 94
3.1 Выбор теоретического метода для прогнозирования температурно-воздушных параметров 94
3.2 Описание программы CFD 98
3.3 Результаты моделирования и сравнение их с экспериментом 101
3.4 Выводы по главе 3 110
ГЛАВА 4. ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АТРИУМА И ИХ ВЛИЯНИЯ НА СОЗДАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-ВОЗДУШНЫХ ПАРАМЕТРОВ В АТРИУМЕ 112
4.1 Теоретическая модель для расчета расхода воздуха при использовании заданных параметров вытяжных проемов в зданиях с атриумам 112
4.2 Разработка алгоритма расчета расхода воздуха и температуры воздуха на разных этажах атриумов зданий 126
4.3 Разработка блок-схемы для расчетной компьютерной программы.... 128
4.4 Пример расчета с использованием предлагаемой методики, проверочные эксперименты. Предложения по созданию геометрических параметров атриумов (объем, ширина и высота приточных и вытяжных проемов) 130
4.5 Выводы по главе 4 139
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 142
РЕКОМЕНДАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ... 144
ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ 145
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 147

ПРИЛОЖЕНИЕ А. СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ.....159
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ..... 162
ПРИЛОЖЕНИЕ В. КОДЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ПРИКЛАДНОЙ ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА РАСХОДА И ТЕМПЕРАТУРА ВОЗДУХА С++..... 163

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы атриумы получили широкое распространение в современной архитектуре. Используемые для обеспечения пространства и освещения, они стали эффективным элементом зданий для энергосбережения вентиляции и результате, это привело к популярности атриумов во многих крупных торговых центрах, отелях, образовательных зданиях, коммерческих зданиях и во многих общественных зданиях [66]. Преимущества атриума и некоторые противоречия физики их среды делают проектирование атриумов сложным процессом. Проблема связана с недостатком данных, чтобы в полной мере использовать естественную вентиляцию. При проектировании атриумов необходимо учитывать различные аспекты, такие как архитектура, функциональность, экономика и окружающая среда, строительные и психологические аспекты. Основные вопросы должны быть рассмотрены на ранней стадии проектирования. Кроме того, атриумы позволяют значительно экономить энергию и обеспечивать необходимый тепловой комфорт в помещениях за счет естественной вентиляции без использования механического оборудования, что снижает потребность в кондиционировании воздуха [52]. Особенно мало исследований, посвященных тепловым характеристикам больших остекленных пространств, где важны такие факторы, как тепловая стратификация и максимальная температура. Несмотря на множество преимуществ атриумов, существуют и некоторые недостатки, которые приводят к повышению энергопотребления здания [73] из-за чрезмерного поступления солнечного тепла в летнее дневное время и теплопотерь в холодное время года от больших остекленных стен и постоянной стратификации воздуха [44, 88]. Кроме того, небольшие перепады температур между внешними и внутренними помещениями могут нарушить процесс естественной вентиляции. Тем не менее, по оценкам специалистов, энергопотребление в зданиях при правильном решений конструкций такого типа в некоторых регионах Европы составляет менее 150 кВт-ч/м^2/год [112]. На сегодняшний день энергетический и экологический потенциал атриумных зданий использован не в полной мере. Наличие атриума в здании часто

является роскошью, поскольку атриумы не считаются пассивным теплорегулирующим элементом здания и требуют кондиционирования воздуха для обеспечения теплового комфорта пространства [50]. При проектировании систем микроклимата атриума, как правило, возникают следующие проблемы: большие теплопоступления от солнечной радиации и в частных случаях от оборудования; организация воздухообмена для помещения большой площади; контроль микроклиматических условий, в зонах прилегающих к общему пространству атриума.

Однако по-прежнему проводилось мало исследований, касающихся влияния параметров атриумов на их тепловые и вентиляционные характеристики [46, 89]. Среди них экспериментальное, теоретическое и численное моделирование. Однако предлагаемые модели и методы не являются универсальными из-за отсутствия знаний о том, как различные параметры здания и конструкции атриума влияют на его тепловой режим, а при разработке проектов строительства требуются дополнительные исследования, на основе которых можно получить наиболее энергоэффективные решения. с высокоэффективными техническими решениями [97, 110]. Сложность проектирования естественной вентиляции атриума и неадекватность средств моделирования могут привести к неточному прогнозированию теплового режима в атриумах. Поэтому различные условия моделирования затрудняют получение корректных выводов, касающихся всех параметров, влияющих на тепловой режим атриума, его эффективных расчетных параметров и их применения для улучшения тепловых характеристик и снижения энергопотребления [69, 85]. К таким параметрам относятся различные конфигурации и компоненты атриумов, такие как геометрия атриума, характеристики приточных и вытяжных отверстий, свойства кровли, материалы и характеристики остекления [74].

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.

Внедрение результатов исследования

Результаты работы использованы в НИИСФ РААСН при разработке Изменения №2 к СП 310.1325800.2017 «Устройства солнцезащитные зданий.

Правила проектирования» в части проектирования проемов в кровле атриумов для устройства солнцезащиты, и в учебном процессе кафедры АСПиФС НИУ МГСУ.

Ограничение области исследования

Область исследований ограничивается исследованиями температурно-воздушного режима зданий с атриумами внутреннего типа с остекленным покрытием, высотой до семи этажей в температурных условиях жаркого летного периода. Область исследований не касается жилых и промышленных зданий и ограничивается общественными зданиями и гостиницами.

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.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗДАНИЙ С АТРИУМАМИ И ИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

1.1 Обзор архитектурно-строительных решений атриумов

Термин «атриум» происходит от латинского языка «атрий», что означает «закопченный», «черный», то есть обозначает закопченное помещение, в котором расположена печь и соответствующая кухня. Хотя первые записи об атриях были найдены в Месопотамии, своим развитием они обязаны Древней Греции и Риму. С течением времени облик и использование атриумного пространства изменились, и теперь, спустя многие годы развития, атриумы стали открытым общественным пространством внутри здания. Атриум и внутренний дворик служат центральной частью здания, обеспечивая циркуляцию воздуха и связь между различными частями здания. При проектировании новых зданий или реконструкции существующих, часто применяются атриумы с естественной вентиляцией, что является признаком так называемого «пассивного дизайна» [28]. «Пассивный дизайн» представляет собой один из методов строительства, экономичный и устойчивый с точки зрения энергопотребления, который может быть решением для современных зданий, ограничивающим энергопотребление и снижающим воздействие на окружающую среду.

1.1.1 История развития атриумных пространств

В данном разделе сначала рассматривается развитие атриумных зданий в мире с исторической и архитектурной точек зрения, включая их традиционное происхождение и современные интерпретации формы атриума. Далее следует конкретный обзор атриумных зданий в мире. Основная цель – подчеркнуть контекст исследования и кратко обсудить популярность атриумной формы и её экологические последствия, а также стратегии пассивного дизайна, применимые к Москве. В заключение, в этом разделе представлен обзор тенденций проведения исследований в области атриумов.

Первые прототипы подобных пространств появились в Месопотамии, где в XII веке до н. э. появились жилые дома с центральными внутренними двориками. Форма таких двориков принималась по аналогии с первобытными временами, когда вокруг очага располагались жилища, чему свидетельствует археологические остатки дворика в доме в городе Ур (Рисунок 1.1) [14].

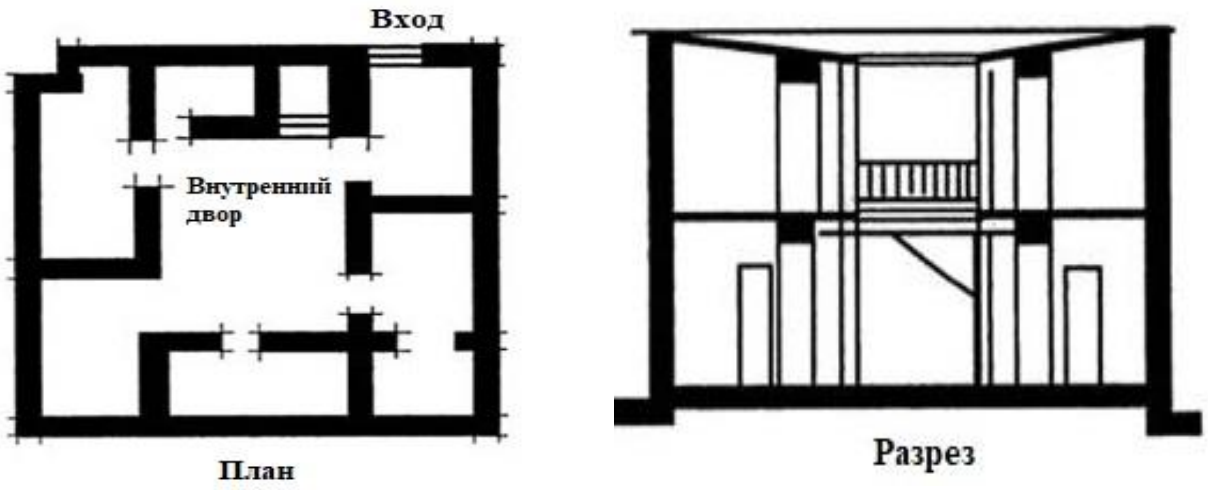


Рисунок 1.1 – План и разрез дома в г. Ур

Древняя Греция

Так же, как и в жилых домах Месопотамии, в Древней Греции в первых атриях располагался очаг, затем его сменил бассейн для сбора дождевой воды. Атриум был необходим не только для улучшения микроклимата, но и для социализации жителей дома. В жарких районах такие дворики выполняли двойную функцию, они обеспечивали естественной вентиляцией и освещением помещения жилища.

В III веке до н. э. в Древнем Риме складывается классическая концепция атриума. Он представляет собой центральную часть жилого дома с проемом в крыше прямоугольной формы, вокруг которого компоновались помещения жилища (Рисунок 1.2)**.**

Сначала в центре римского атриума находился очаг (в крыше устраивалась отверстие для выхода дыма), затем – прямоугольный неглубокий бассейн. который назывался имплювий, над которым оставлялось отверстие для стока дождевой воды – комплювиум.

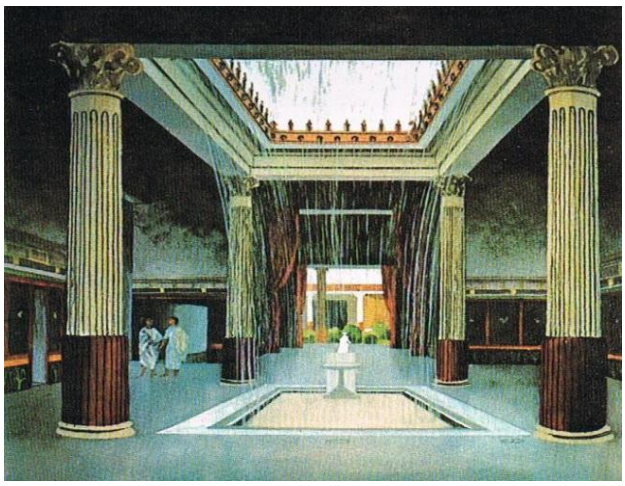


Рисунок 1.2 – Древнеримский атриум

Атриум tetrastylum или четырехколонный. Как следует из названия, крыша этого вида атриума опиралась на четыре колонны, которые располагались по углам комплювиума (Рисунок 1.3). Такого рода атриумы имели большие размеры, в этом случае балки малого сечения ни по своей длине, ни по прочности не годились для поддержания крыши [35].



Рисунок 1.3 – Модель четырехколонного атриума

Центральное место в атриуме занимал бассейн для сбора дождевой воды (имплювий), над которым располагался четырехскатный проем в крыше (комплювий). Очаг имел такое расположение, чтобы во время непогоды в него не попадали осадки, а дым мог беспрепятственно вытягиваться наружу. Также в атриуме имелась ниша, в которой располагалась кровать матери семейства. Это ложе находилось напротив дверей в дом (lectus adversus – «ложе против дверей»). В более поздние периоды эта ниша утратила свою первоначальную функцию, и стала иметь символический характер, ее оставили в атриуме как знак святости

брака. Так же во внутреннем дворике хранились сундук с семейными реликвиями, важные документы хозяина дома, семейный архив, бюсты предков, а также изображения духов – покровителей дома. Затем атриум превратился в общественную, приемную часть дома. Здесь принимали гостей, и клиентов.

Наибольшее сходство с пространственными решениями современных атриумов обнаруживается во внутренних дворах средневековых королевских резиденций и итальянских палаццо XV – XVIII веков.

Палаццо – от латинского palatium – тип городского дворца-особняка, фасад которого выходил на улицу, а композиционным центром являлся внутренний двор, обнесенный арочной колоннадой (Рисунок 1.4). Такие особняки были чаще всего трехэтажными, реже двух или четырехэтажными. На первом этаже располагались комнаты прислуги, кухня, прачечная, на втором – помещения общественного характера, в которых принимали гостей, на третьем жилые комнаты хозяев дома.

Основной функцией расположенного внутри палаццо открытого внутреннего двора было освещение помещений особняка естественным светом.



Рисунок 1.4 – Палаццо Фарнезе. Рим

Со временем атриумные пространства дошли и до Урала. Подобно древнеримским домусам и итальянским палаццо внутренние дворики устраивались в уральском народном жилище (Рисунок 1.5). Их основная функция заключалась в отделении жилой части дома от хозяйственной, и двор мог быть, как крытым, так и открытым [41]. Крытые дворы таких жилищ могли иметь несколько ярусов, например, в Северном Прикамье, они двухъярусные, на Среднем Урале доминировали одноярусные.



Рисунок 1.5 – Уральское народное жилище

Внутренний дворик в уральском народном жилище выполнял функции освещения жилого дома с одной стороны и образование своеобразной буферной зоны между домом и хозяйственными надворными постройками, с другой. Правда, эта буферная зона была скорее функциональной, чем для обеспечения комфорта.

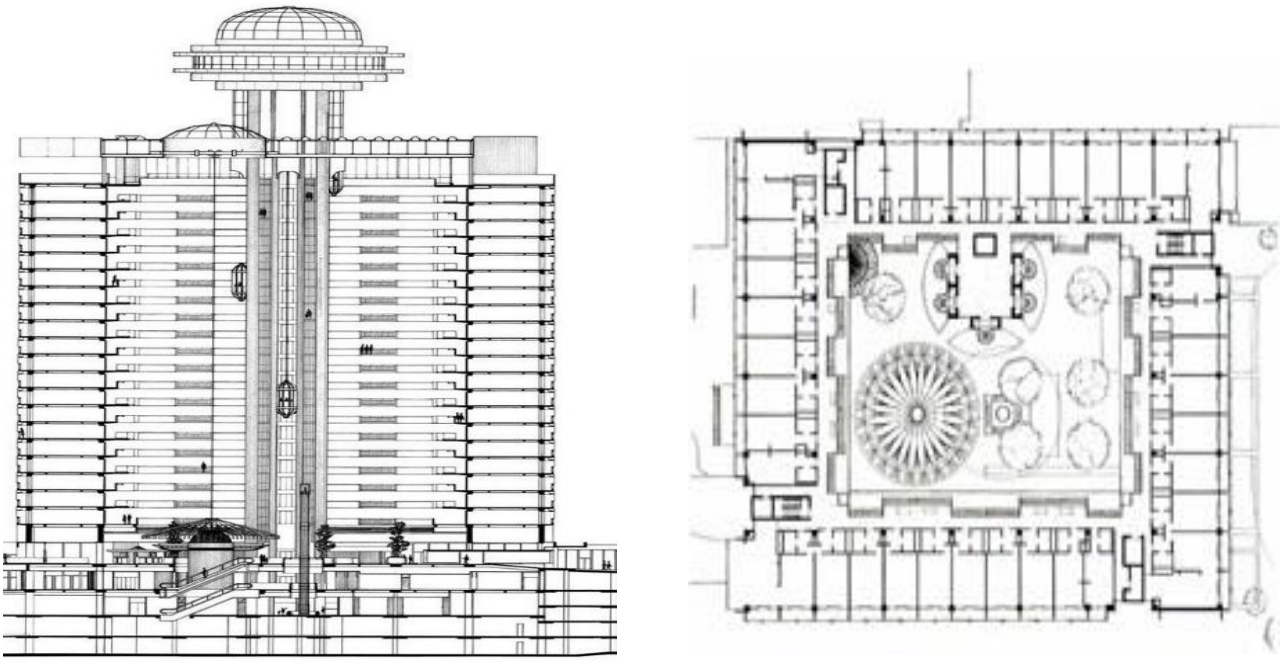
В современной архитектуре атриумы появились только в конце 1950-х – начале 60-х годов. Они часто имеют несколько этажей и имеют остекленную крышу или большие окна и часто расположены непосредственно за главными входными дверями (в вестибюле). Атриум в высотном здании – значительное по размеру многоуровневое пространство, объединяющее в себе два или более этажей, расположенное в структуре многоэтажного здания, развитое в вертикальном направлении и разделенное с внешней средой, ограждающей конструкцией, пропускающей естественный свет (Рисунок 1.6) [19].



Рисунок 1.6 – Пример атриума в высотном здании

Первыми зданиями, которые были влияли в этот новый период на строительство атриумных зданий, стали отель Хаятт Ридженси в Атланте (США) Эдвардс и Джон Портман и штаб-квартира Фонда Форда в Нью-Йорке, арх. Роше и Динкелоо.

Они были первым, и кто применил такую конструкцию атриума для высотных зданий. В отеле Хаятт Ридженси есть внутренний атриум во всю высоту здания (Рисунок 1.7). Здание освещается как световым люком в верхней части, так и внутренним остеклением. В пространстве атриума используется обширный ландшафтный дизайн с водными объектами, растениями и птицами, отражающий природу курорта, где отель был построен. Этот пример произвел революцию в строительстве отелей и повлиял на проектирование последующих гостиниц. Концепция атриума в отеле дает возможность создать защищенный, но великолепный интерьер отеля со стимулирующими и динамичными видами. Успех этого атриум-отеля впоследствии стал стандартом престижности для всех гостиниц класса люкс (Рисунок 1.8) [55].



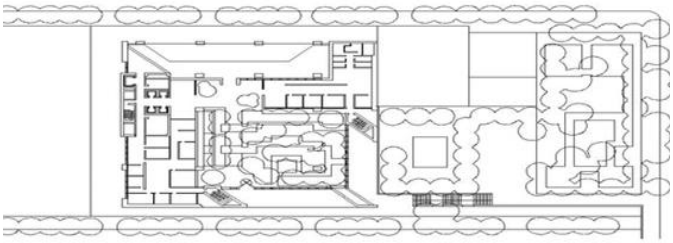
Разрез План

Рисунок 1.7 – Отель «Хаятт Ридженси» (1967 г., арх. Д. Портман, г. Атланта)
План и разрез атриума отеля «Хаятт Ридженси»

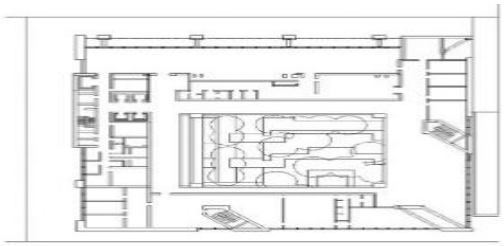


Рисунок 1.8 – Атриум отеля Хаятт Ридженси в Атланте. Интерьер; Фото: Беднара (1986)

Наоборот, функция атриума в офисных зданиях может быть более открытой и сочетаться с городским окружением. Например, офисное здание Фонда Форда имеет атриум в конце плана этажа, выступая в качестве перехода между частным миром здания и окружающей средой, в данном случае общественным пространством, зданием и городской средой, в данном случае, общественным парком, ведущим в город (Рисунок 1.9).



План первого этажа



План последний этаж



Разрез

Рисунок 1.9 – План первого этажа, план последнего этажа и разрез атриума, Штаб-квартира Фонда Форда в Нью-Йорке

Важно отметить, что в отличие от экологических преимуществ традиционных атриумов, возрождение нового атриума в настоящее время пользуется спросом в первую очередь за его упорядочивающее пространство качество и динамическое выражение. Таким образом, это приводит к определению нового атриума как центрального, внутреннего, освещенного дневным светом пространства, организующего здание. Экологические преимущества атриума были рассмотрены только при его использовании в умеренном климате в 1970-х и начале 1980-х годов как ответ на высокий уровень энергопотребления в строительстве после нефтяного кризиса [55].

Суть концепции «буферного мышления» заключалась в том, чтобы атриум, ориентированный в наиболее благоприятную с точки зрения солнечных лучей и господствующих ветров сторону, служил буферной зоной между наружным и внутренним пространствами за счет содержания большого количества воздушных масс [55].

Разработка концепции «буферного мышления», привела к внедрению в архитектуре принципа двойного ограждения. Этот принцип в свою очередь подразделяется на типы регулирования микроклимата: согревающий, охлаждающий и трансформируемый, отсюда и появились соответствующие типы атриумов. «Буферное мышления», требует от пространства атриумов целого ряда существенных для жизнедеятельности человека и эксплуатации зданий функций: повышение естественной освещенности, улучшение воздухообмена, роль климатического буфера; повышение тепловой эффективности зданий, «солнечное» отопление и охлаждение зачет вентиляции.

В конце XX века с увеличением количества зданий с атриумами, особенно в нежилых зданиях, повышалась потребность в системах вентиляции для обеспечения высокого качества воздуха и теплового комфорта жителей. Это привело к увеличенному использованию инженерных систем и, следовательно, к большому потреблению энергии. В 1970-х и в начале 1980-х годов, экологические преимущества атриума стали рассматриваться заново. Вопросы экологии и энергосбережения стали важным вопросом при проектировании зданий. Таким

образом, экологические преимущества атриума вновь стали продвигаться в качестве энергосберегающего элемента конструкции. Концепция высокотехнологичных, и зависимых от механической вентиляции атриумов была заменена на более пассивные атриумы с низким энергопотреблением. Традиционные функции атриума – естественное освещение, пассивное отопление и охлаждение используются вместе с его пространственным организующим качеством. Предполагается, что энергетические преимущества атриумов в определенной степени автоматически снижают общее энергопотребление в зданиях. Однако это заблуждение, если атриум не спроектирован и не понят должным образом [55]. Прямое применение решения атриумов для более жаркого климата - один из примеров, который необходимо изучить.

Атриум становится «промежуточным пространством, без кондиционера, с естественной вентиляцией и естественным освещением, скорее выборочным по отношению к внешнему климату, чем исключительным» [55]. Это определение можно расширить, включив в него зимние сады, «которые действуют как промежуточное пространство между внешней средой и более контролируемой внутренней средой» [11]. Промежуточные пространства, определенные выше, которые также способствуют поступлению полезного солнечного тепла, были названы «солнечными пространствами». Таким образом, использование атриумов в качестве буферных зон становится все более привычной идеей.

Подытожив, можно выделить три основаньях этапа развития атриумных пространств:

- первый (XII в. до н. э. - V в. н. э.). – формирование идеи атриума и принципа его пространственной организации.
- второй (XIX в.). – возникновение технической возможности возведения конструкций из стекла и металла, а также формирование атриума, как линейного, вертикально развитого пространства.
- третий (XX в. - начало XXI в.). – применение атриумов при строительстве многоэтажных зданий, возникновение концепции «буферного мышления» и ее активное использование при проектировании.

1.1.2 Классификация зданий с атриумами

Первая ступень типологии и классификация атриумов сформировалась еще в III в до н. э (Рисунок 1.10). Древнеримский архитектор Витрувий выделял 5 типов атриумов, которые были рассмотрены мной ранее. Эти типы послужили основой для формирования более развитой классификации атриумных пространств [18].



Рисунок 1.10 – Схема классификации атриумных зданий

По форме атриумы подразделяются на (Рисунок 1.11) [5]:

а) одностенный атриум, по типу оранжереи;

б) двухстенный атриум;

в) трехстенный атриум;

г) четытрехстенный атриум;

д) линейный атриум.

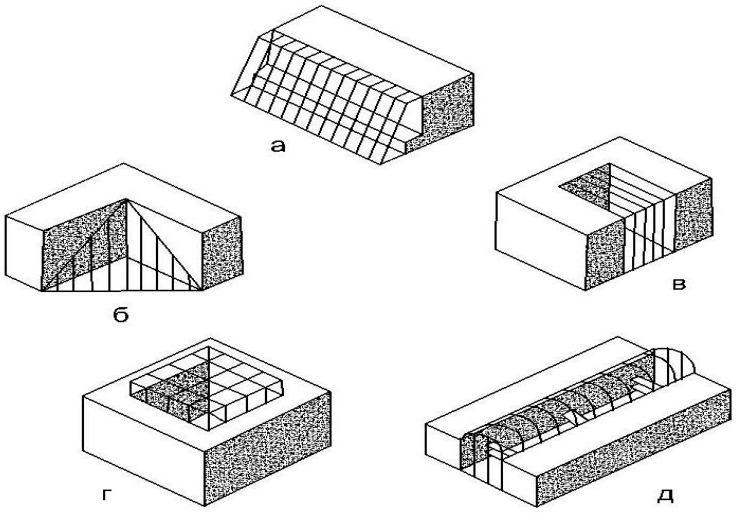


Рисунок 1.11 – Виды атриумов: а) Одностенный атриум, по типу оранжереи; б) Двухстенный атриум; в) Трехстенный атриум; г) Четырехстенный атриум; д) Линейный атриум

Одно-, двух-, трех- и четырехсторонние и линейные атриумы могут использоваться для проектирования как небольших отдельных зданий, так и больших комплексов.

При проектировании зданий с атриумами следует учитывать климатические условия местности [67]. Помимо климатических условий, другие факторы, такие как функциональность зданий, ожидаемый уровень теплового комфорта и включение архитектурных факторов, также определяют дизайн атриума [89]. Однако размещение и форма атриума, или тип атриума, являются основными факторами, определяющими его преимущества для здания [89]. Широко распространены пять различных форм атриумов, как показано на (Рисунок 1.11) [5], каждая форма атриума обладает определенным преимуществом, которое выбирается в зависимости от условий окружающей среды, характеристики естественного освещения, местных климатических условий и архитектурных соображений. Выбор конкретной формы атриума должен основываться на компромиссе между климатическими условиями местности и его экологическими преимуществами. Например, в умеренном климате одностенные атриумы используются для того, чтобы воспользоваться накопленной солнечной теплотой зимой и обеспечить комфортные условия в другое время года. Для жаркого и умеренного климата из пяти основных типов четырехстенные и линейные атриумы

являются наиболее эффективными, так как сводят к минимуму колебания температуры в жаркие и умеренные сезоны. Кроме того, общая температура в четырехстенных и линейных атриумах в среднем близка к комфортной. Следовательно, такие атриумы являются наиболее используемыми видами в регионах с жарким и умеренным климатом [2].

Вывод из всего вышесказанного следующий. Выбор формы и ориентации зданий с атриумами зависит в основном от климата. При строительстве в холодном климате солнечное освещение и солнечный обогрев помещений должны быть увеличены, что снизит потребление энергии на искусственное освещение и отопление здания. Этом вывод может показаться очевидным, однако сложность заключается в том, что особенно в умеренном климате согревающий и охлаждающий факторы должны совмещаться в одном атриуме, что требует отдельного рассмотрения.

- **По виду разреза** различают (Рисунок 1.12) [18]:
- атриумы с вертикальными стенами;
- террасные атриумы

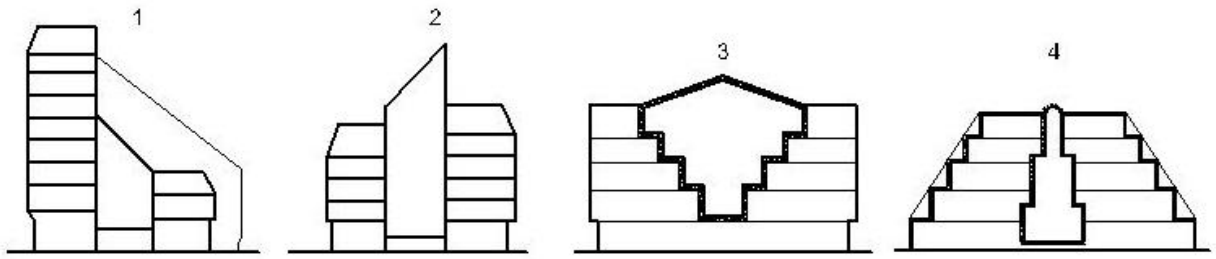


Рисунок 1.12 – Типы атриумов по виду разреза: 1,2 – с вертикальными стенами, 3,4 – террасные атриумы

- **По наличию верхнего или бокового света:**
- атриумы с верхним светом;
- атриумы с боковым светом.

Устройство верхнего фонаря в атриуме является наиболее целесообразным поскольку во всех широтах максимальное количество света поступает сверху. При верхнем освещении важно учитывать необходимость снизить потери тепла зимой, по возможности организовать защиту от прямых солнечных лучей, использовать

отраженный и рассеянный свет и главное: обеспечить движение воздуха внутри у стекла покрытия для защиты от конденсата.

- **По типу регулирования микроклимата:**

- согревающий атриум;
- охлаждающий атриум;
- трансформируемый (конвертируемый) атриум.

- **По типу размещения в здании:**

- встроенны;
- пристроенный;
- встроено-пристроенный

1.1.3 Отечественный и зарубежный опыт строительства зданий с атриумами

- **Зарубежный опыт**

Галерея Виктора Эммануила, Милан

Построенный в 1867 году, атриум здания галереи Виктора Эммануила (Рисунок 1.13) является характерным примером формообразования атриума линейного типа. Архитектор Д. Менголе продемонстрировал, что целые улицы могут быть покрыты стеклянными крышами по принципу восточного базара и по образу зданий всемирных выставок [4, 43]. Классифицируя, по приведенному выше списку, этот атриум четырехстенный, с вертикальными стенами, с верхним светом, согревающий, встроенный.



Рисунок 1.13 – Галерея Виктора Эммануила в Милане, арх. Д. Менголе

Hyatt Regency Atlanta

Как описывалось ранее, первым атриумом в многоэтажном знании, с которого началась новая эпоха, был атриум отеля Hyatt Regency в Атланте (Рисунок 1.14). Он представляет собой остекленный внутренний двор с увитыми зеленью балконами, прозрачными мостиками и скользящими вверх-вниз светящимися кабинами лифтов. На крыше небоскреба разместился плавно кружащий ресторан. Это атриумное пространство по форме относится к четырехстенным, встроенным, согревающим атриумам с верхним светом и вертикальными стенами. Реализация данного проекта послужила стремительному превращению Нуаи из мотеля в гостиничную империю и принесло Джону Портману мировую славу [12].



Рисунок 1.14 – Атриум отеля Хаятт Редженси, Атланта

Атриумы становятся популярными во всем мире, как и принципы пассивного дизайна, которые заключаются в использовании солнечной энергии в целях естественного поддержания комфортных условий внутри здания.

Здание страховой компании «Ллойдс», Лондон (Рисунок 1.15)

Атриум в этом здании встроен в высотный объем и проходит по всей высоте здания. Внутренние Офисные помещения выходят в атриум, что расширяет основные площади. На первом этаже расположено лобби, освещаемое верхним светом, разделение потоков людей на разные этажи осуществляется при помощи эскалаторов [34].

Как и атриум отеля Хаятт Редженси в Атланте, атриум здания «Ллойдс» относится к встроенным, линейным, согревающим атриумам с вертикальными стенами и с преимущественно верхним светом. Следует отметить, что все примеры

зданий с атриумами имели системы кондиционирования воздуха и были использованы первоначально как средство архитектурной выразительности интерьера. Но постепенно понимание экономии энергии, создаваемой этими архитектурными элементами стало важным экономическим стимулом для применения таких элементов объемно-планировочных решений.



Рисунок 1.15 - Атриум здания Ллойдс, Лондон

«Commerzbank», Франкфурт-на-Майне

Следующим пространством, в котором наиболее радикально отразились экологические требования был атриум здания «Коммерцбанка» (1997г., Франкфурт-на-Майне, арх. Н. Фостер) (Рисунок 1.16). Оно является самым высоким зданием в Европе. Его высота составляет 259 метров, высота с антенной – 300 метров. Здание «Commerzbank» занимает 24-е место в мире по высоте [34].



Рисунок 1.16 – «Commerzbank», Франкфурт-на-Майне

Проект небоскреба был разработан студией «Фостер и партнёры» в Лондоне. Он кардинально отличался от традиционной американской модели, которая заключалась в полностью кондиционируемых помещениях, игнорировании потенциала естественного освещения и проектировании абсолютно идентичных этажей. В здании Коммерцбанка используется главным образом естественное освещение и естественная вентиляция, имеется атриум, проходящий от уровня земли до самого верхнего этажа, и из каждого офиса или части здания открывается вид на город [34].

Конструктивная система этого здания каркасно-ствольная с вынесенными на фасад несущими конструкциями и коммуникациями. Именно такое решение конструктивной системы позволило спроектировать целую систему атриумов. Она состоит из спирально расположенных по высоте всего здания зимних садов, примыкающих к наружным стенам и соединяющегося с объем от центрального внутреннего атриума. Такая система создает перекрестную естественную вентиляцию внутренних офисных помещений, а благодаря растениям в зимних садах улучшается микроклимат путем насыщения его кислородом.

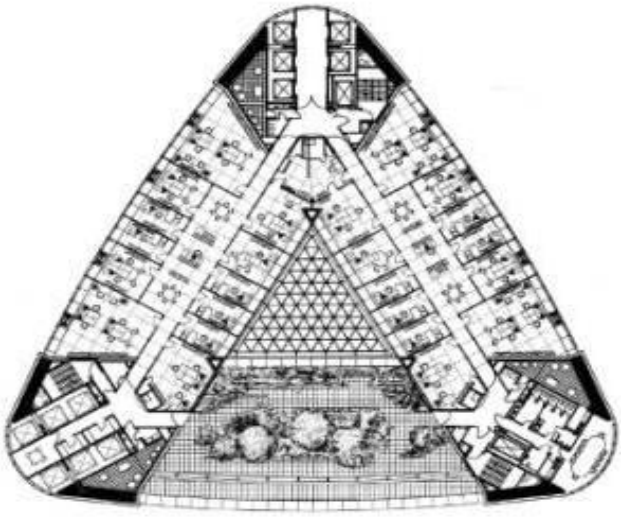


Рисунок 1.17 – План здания “Commerzbank”, Франкфурт – на –Майне (ФРГ)

План башни представляет собой треугольник с закругленными вершинами (Рисунок 1.17). Центральный атриум является каналом естественной вентиляции для смежных офисных помещений здания.

Принцип «вертикальных коммун-соседств» (по определению Н. Фостера), объединенных общими атриумами групп помещений, расположенных на разных этажах здания, позволил придать гибкость и трансформативность функционально-планировочной структуре офисного здания «Commerzbank», повысить его адаптивность к возможным структурным изменениям и реорганизации, моральную долговечность [20, 34]. В дальнейшем этот механизм повторен и усовершенствован в проекте здания Лондонской «сигары» «Свис Ре» (2003 г., Лондон, арх. Н. Фостер). (Рисунок 1.17)

«Комплекс газгольдеров», Вена (Рисунок 1.18)

Венские газгольдерные башни – пример того, как памятники индустриальной архитектуры превращаются в современные апартаменты XXI века [42].

В конце XIX века в промышленном районе Зимеринг города Вена были построены четыре газгольдера для хранения газа.

После того, как газгольдеры уже не использовались по прямому назначению, их признали историческими памятниками, вследствие чего их нельзя было снести. Поэтому было принято решение провести их модернизацию. В результате бывшие резервуары газа стали современным многофункциональным комплексом.



Рисунок 1.18 – Комплекс газгольдеров, Вена

Внутри газгольдеров создали новые интерьеры. В башнях разместился жилой комплекс на 615 квартир, офисы, зимний сад, танцевальный зал с и хорошей звукоизоляцией, бары, кафе, рестораны (Рисунок 1.19).



Рисунок 1.19 – Интерьер газгольдеров, Вена

Обновленные газгольдеры были официально открыты октябре 2001 года и теперь являются украшением Вены. Стекленные купола, перекрывающие внутренние дворы-атриумы, обеспечивают на всех этажах в помещениях, выходящих окнами в атриумы, достаточное естественное освещение в центре комнат (по нормам РФ). К сожалению тяга, обеспечиваемая приточными и вытяжными отверстиями, в летнее время недостаточна, что приводит к температурному дискомфорту.

- **Отечественный опыт**

Атриум торгового центра «Охотный Ряд», Москва

Сегодня применение атриумов при строительстве и реконструкции зданий набирают все большую популярность. В Москве построено н реконструировано большое количество жилых и коммерческих построек с атриумами.

В Торговом центре «Охотный Ряд» устроен уникальный по своей конструкции, хотя и не большой по размерам атриум (Рисунок 1.20). Его конструкция предполагает куполообразную форму с нанесением изображения карты Северного полушария на внешней стороне купола. Купол совершает по одному обороту за сутки и показывает время городов, расположенных в северном полушарии.



Рисунок 1.20 – Атриум торговый центр «Охотный ряд», Москва

Согласно предложенной классификации, атриум торгового центра «Охотный ряд» относится к четырёхстенным, встроенным атриумным пространствам с верхним светом.

Атриум «торгово-развлекательного» центра, Москва

Торгово-развлекательный центр «атриум», Москва. Торговый ряд «Атриум» получил свое название благодаря возведению данной конструкции над площадью торгового комплекса Курского вокзала (Рисунок 1.21). В этом здании атриум линейный, встроенный, с наличием верхнего света.



Рисунок 1.21 – Торгово-развлекательный центр «Атриум», Москва

Музыкальный театр им. Станиславского и Немировича – Даниелко, Москва (Рисунок 1.22)

Данный атриум, как архитектурный элемент применяется и при реализации других современных проектов. Он соединил новый и старый корпуса, расположенные на улице Большая Дмитровка.



Рисунок 1.22 – Атриум музыкального театра им. Станиславского и Немировича – Данченко

Деловой центр на Новинском бульваре, Москва (Рисунок 1.23)

Атриум делового центра на Новинском бульваре д. 31 (Рисунок 1.23) реализовывался как главный элемент, послуживший основой для проектирования площадей торговых и офисных помещений.



Рисунок 1.23 – Атриум делового центра на Новинском бульваре

Так же гостиница-атриум «Международная» является первым по своей архитектурной конструкции сооружением в Москве, построенной в данном стиле.

Атриумы устанавливаются как элементы украшения и в административных зданиях. Примером служит здание Департамента инвестиционных программ строительства города Москвы, расположенному на улице Воздвиженке. Как элемент архитектурного декора атриумом хотят применить при строительстве здания правительства Москвы в «Москва-Сити». Атриумами предполагается украсить правительственное здание в «Москва-Сити». Они будут разделять здание через каждые 8 этажей.

Жилой дом в Брюсовом переулке, Москва (Рисунок 1.24)

Наиболее ярким примером в современной практике строительства России, когда атриум включен в структуру многоэтажного жилого дома, является проект жилого дома в Брюсовом переулке в г. Москве, разработанный архитектором А. Бавыкиным в 2007 году. Атриум занимает центральное место в композиции дома. Он высокий и узкий, как двор-колодец [40].



Рисунок 1.24 – Разрез жилого дома в Брюсовом переулке, Москва

Первый жилой комплекс, возведенный с применением атриума, появился в районе Строгино в городе Москва.

ЖК «Янтарный город» (Рисунок 1.25) предполагает установку семи 12-метровых атриумов, которые будут смонтированы с шагом в 4 этажа в двух 29-этажных домах. Эти атриумы встроенные, одностенные, с боковым светом, ориентированные на северо – восток.



Рисунок 1.25 – ЖК «Янтарный город»

Устройство атриумных пространств набирает все большие обороты в архитектуре. Однако, каждое атриумное здание уникально. Индивидуальны и проекты таких сооружений, от конструкций и до инженерных систем. Это доказывается большим количеством примеров построенных атриумных зданий по всему миру. Тем не менее, несмотря на, большое многообразие решений, существует ряд моментов, которые необходимо учесть при проектировании и строительстве атриумов.

1.2 Принципы проектирования атриумных пространств

Как элемент конструкции атриумные пространства обладают многими преимуществами по сравнению с традиционными зданиями. Атриумы обеспечивают благоприятную рабочую среду, предоставляя большое пространство с естественным дневным светом и связывая внутреннее пространство с внешней средой и являясь буферной зоной между внешней средой и внутренней средой.

Проектирование атриума базируется в основном на учете климатических условий на архитектурных приемах, ожидаемом уровне теплового комфорта и функции здания. Однако, только при комплексном учете всех этих условий есть возможность создать энергоэффективное здание без негативных явлений, возникающих в подобных типах пространства.

1.2.1 Нормативная база по проектированию атриумных пространств

Как такового единого нормативного документа, в котором комплексно описывается проектирование атриумов в Российской Федерации нет. Поэтому при проектировании атриумов в определенном типе здания (жилое, общественное), необходимо руководствоваться соответствующим СП. Так как атриумы более популярны в общественных зданиях, то и руководствоваться необходимо СП 118.13330.2022 «Общественные здания и сооружения» [29]. Однако, в нем приводится только определение термина «атриум» (Приложение Б). Согласно этому своду правил атриум, это «часть здания в виде многосветного пространства (три и более этажей), развитого по вертикали, смежного с поэтажными частями здания (галереями, ограждающими конструкциями помещении и т. п.), как правило, имеет верхнее освещение» [30]. Следующим сводом правил, в котором рассматриваются атриумные пространства является СП 160.1325800.2014 «Здания и комплексы многофункциональные. Правила проектирования» [31].

В этом документе большее внимание уделено противопожарным требованиям, предъявляемым к атриумам (пункт 7). Так в подпункте 7.11 данного СП описываются требования к системам пожаротушения в атриуме, необходимость устройства автоматической системы пожаротушения, дымовой пожарной сигнализации и системы дымоудаления. К тому же этот подпункт включает в себя места установки спринклерной или дренчерной систем пожаротушения. Подпункт 7.12 рекомендует проектировать не менее 2 путей эвакуации из помещений, выходящих в атриум, и в зависимости от назначения этих помещений протяженность путей должна быть 30 м, либо 60 м. Далее в пункте 7 рассматривается требуемая огнестойкость материалов, используемых в атриуме. Подпункт 7.15 «Конструкции покрытия атриумов должны выполняться из негорючих материалов. Остекление проемов в ограждающих конструкциях (покрытий) атриумов должно быть силикатным». Подобные требования, а также необходимость противодымной вентиляции в атриумах прописаны в СП 7.13130.2013 «Отопление, вентиляция и кондиционирование. Требования пожарной безопасности» [33].

Здания с атриумными пространствами являются уникальными и, вероятно, в связи с этим нет единого свода правил, в котором комплексно рассматриваются все необходимые требования к атриумам. Однако, в ходе многих исследований были выявлены вопросы, решение которых позволяет грамотно спроектировать атриумное пространство внутри здания.

1.2.2 Факторы, влияющие на проектирование атриумных пространств.

Перегрев в летнее время является основной причиной дискомфорта и расхода электроэнергии на охлаждение. Наиболее часто встречающимися явлениями, которые могут усиливать дискомфорт, в атриумных пространствах являются: эффект стратификации и эффект аэродинамической трубы. Стратификация – (от лат. расслоение) – процесс, результатом которого является значительная разница температур на уровне пола и потолка или в глубине помещения и около наружной ограждающей конструкции. Причиной является разная плотность теплого и холодного воздуха. Особенно ярко стратификация проявляется в атриумных пространствах, так как к этому естественному процессу добавляется увеличение температуры воздуха за счет солнечных лучей, проходящих через остекление атриумов. Однако, в атриумном пространстве возможно возникновение эффекта, противоположного стратификации, то есть эффекта холодных стен. Он возникает при условии низкой наружной температуры и отсутствии солнечного, излучения, например, ночью или в пасмурные дни, когда небо затянуто тучами. Данное явление обусловлено утечкой тепла через ограждающие конструкции крыши за счет теплопередачи или в меньшей степени лучистого теплообмена. Так, например, в положительном смысле стратификацию можно использовать в холодное время года. Эффект аэродинамической тяги основан на циркуляции воздушного потока, вызванной разницей воздушного давления на разной высоте, то есть на том, что теплый воздух всегда поднимается снизу вверх. Для создания восходящего воздушного потока необходимо три условия: расположение притока на нижних уровнях здания, вытяжки на верхних и наличие источников тепла, которые будут создавать разницу температур внутреннего и наружного воздуха. Этот принцип используется при проектировании естественной вентиляции в атриумных

пространствах. Еще один не менее важный фактор теплопотери в атриуме. Логично предположить, что из-за большой площади остекления атриума могут возникать большие потери тепла. Есть три основных источника потери тепла в жилых зданиях: через систему вентиляции, через канализационную систему и через ограждающие конструкции здания. Среди трех, ограждающие конструкции отвечают за большую часть общих теплопотерь. Международная ассоциация пассивного дома проводила исследование, по данным которого стало известно, что теплопотребление зданий может быть снижено на 80% [53], если здания построены в соответствии со стандартами пассивного дома (IPHA 2010). Данный документ обеспечивает пять критериев для достижения этого пассивного стандарта:

- исключительно высокий уровень климатизации;
- хорошо изолированное остекление двухкамерными стеклопакетами;
- отсутствие мостиков холода в конструкциях;
- герметичность теплового контура здания;
- комфортная вентиляция с высокоэффективной рекуперацией тепла.

Помимо этого, потери тепла через тепловыделения здания могут быть уменьшены путем понижения коэффициента форм-фактора [26].

Форм-фактор – это соотношение между величиной теплового контура и объемом здания. Его значение зависит от трех факторов: формы здания, размера здания и гладкости фасадов. Здания с низким значением фактора формы будут иметь относительно меньшую площадь теплового контура. Меньший размер теплового контура может сократить тепловые потери и объём инфильтрации. Аналогичным образом, уменьшение количества углов и граней в фасаде может привести к значительному сокращению потребления энергии.

Форм-фактор зависит от формы здания и объема, как показано на Рисунок 1.26 A и B. Оба здания имеют одинаковый объём, но различные зоны тепловыделения, что приводит к различным коэффициентам компактности. Этот коэффициент также зависит от размера здания, как показано на Рисунок 1.26 A и C. Большое по объёму здание с подобной формой будет иметь более низкий форм-фактор. Негладкие фасады с впадинами и выпуклостями, например, с балконами,

которые выходят за пределы фасада, также увеличат коэффициент форм-фактор, как показано на Рисунок 1.26 D.

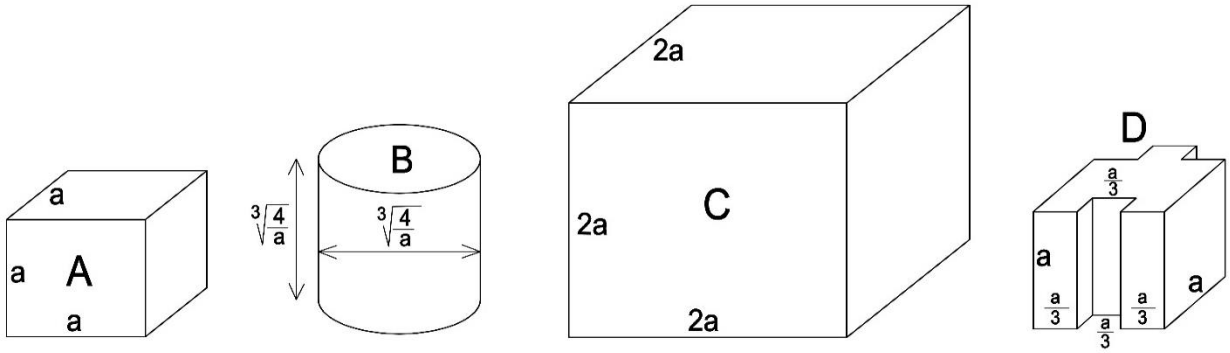


Рисунок 1.26 – Формы зданий и их характеристики

В российской нормативной базе, в частности в СП 50.13330.2024 «Тепловая защита зданий», есть, подобный форм-фактору, показатель компактности здания k_{des}^{e}. Он рассчитывается по формуле: $k_{des}^{e} = \frac{A_e^{sum}}{V_h}$, где A_e^{sum} - общая площадь внутренних поверхностей наружных ограждающих конструкций, включая покрытие (перекрытие) верхнего этажа и перекрытие пола нижнего отапливаемого помещения, м^2; V_h – отапливаемый объем здания, равный объему, ограниченному внутренними поверхностями наружных ограждений здания, м^2, см. таблицу 1.1 [26].

Таблица 1.1 – Зависимость характеристик здания от формы.

	A	B	C	D
Объём	a^3	a^3	$8\ a^3$	a^3
Тепловая оболочка	$6\ a^2$	$5{,}5\ a^2$	$24\ a^2$	$7\ a^2$
Форм–фактор	$\frac{6}{a}$	$\frac{5{,}5}{a}$	$\frac{3}{a}$	$\frac{7}{a}$

Данный показатель рассчитывается на начальном этапе проектирования здания и сравнивается с нормативными значениями, приведенными в СП. В случае, когда расчетный показатель больше нормативного, рекомендуется поменять объемно-планировочное решение здания [32].

Влияние форм-фактора на энергоэффективность здания было доказано в исследовании шведских ученых, которые сравнили два идентичных построенных здания с моделью, в которой был запроектирован согревающий атриум [53].

Характеристики существующих зданий:

Пятиэтажные здания с высотой потолка 2,7 м. Общая площадь этажа составляет 1710 м^2. Она разделена между 16 квартирами. Площадь остекления составляет 15 % от общей площади фасадов и равна 258 м^2 (Рисунок 1.27).



Рисунок 1.27 – Существующее здание, рассматриваемое в исследовании

Характеристики модели с согревающим атриумом:

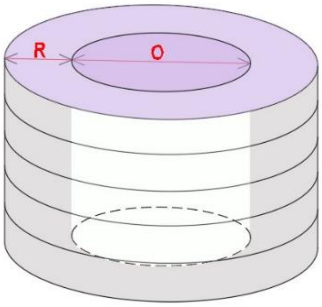


Рисунок 1.28 – Модель согревающего атриума

Модель была задана таким образом, чтобы ее основные характеристики были аналогичны существующим зданиям (Рисунок 1.28). Значения R и O равны 7 и 21,6 м соответственно, что обеспечивает одинаковую площадь квартиры с другими заданными зданиями. Кроме того, такие размеры позволяют разместить согревающий атриум площадью 336 м^2.

В работе с помощью специализированных программ были рассчитаны затраты на энергию, потребляемую зданиями в определенный период. В программе

VIP-Energy [80] были заданы четыре различных совокупности тепловых характеристик, а также контролируемые характеристики значений скорости и направления ветра, солнечной радиации и влажности, полученные в лаборатории NOAA (Национальное управление исследований океана и атмосферы) для города Гетеборга в Швеции, см. таблицу 1.2 [80].

Таблица 1.2 – Результаты исследований для 4 выбранных совокупностей тепловых характеристик

Сценарий	Наружная стена		Крыша		Первый этаж		Окно
	Толщина наизоляции	Коэффициент теплопередачи	Толщина изоляции	Коэффициент теплопередачи	Толщина изоляции	Коэффициент теплопередачи	Коэффициент теплопередачи
1	480	0,09	500	0,09	400	0,087	0,7
2	360	0,118	400	0,112	300	0,115	0,9
3	300	0,14	300	0,147	240	0,142	1,1
4	240	0,173	250	0,175	200	0,169	1,3

Для каждой из четырех совокупностей в модели удельный спрос на потребление электроэнергии для обогрева был меньше, чем у существующих зданий. Эти результаты указывают на то, что здания с атриумом более энергоэффективны, а это в свою очередь отвечает требованиям стандарта пассивных домов.

1.2.3 Климатизация атриумов с помощью кондиционеров и вентиляции

Климатизация атриума

Климатизация атриумов основана на принципах ОВиК (направление в строительстве, заключающееся в разработке таких инженерных сетей как отопление, вентиляция и кондиционирование). Для эффективного использования преимуществ атриума с точки зрения отопления и вентиляции требуется оптимальная ориентация и придание атриумному зданию формы, способствующей сохранению, с одной стороны, тени, с другой – солнечного тепла, а также организации в объеме необходимых вентиляционных потоков. Системы

кондиционирования и отопления в атриумах нацелены на обеспечение комфортного пребывания людей в рабочей зоне.

Микроклиматические условия среды, которых требуется добиться посредством инженерных систем климатизации в атриумной зоне, зависят от назначения здания. Например, в атриумах гражданских и производственных зданий температура воздуха нормируются при относительной влажности 40-60 % в пределах 25-26 °С в летний период и 20-21 °С – в зимний период [99].

Для атриумных пространств характерны некоторые особенности, в частности, это значительный перенос воздушных масс и неравномерность, микроклиматических параметров в объеме помещения. На перемещение воздушных масс оказывает влияние ряд вышеописанных факторов: стратификация, эффект холодных стен, внутренние теплопоступления, инфильтрация наружного воздуха, эксфильтрация воздуха на верхних зонах атриума. Поэтому в помещениях атриумного типа следует выделять две системы климатизации – для верхней и нижней зоны – изменяющие параметры работы в летний и зимний периоды года.

На данные системы влияют два фактора: климатический пояс, в котором возводится здание и характер основных тепловых процессов и функции атриума. При этом необходимо сделать выбор между согревающим, охлаждающим или трансформируемым атриумом.

Решающим является климатический фактор, так как атриумные здания в холодном климате почти всегда нуждаются в притоке тепла, а в тропиках – в охлаждении, в континентальном климате требует обогрева зимой и охлаждения летом [89]. Однако, в зависимости от типа атриума, его формы и функции эти отношения могут изменяться, и в любом случае необходимо использование специализированных инженерных систем.

Вентиляция и кондиционирование воздуха в атриумах

Вопреки популярным принципам энергоэффективности, большинство атриумных зданий все еще не могут эксплуатироваться без применения специального электрического и механического оборудования. Поэтому они не

могут рассматриваться как абсолютно «естественные» системы, работающие только на природной энергии.

С начала 2000х годов было опубликовано несколько статей, в которых в полной мере описывались механизированные системы климатизации, применяющиеся на данный момент в практике. Они подразделяются на те, что используются в летний период и в зимний.

Соответственно в летний период чаще всего используются [99]:

- комбинированная система (Рисунок 1.29), в верхней зоне которой осуществляется отвод тепла и отработанного воздуха с помощью естественной вентиляции, а в нижнем уровне устроена механическая система охлаждения, и система, основанная на выше описанном типе, только отвод теплого воздуха с верхних этажей осуществляется за счет механических вытяжных вентиляторов (Рисунок 1.30);

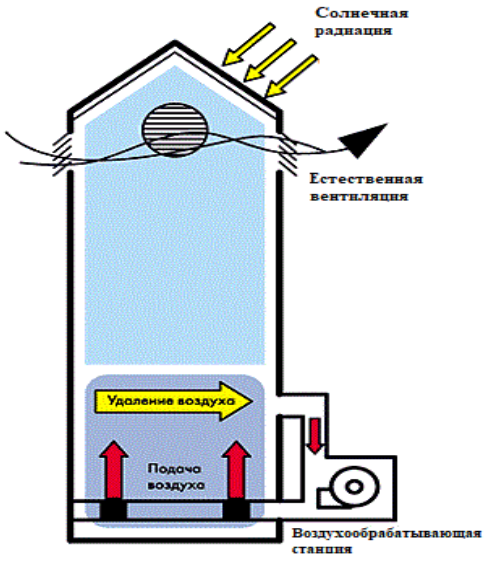


Рисунок 1.29 – Механическая система кондиционирования

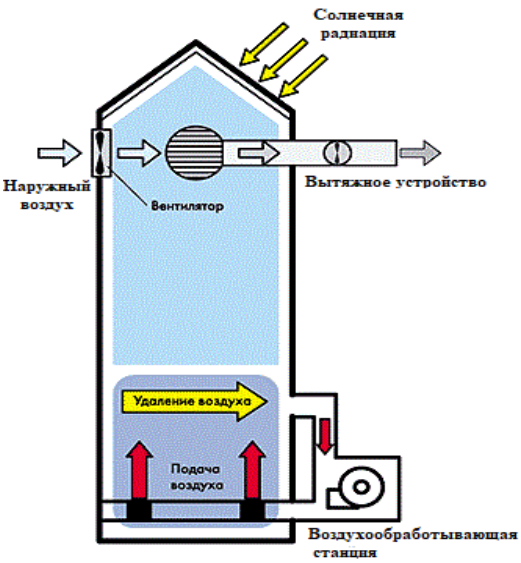


Рисунок 1.30 – Механическая система кондиционирования

- система со свободным охлаждением (free cooling) (Рисунок 1.31). Зимой, в свою очередь, используют систему с рекуперацией тепла (Рисунок 1.32). Она базируется на использовании теплого воздуха, скапливающегося на верхних уровнях, для обогрева нижних этажей.

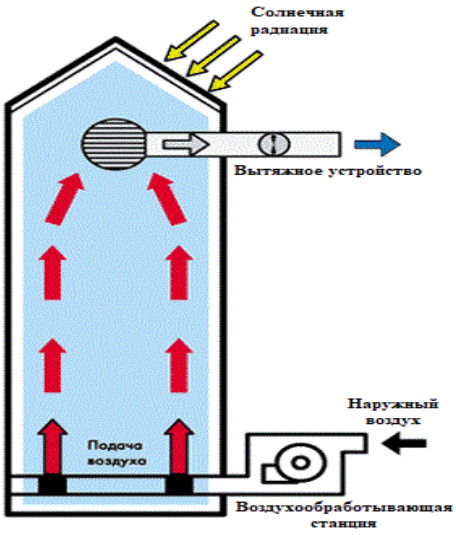


Рисунок 1.31 – Система со свободным охлаждением.

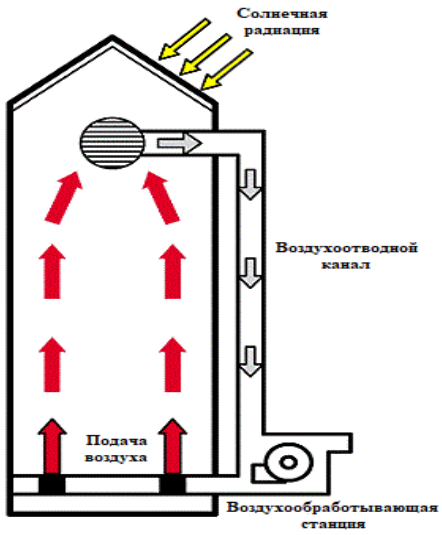


Рисунок 1.32 – Система кондиционирования с рекуперацией тепла.

Помимо этих систем, стоит обратить внимание на систему, основанную на аэродинамической тяге. Как было описано выше, этот эффект возникает за счет разности давлений теплого и холодного воздуха. Этот же принцип используется при проектировании естественной вентиляции в атриумных пространствах, когда приток воздуха располагается на нижних уровнях и в тени, а вытяжка наоборот на верхних этажах. Однако, в таких климатических районах, где температура в тени больше 25°С, аэродинамическая тяга естественной вентиляции просто не образуется. Одним из решений. а, следовательно, и вариантом системы кондиционирования, может стать использование небольшого технического помещения на нижних этажах здания, в котором будет аккумулироваться или специально охлаждаться воздух, который в последующем будет подаваться в систему вентиляции и создавать эффект трубы. Данный вариант системы кондиционирования, не встречался в рассмотренной мной литературе, однако, при дальнейшей его разработке перспективность этого решения не вызывает сомнений.

Принимая во внимание бесспорные выгоды рассмотренных выше систем, все-таки, еще не до конца изучены возможности естественной вентиляции в атриумах и ее влияние на микроклимат.

Основываясь на литературе для того, чтобы добиться искомого, теплового баланса при проектировании естественной вентиляции в атриуме, существует два

основных конструкторских подхода: (а) проектирование необходимой формы атриума и его расположения в структуре здания, и (б) реализация подходящей вентиляционной системы.

Основное преимущество использования естественной вентиляции при проектировании зданий – это не только снижение потребления затрат на электроэнергию, но и обеспечение комфортных условий для работы или проживания. Движение воздушных масс по всему зданию возникает в результате таких факторов, как разница между давлениями внешней и внутренних сред, результатом которого является ветер и аэродинамическая тяга.

Проектирование естественной вентиляции в атриумах напрямую зависит от условий окружающей среды. Погодные явления, дожди во влажном климате и бури в жарких засушливых районах – это потенциальное ограничение для применения естественной вентиляции. Некоторые факторы наоборот имеют большое значение, создавая или увеличивая приток воздуха в здание. Это такие факторы, влияющие на проектирование естественной вентиляции в атриуме, как температура снаружи, направление и скорость ветра и интенсивность солнечного излучения, которые описаны ниже:

Температура

В жарком и влажном климате влияние температуры окружающей среды на воздух и его распределение в пространстве атриума превышает тепловую нагрузку внутри здания [89]. Температура окружающей среды влияет на тепловое состояние внутренних помещений.

Солнечная радиация

Солнечное излучение, которое проникает через остекленные поверхности стен и кровли, для обеспечения дневным солнечным светом – важный фактор, который необходимо учесть при проектировании атриумов [80]. Солнечное излучение оказывает значительное влияние на распределение температуры в атриуме, прежде всего, за счет воздействия на температуру пола, через остекленные поверхности кровли [79]. В тропиках это создает серьезную проблему, особенно из-за излучений, исходящих от полуденного солнца, поднимающегося на

максимальную высоту [93]. Например, в исследовании пятиэтажного атриума в средиземноморском климате города Сантьяго-Чили показано [92], что защита от солнечного излучения может привести к снижению потребности на 75% в охлаждении; в то время как ночная вентиляция влияет только на 10% снижения. Однако, результат зависит от типов защиты от солнца, формы и вида стекла, используемых в здании [47].

Ветер

Ветер, оказывает влияние на увеличение силы тяги. Сила ветра перемещает воздух в атриуме, увеличивая положительное давление притока из-за разницы температур снаружи и внутри. Это также снижает отрицательное давление на выходе воздуха с подветренной стороны. Однако в течение определенного времени (час, сутки, сезон) поле давления вокруг здания меняется в зависимости от направления ветра. Таким образом, входное давление меняется с положительного давления в один день на отрицательное давление на следующий день. В этом случае впускные отверстия действуют как вытяжные, что, в свою очередь, вызывает непреднамеренное движение воздуха вниз через атриум. Ветер как движущая сила вентиляции особенно эффективен в районах с относительно высокими скоростями ветра [95].

Тепловые нагрузки

Внутренняя тепловая нагрузка в атриуме образуется из двух источников тепла: излучение тепла от людей и бытовых устройств и внешние источники тепла, такие как солнечная радиация. Эти тепловые нагрузки вызывают вертикальные градиенты температуры и, следовательно, движение воздуха внутри атриума. Роль внутренних тепловых нагрузок была описана учёными Кембриджа в 2009 году. Они доказали, что при использовании естественной вентиляции в атриумном пространстве, 0,1 кВт тепла, исходящего от внутренних источников позволяет сэкономить до 70-80 % от энергопотребления здания [109].

Здание с атриумом является уникальным сооружением, проектирование которого практически не регламентировано в нормативной базе. В СП описаны только требования пожарной безопасности, которые предъявляются к атриумам

для обеспечения безопасной жизнедеятельности. Однако, несмотря на это, существует негласный ряд факторов, которые учитываются: возможность естественного освещения, естественного охлаждения и климатизация атриума, которая напрямую зависит от вентиляции и отопления. В данной главе были рассмотрены основные моменты, которые необходимо учитывать, если перед проектировщиком стоит задача создания атриумного пространства. Тем не менее, возможно, есть еще один фактор, которому следует уделить особое внимание, а именно создание комфортной световой среды в атриуме.

1.2.4 Освещение атриумов

Атриум – пространство, которое может использовать по максимуму все возможности естественного освещения. Ведь одним из важнейших принципов, на котором основано проектирование и строительство атриумных зданий, является принцип возвращения к естественному освещению и максимальной экономии энергетических ресурсов.

К естественному освещению предъявляются ряд требований [3]:

- равномерность;
- обеспечение требуемой освещенности рабочих поверхностей;
- устранение направленного прямого или отраженного солнечного света, слепящего людей, находящихся в помещении;
- обеспечение необходимой яркости окружающего пространства.

Эти вопросы не входили в перечень задач работы. Однако можно сделать заключение, что для зон с умеренным климатом и частой облачностью идеальный атриум предполагает яркое верхнее освещение с максимальной пропускающей способностью остекления, обеспечивающей максимальный световой поток в атриум.

В районах с безоблачным небом использование прямого солнечного света должно быть ограничено. В таких случаях солнечный свет должен быть специально рассеян или задержана тепловая часть его спектра за счет матового остекления или специального стекла.

Немаловажным является отражающая способность внутренних стен, так как освещенность нижних уровней достигается за счет отражения поверхностью стен на верхних уровнях солнечных лучей, проходящих через остекления атриума.

Помимо всего выше перечисленного, атриум не может обойтись без искусственного освещения. Для оптимального экономического эффекта необходимо заставить работать естественный и искусственный свет совместно, то есть необходима специальная система автоматического регулирования. Источники искусственного света должны быть расположены там, куда не доходит естественный свет, а также постепенно включаться с наступлением вечера и в плохую погоду, когда небо затянуто тучами. Умелое одновременное использование естественного и искусственного освещения позволяет снизить расходы на освещение, тем самым увеличивая энергоэффективного здания.

Солнечный свет, используемый при освещении атриумов, неразрывно связан с теплом, которое также проходит через ограждающие конструкции и нагревает воздух внутри помещения. Соответственно для создания комфортного микроклимата необходимо учитывать и его. Однако использование его для обогрева предполагает соединение его с искусственными отопительными и вентиляционными системами, так как в атриуме возникает ряд явлений, которые можно контролировать за счет комплексной работы этих инженерных систем.

Естественное освещение атриумов является отдельной темой, связанной с проектированном естественного освещения с учетом отраженного света. В данной работе мы его рассматриваем только, как результат уже выполненных исследований.

1.2.5 Прогнозирование уровня комфорта в атриуме

Следующая фундаментальная проблема проектирования, это прогноз желаемого уровня комфорта в атриуме. Прогнозирование и моделирование термических процессов, поведения воздушных и тепловых потоков в атриуме является весьма трудной задачей, так как используемые инженерные расчеты ограничены в своих возможностях. Поэтому мы рассматриваем комфорт только с

точки зрения температурно-воздушной среды. Он является самым важным для человека.

Тепловой комфорт в атриуме

Степень удовлетворенности человека внутренней средой помещения характеризуется тепловым комфортом, который является совокупностью большого количества факторов, при которых человеку уютно находиться в помещении. К ним относятся [3, 23]:

- относительная влажность воздуха;
- качество воздуха (особенно содержание CO_2);
- движение воздуха (скорость потока);
- температура пола;
- теплонакопление ограждающих помещение конструкций;
- температура поверхности ограждающих помещение стен;
- температура воздуха в помещении.

Прогноз поведения воздушного потока связан с тем, что увеличение внутренней тепловой нагрузки в пределах здания или изменение некоторых конструктивных параметров может полностью изменить направление подачи воздуха и, следовательно, вызвать тепловой дискомфорт или нарушение циркуляции воздуха среди окружающих атриум пространств [6]. Для определения проблемы теплового дискомфорта и, следовательно, проектирования и управления системами отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, используемых в атриуме, необходим метод расчета, который может предсказывать уровень теплового комфорта в атриумах. Такой расчет представлен в ГОСТ Р ИСО 7730-2009 «Эргономика термальной среды. Аналитическое определение и интерпретация комфортности теплового режима с использованием расчета показателей PMV и PPD) и критериев локального теплового комфорта», где PMV - это прогнозируемая средняя оценка, с помощью которой делается вывод о чувствительности людей к внутренней температуре внутри помещения, а PPD – прогнозируемый процент недовольных тепловой средой [9], однако, он все еще является не точным [21].

На тепловое ощущение жителей, проживающих в здании влияют четыре фактора окружающей среды – температура воздуха, скорость воздушного потока, влажность и средняя радиационная температура (Mean Radiant Temperature). В пояснение, в ГОСТ Р ИСО 13731-2016 «Эргономика термальной среды. Термины, определения и обозначения» дается определение средней радиационной температуры: температура воображаемого ограниченного черного пространства, в котором человек теряет такое же количество тепла за счет излучения, как и в реальном неоднородном пространстве [10]. Данный показатель необходим при расчете комфортной температуры воздуха в помещении, что делает его основным при моделировании тепловой среды.

По сравнению с другими неизученными вопросами, расчет уровня комфорта в атриуме имеет две трудности:

- солнечная радиация, попадающая в атриум которая оказывает значительное влияние на тепловой комфорт и расчет средней радиационной температуры;
- сильная температурная стратификация.

Внутренняя тепловая среда обычно неравномерно распределена по объему именно из-за нее. Соответственно, для точного расчета недостаточно только средней температуры внутри атриума.

Поэтому, для того чтобы сделать точный вывод о комфортности тепловой среды необходимо прибегать к CFD (Computational fluid dynamics) программам – вычислительным программам динамики жидкости. Методы гидродинамики часто используют в аэродинамике

CFD – вычислительная гидродинамика, предназначенная для вычисления характеристик потоковых процессов. В ее основе лежит формулировка 4 основных уравнений динамики потоков [84]:

- уравнения неразрывности;
- уравнения сохранения импульса;
- уравнения сохранения энергии;
- уравнения состояния.

Впрочем, для получения достоверных результатов расчета необходимо разделение расчетного пространства на маленькие сетки, для каждой из которых поверхность будет являться однородной. Таким образом, параметры окружающей среды для каждой ячейки сетки можно изучать отдельно, используя вышеназванные уравнения.

Недочеты инженерных расчетов и новая методика моделирования теплового комфорта в атриумах была представлена в исследовании британских ученых [80]. В качестве модели их исследования был выбран гексадрэ с сеткой 16 х 16 и высотой 1,6 м [80] и был выведен метод расчета средней радиационной температуры (MRT) и проведен CFD анализ (анализ, проводимый методами вычислительной гидродинамики).

Традиционные методы расчета средней радиационной температуры (MRT) основываются на абсолютной температуре и виде окружающих поверхностей в заданной точке. Согласно им, средняя радиационная температура может быть выражена следующим уравнением [80]:

$T_{mrt} = \sqrt[4]{\sum_{i=1}^{6}(F_i T_i^4)}$, где T_{mrt} – средняя радиационная температура, F_i – коэффициент положения точки, интересующей поверхности, T_i – температура поверхности i. Эта формула не учитывает влияние солнечной радиации и таким образом, не может быть применена к атриумным пространствам. На основе механизма передачи радиационного нагрева был выведен новый алгоритм расчета средней радиационной температуры (MRT), принимающий в расчет солнечную радиацию, как показано в следующем уравнении [80]:

$$T_{mrt} = \sqrt[4]{\sum_{i=1}^{6}(F_i T_i^4)} + \frac{C_{dn}}{\varepsilon\sigma}(\alpha_{irr,d}\sum_{J=1}^{M} F_j I_{d,j} + c_S \alpha_{irr,b} f_p I_b),$$

где T_{mrt} – средняя температура излучения для заданной точки, F_i –фактор, представляющий положение относительно интересующей поверхности i, T_i – температура поверхности i, C_{dn} – коэффициент, учитывающий время суток «день-ночь» (равный 1 в дневное время суток, 0 – ночью), C_s – коэффициент затенения (равный 1, когда заданная точка попадает под солнечный луч, 0 в других случаях),

ε – способность человеческого тела излучать теплоту, σ – постоянная Стефана-Больцмана, $\alpha_{irr,d}$ и $\alpha_{irr,b}$ коэффициенты излучения поглощенной прямой и рассеянной солнечной энергии.

Из приведенного выше уравнения видно, что теплообмен состоит из трех частей – излучения от стены, прямого излучения от солнца и рассеянного солнечного излучения. Характеристики стены определяются с помощью фактора положения и температуры поверхности. Характеристики, зависящие от солнца, определить сложнее, так как необходимы значении коэффициентов C_s и C_{dn}. Алгоритм расчета MRT может быть представлен в следующем виде (Рисунок 1.33) [80]:

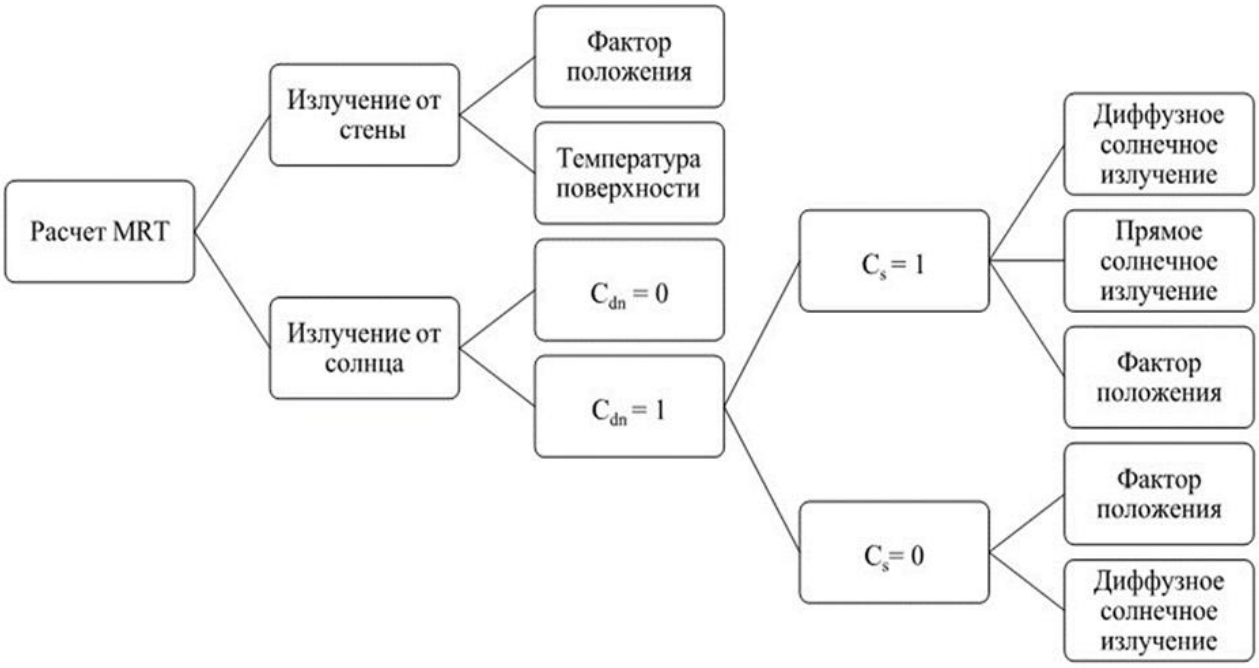


Рисунок 1.33 – Алгоритм расчета средней радиационной температуры (MRT)

Все коэффициенты, кроме фактора положения, вычисляются относительно легко. Для расчета последнего существует два вида алгоритмов: расчет для вертикальных поверхностей (стены) (Рисунок 1.34), для горизонтальных поверхностей (крыша и пол) (Рисунок 1.35).

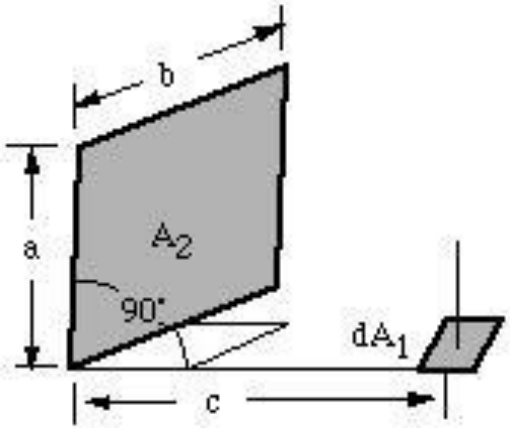


Рисунок 1.34 – Иллюстрация расчета коэффициента положения для стены.

Для стен коэффициент положения можно рассчитать так [80]:

$$F = \frac{1}{2\pi}\left[\tan^{-1}\left(\frac{1}{c}\right) - \frac{c}{y}\tan^{-1}\left(\frac{1}{y}\right)\right], \text{ где } A = \frac{a}{b};\ C = \frac{c}{b};\ Y = (A^2 + C^2)^{0.5}$$

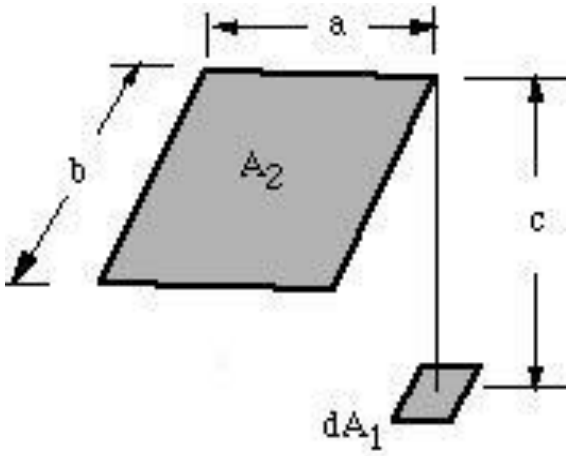


Рисунок 1.35 – Иллюстрация расчета коэффициента положения пола или крыши.

Для горизонтальных поверхностей коэффициент положения может быть рассчитан по формуле [80]:

$$F = \frac{1}{2\pi}\left\{\frac{A}{(1+A^2)^{0.5}}\tan^{-1}\left[\frac{B}{(1+A^2)^{0.5}}\right] + \frac{R}{(1+B^2)^{0.5}}\tan^{-1}\left[\frac{A}{(1+B^2)^{0.5}}\right]\right\}, \text{ где } A = \frac{a}{c};\ B = \frac{b}{c}$$

Как указывалось выше, распределение температуры воздуха в атриумах обычно неравномерно из-за сильной стратификации. В этом случае для расчета температуры используют CFD анализ.

Данное исследование и предложенный метод расчета выявили некоторые закономерности:

- большее влияние на среднюю радиационную температуру (MRT) имеет солнечное излучение, а не температура поверхности;
- значение средней радиационной температуры (MRT) больше у той поверхности, которая больше всего освещается солнцем, в сравнении с плоскостью, которая не освещается;
- температура поверхности крыши не имеет существенного влияния на температуру воздуха на заданной высоте. даже если температура поверхности крыши повышается до примерно 50 градусов в час дня, самая высокая температура на заданной высоте составляет 34°C, что тоже велико по сравнению с температурой поверхности пола.

1.3 Влияние атриума на внутреннюю среду смежных помещений

1.3.1. Тепловой комфорт в атриуме и в смежных помещениях

В атриумах на систему кондиционирования возлагается не только обеспечение комфортных условий там, где находятся люди (чаще всего, в нижней части помещения), но и ограничение распространения тепла в верхней части атриума и смежных с ним помещений в летний период.

Состояние воздушной среды в помещениях, выходящих в атриум, зависит: от температурно-влажностных условий и перемещения воздушных масс в основном пространстве атриума. Особенно эта зависимость проявляется в административных зданиях и торговых центрах. На верхних уровнях возникает, тенденция застаивания теплого воздуха, исходя из этого в таких помещениях необходимо устройство системы приточно-вытяжной вентиляции для предотвращения и накопления нагретого внутреннего воздуха.

Эта же система будет работать и при возникновении пожара, так как будет вытягивать дым и образующиеся газы через весь объем атриума.

В том случае, если смежные помещения физически отделены от основного атриума и оборудованы независимыми системами вентиляции и

кондиционирования, также необходимо учитывать передачу тепла из-за разницы температур в смежных помещениях и атриуме.

1.3.2. Влияние озеленения атриумов на качество воздушной среды

Качество воздуха в атриуме является одним из важных факторов, от которого зависит комфортная внутренняя среда помещения. Вследствие работы оборудования, электроприборов и собственных жизненных процессов людей воздушная среда в помещениях зданий иногда может быть некомфортной для человека. В общественных и административных зданиях нередко через атриум проходят табачный дым, запахи и пыль. Установка систем фильтрации и изоляция или нейтрализация источников загрязнения позволит улучшить качество воздуха. Однако, озеленение внутренней среды атриумов зданий является одним из наиболее экологически безопасных мероприятий, улучшающих качество внутреннего воздуха, снижающих уровня шума и создающих приятную атмосферу. Озеленение атриумов позволит улучшить качество воздуха и сократить потребление энергии на работу системы вентиляции.

Первым зданием с атриумом, получившим всемирную известность, был Хрустальный дворец в Лондоне. Этот павильон, построенный для Всемирной выставки 1851 года, был спроектирован не архитектором, а профессиональным садовником Джозефом Пакстоном, имевшим большой опыт в устройстве оранжерей. Это стало началом всемирной тенденции строительства зданий со стеклянными крышами и роскошными внутренними садами. Уже в 1970-х и 1980-х годах начался бум строительства огромных небоскрёбов и отелей с зелёными атриумами во всю высоту здания, которые выглядели как оазисы в перенаселённом городе. В них были тропические растения, такие как поль мы и лианы, фонтаны и водопады, и другие элементы, имитирующие природу.

Исследования показывают, что наличие растений может способствовать улучшению качества воздуха за счёт удаления загрязняющих веществ и повышения уровня кислорода, и что контакт с природой, включая комнатные растения, может положительно влиять на психическое здоровье и благополучие человека. Таким образом, озеленение атриумов имеет ряд экологических, эстетических,

психологических преимуществ. Эффективность озеленения атриумов зависить в основном от типа растений, формы и размеров атриума и условий освещения и вентиляции, что в свою очередь зависит от размеров и расположения вентиляционных отверстий (Рисунок 1.36).



Рисунок 1.36 – Озеленение торговых центров

Фитодизайн является научно обоснованным внедрением растений в проектирование помещений с учётом их биологической совместимости, экологических характеристик и способности улучшать качество воздуха в помещении (Рисунок 1.37). Его теоретическое обоснование получило в работах А.М. Гродзинского (1984) и его развитием занимаются во разных научных институтах России [36, 37, 38, 39]. Оценка параметров внутренней среды осуществляется в соответствии с нормативными документами: СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение» [27], ГОСТ 30494-2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» и Постановление 28. Санитарные правила 2.4.3648-20. СП 2.4.3648-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к организациям воспитания и обучения, отдыха и оздоровления детей и молодежи» [7, 24].

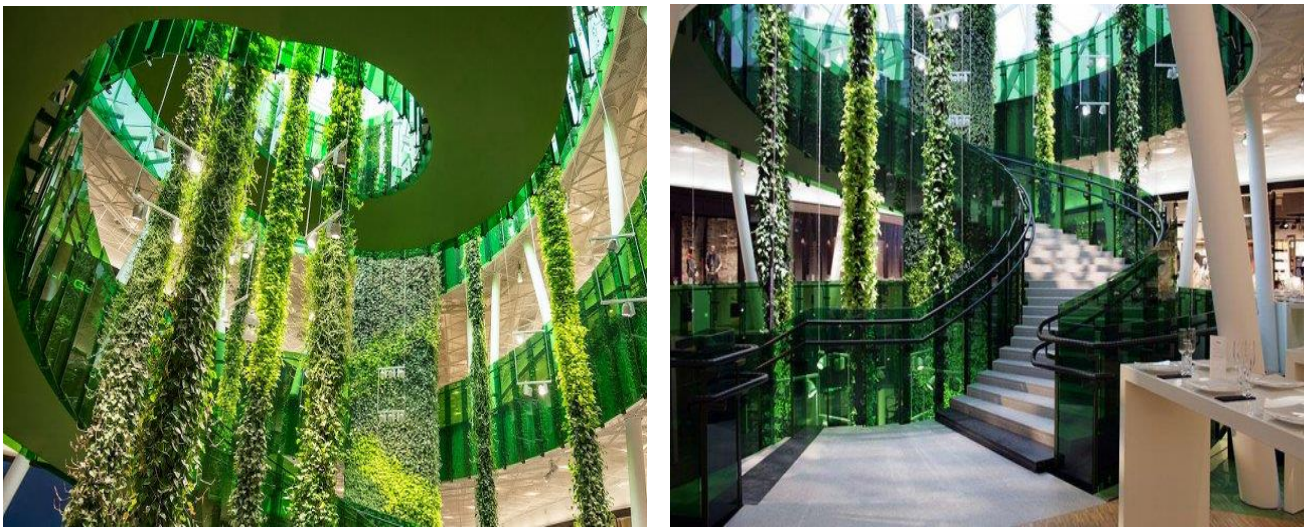


Рисунок 1.37 – Фитодизайн атриума

В исследовании Крестинина Н.В., 2012 [17], связанного с влиянием искусственной экосистемы на параметры искусственной среды, было выделено, что в отапливаемый период в помещениях, где есть растения и в помещениях до установки растений уровень температуры и относительная влажность воздуха были одинаковыми, а значения не соответствовали санитарным нормам, предъявляемым к воздушно-тепловому режиму учебных помещений (Постановление 28. Санитарные правила 2.4.3648-20. СП 2.4.3648-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к организациям воспитания и обучения, отдыха и оздоровления детей и молодежи»). В работах Сидоренко В. Ф., Рябова С. Н., 2005 говорится об увлажняющей способности влияния растений на микроклимат помещений, которая была подтверждена экспериментально с помощью математических расчетов. Сокращение микроорганизмов в воздухе в лабораторных аудиториях благодаря выделению фитоорганических веществ растениями было отмечено в работах Н. В. Казариновой, Н. В. Цыбули, Л. Ф. Казначеевой (1997); А. Е. Коверга и др. (1964); Т. В. Старовойтовой, Е. С. Лахно, В. А. Ярошенко (1964). Было установлено, что благодаря способности растений выделять специфические вещества – компоненты эфирных масел, внутри помещений достигается санирующий эффект и поглощается бензол.

Таким образом, в результате озеленения помещений во внутренней среде характеристики микроклимата помещений изменяются: качество воздуха

улучшается, изменяется его химический состав, количество бактерий в воздухе уменьшается на 60 %, температура опускается до 16 ºС, а влажность воздуха увеличивается на 10 %, что создает комфортные условия для деятельности [17].

Спрогнозировать качество воздуха внутри атриумного здания можно еще на этапе проектирования. Учитывая, что внутренняя среда здания и окружающая его атмосфера, это единая динамическая система. Аэродинамический режим застройки и уровень загрязнения наружного воздуха влияют на качество воздуха внутри атриумного здания. Таким образом, можно спрогнозировать качество воздуха внутри атриума еще на этапе проектирования. Для решения этой задачи эффективно применяются методы CFD (методы вычислительной гидродинамики).

1.4 Энергоэффективность атриумов

В настоящее время энергоэффективность и энергосбережение ставятся во главу угла при проектировании и строительстве зданий по всему миру [61]. В отличии от развитых стран, где на здания приходится от 40 % до 45 % энергопотребления и около 50 % общего годового выброса CO_2, большая часть выбросов которого связана с системами отопления и кондиционирования воздуха, в развивающихся странах, таких как Вьетнам, потребление энергии при проектировании и строительстве зданий значительно ниже (менее 15%). Однако ожидается, что быстрый экономический рост в этих станах приведет к существенному увеличению потребления энергии в этих отраслях в ближайшем будущем.

Наряду с национальными стандартами все более широкое применение получают независимые рейтинговые системы оценки экологической и энергетической устойчивости зданий, призванные повысить престиж энергоэффективных зданий, сертифицируя их по определенным критериям [15]. Наиболее известными и популярными являются системы экологической оценки, такие как стандарты BREEM (Великобритания), LEED (США), Green Star

(Австралия), Estidama (Ближний Восток) (в основном характерен системой оценки дневного освещения и архитектурного решения) [61].

Россия приступила к разработке собственных национальных стандартов «зеленых» зданий и оценки энергоэффективности зданий. Первым таким стандартом является ГОСТ Р 54964-2023 «Оценка соответствия [8]. Экологические требования к недвижимости». Помимо национального стандарта, существует еще российская рейтинговая система Green Zoom. В большинстве опубликованных литературных источников отмечается, что летом в регионах с умеренным климатом в зданиях с атриумами наблюдается перегрев под воздействием солнечной радиации, что создает значительный дискомфорт для людей. В тропиках, например, во Вьетнаме, атриумное пространство большую часть года находится в состоянии избыточного тепла. Для обеспечения комфорта пользователей атриум должен быть полностью кондиционирован. Это приведет к высоким энергозатратам на охлаждение, поскольку погода здесь жаркая круглый год. Проектирование атриумного здания с учетом энергетических аспектов приведет к значительному повышению энергоэффективности по сравнению со строительством обычных зданий. В работе [2] подтверждено, что неправильное проектирование зданий с высоким уровнем остекления приведет к значительным потерям энергии и дискомфорту. Многие авторы выступают против общепринятого мнения о том, что наличие атриума в здании автоматически снизит энергопотребление здания; они считают, что атриумы не всегда снижают энергопотребление, а могут и увеличивать его. Несмотря на это строительство зданий с атриумами продолжается и увеличивается.

Атриум стал основной частью большинства общественных и торговых зданий во всем мире. Правильное устройство атриума в торговых зданиях позволяет экономить энергию, обеспечивая хорошее естественное освещение, хорошую, естественную вентиляцию и буферную зону между внутренней и внешней средой. Атриум может иметь большой потенциал для обеспечения тепловой эффективности и эффективности дневного освещения, снижая затраты на электрическое освещение, максимально используя пассивную энергию солнца и

уменьшая зависимость от механических систем кондиционирования и вентиляции [102].

Одна из самых актуальных проблем современной архитектуры – проблема энергоэффективности и энергосбережения в зданиях. Исследования характеристик конечного использования электрической нагрузки высотных кондиционируемых офисных зданий показали, что на кондиционирование и искусственное освещение приходится 30 % – 60 % и 20% – 35% от общего потребления электроэнергии в здании, соответственно [13]. Годовое потребление энергии в европейских офисных зданиях варьируется от 100 до 1000 кВт-ч/м^2 кондиционируемой площади, в зависимости от местоположения, конструкции, установок ОВКВ и освещения, использования и типа офисного оборудования, графиков работы и т. д. [58]. Существует необходимость более тщательного рассмотрения вариантов пассивного решения (например, форма здания, ориентация и ограждающие конструкции) и улучшения качества воздуха в помещениях с помощью естественных средств.

На сегодняшний день проведены ряд исследований, посвященных поиску оптимальной геометрии атриума для различных условий. Результаты показали, что энергопотребление узкого вытянутого атриума или прямоугольного атриума с большим отношением длины к ширине значительно больше, чем у атриума квадратной формы [16, 49, 106]. Также отмечено, что расположение вытяжных отверстий, которые создают прямой вентиляционный поток, может улучшить внутренний микроклимат. Существуют и другие параметры проектирования, такие как размер приточных и вытяжных отверстий вентиляции, их количество, оптимальное соотношение их площадей и так далее, которые влияют на распределение температур в атриумном пространстве. Форма атриума влияет на нагрузки на отопление и охлаждение, которые определяют общие энергетические характеристики здания. Во всех климатических регионах влияние геометрии атриума оказалось более очевидным в атриумах вытянутой формы, что объясняется размером светового люка, подверженного воздействию условий окружающей среды. Атриум с длинными сторонами, обращенными на юг и север, скорее всего,

будет подвержен большему воздействию прямой солнечной радиации и влиянию других погодных условий. Поэтому, в зависимости от климата, типа и соотношения остекления, такие здания, как правило, будут требовать больше мощности для обогрева и охлаждения и ежегодно потреблять больше энергии. Атриумы с большим отношением высоты к размерам в плане подвержены большей температурной стратификации и вызывают высокий эффект тяги. Чем больше высота (н), тем больше эффект тяги, что видно на (Рисунке 1.38), а большая дифференциация температур на выходе и входе повышает скорость воздуха [54, 101].

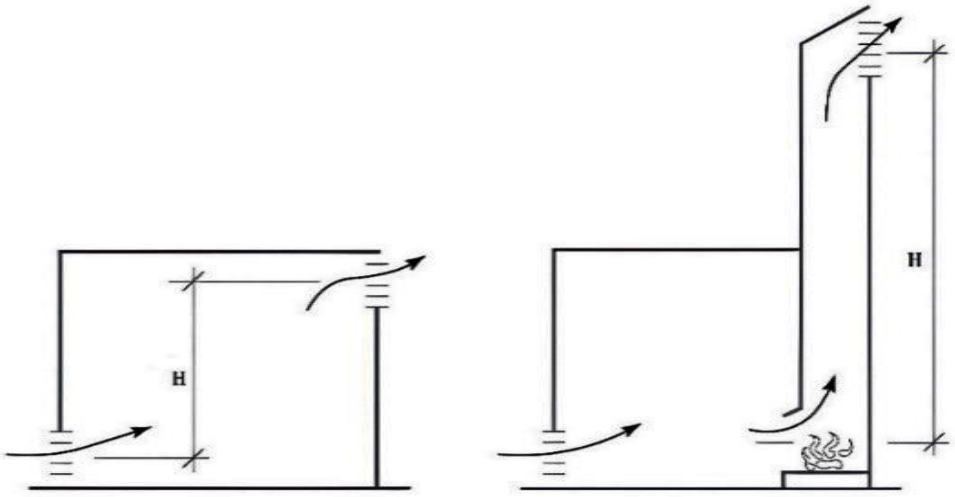


Рисунок 1.38 – Эффект тяги в помещении и в дымовой трубе в зависимости от расстояния между приточным и вытяжным отверстиями (н)

Несмотря на многочисленные исследования, демонстрирующие преимущества атриумов, включая их энергоэффективный потенциал в снижении потребности здания в искусственном освещении и охлаждении, как следствие, в снижении тепловой нагрузки, их тепловые характеристики крайне сложно прогнозировать [90].

Таким образом, в настоящее время остается еще много неисследованных вопросов для усовершенствования атриума в целях экономии энергии. При этом, размеры, площадь и расположение приточных и вытяжных отверстий атриума являются важным фактором его энергоэффективности, который необходимо учитывать при его проектировании в первую очередь.

1.5 Выводы по главе 1

В данной работе представлен обзор предыдущих исследований об атриумных пространствах. Обзор показывает, насколько сложно и уникально проектирование атриумов, и каким образом данные виды конструкций отвечают принципам энергоэффективности.

Целями данной диссертационной работы были:

- собрать воедино всю историю развития атриумов и их прототипов из разных стран;
- проанализировать отечественный и зарубежный опыт применения атриумных пространств при строительстве жилых и общественных зданий;
- выявить упущения и нераскрытые ранее вопросы, касаемые проектирования атриумных зданий, и попытаться раскрыть их.

Проектировщик при выполнении задания должен руководствоваться нормативными документами. При сборе информации, было выявлено, что для проектирования атриумных зданий необходимо руководствоваться целым рядом сводов правил и еще пока актуальной нормативной документации. Однако ни в одном из них комплексно не описываются все необходимые требования для атриумов. Технические и физические требования очень разнообразны. Охватить их все в одном исследовании было невозможно. Поэтому мы ограничились малоисследованными вопросами, которые имеют большое влияние на внутреннюю среду атриумов.

Во второй главе работы было проведено натурное исследование внутренней среды типичного атриума и описаны возможности естественной вентиляции в нем. Предложен вариант климатизации атриума на основе аэродинамической тяги, создаваемой за счет необходимого соотношения приточных и вытяжных вентиляционных отверстий с учетом высоты атриума и его размеров в плане.

ГЛАВА 2. НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВОЗДУШНЫХ ПАРАМЕТРОВ В АТРИУМЕ ЗДАНИЯ УЛК-МГСУ В ГОРОДЕ МОСКВА В ЖАРКИЙ ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

2.1 Общая характеристика климатических условий в городе Москве

Согласно СП 131.13330.2020 «Строительная климатология», территория Москвы относится к зоне II-В [25]. Москва расположена на 55,8° северной широты и 37,6° восточной долготы. Город Москва расположен в умеренном климатическом поясе, что предполагает наличие всех четырех сезонов года. Лето обычно теплое и влажное, длится около трех месяцев. Средняя температура воздуха в летние месяцы колеблется от 15 °С до 25 °С. Июль – обычно самый теплый месяц в году, со средней температурой около 30 °С. Однако могут быть и жаркие дни с температурой до 35 °С. Ночью же температура может опускаться до 15 °С, а средняя максимальная относительная влажность воздуха составляет 86 %. В декабре-январе наблюдается максимум влажности (86 %), а минимум – в мае (67 %). В это время также наблюдаются сильные ливни и грозы, хотя количество дождливых дней не очень велико. Осень длится около двух месяцев в течение всего года. Этот период характеризуется понижением температуры, дни становятся короче, а ночи длиннее. Средняя температура в осенний период составляет около +10 °С и может подниматься вплоть до +15 °С а то и +25 °С в дневное время, когда наступает так называемое «бабье лето». Зима в Москве холодная и сухая и длится с конца ноября по конец марта. Территория Москвы относится к району активной ветровой деятельности. Среднегодовая скорость ветра составляет 2,3 м/с. Число дней со сильными ветрами (штормами) со скоростью более 15 м/с достигает 35 дней в году. Штормовые ветры бывают редко и могут достигать ураганной силы до 25-40 м/с, см. таблицу 2.1.

Солнечная активность в Москве изменяется в зависимости от времени года. В летние месяцы световой день продолжается примерно 17-18 часов, в то время как зимой солнце светит всего лишь около 5-6 часов в день. Наибольшее количество

солнечных дней отмечается в июне, июле и августе, когда их количество достигает 21 ясного дня в месяц. В этой работе мы рассматриваем только летние условия, при которых температурно-влажностный режим наиболее соответствует условием Вьетнама. Для своей работы я выбрала наиболее жаркие летние дни, когда влажность и температура воздуха наиболее соответствуют тропическим условиям.

Среднегодовое количество осадков, которые выпадают в основном летом и ранней осенью, составляет от 600 до 800 мм. Июнь и июль являются самыми дождливыми месяцами, когда выпадает около 80 мм осадков. При этом температура составляет до 30 °C, а влажность до 86 %.

Таблица 2.1 – Основные климатические характеристики г. Москвы

Месяц	**Средняя температура (°C)**	**Средняя влажность (%)**	**Скорость ветра (м/с)**	**Количество солнечных дней**	**Солнечная радиация на горизонтальную поверхность (кВт.ч/м2)**	**Количество дождливых дней (осадков)**
Январь	−6.6	85	2.1	1	16.4	0 дней (28.5мм)
Февраль	−6	81	2.1	2	34.6	1 день (17.8мм)
Март	−0.7	73	2.0	4	79.4	1 день (29.7мм)
Апрель	+7	66	2.0	9	111.2	2 дня (45.6мм)
Май	+13.6	66	1.8	15	161.4	6 дней (53.6мм)
Июнь	+17.2	69	1.5	15	166.7	5 дней (51.8мм)
Июль	+20.2	72	1.4	18	166.3	6 дней (60.1мм)
Август	+18	75	1.4	21	130.1	4 дня (32.2мм)

Месяц	**Средняя температура (°C)**	**Средняя влажность (%)**	**Скорость ветра (м/с)**	**Количество солнечных дней**	**Солнечная радиация на горизонтальную поверхность (кВт.ч/м2)**	**Количество дождливых дней (осадков)**
Сентябрь	+12.1	81	1.4	12	82.9	3 дня (43.8мм)
Октябрь	+5.9	83	1.7	5	41.4	3 дня (27.0мм)
Ноябрь	0.0	85	1.9	6	18.6	0 дней (34.0мм)
Декабрь	−3.9	86	2.1	0	11.7	0 дней (33.2мм)

При проектировании зданий с атриумами необходимо учитывать данные климатические условия, которые летом создают дискомфорт в помещении атриуме. Например, чтобы обеспечить комфортную температуру внутри помещения потребуется большой расход энергии на кондиционирование воздуха в жаркие летние дни. Поэтому исследования, связанные с климатическими условиями и их влиянием на внутренние пространства зданий и проектирование атриума, необходимы для повышения энергоэффективности и создания комфортной среды для людей. В целом, погода жаркого периода климата Москвы в летние месяцы с апреля по октябрь по температуре очень похожи на погодные условия жаркого и влажного тропического климата Вьетнама. Средняя максимальная температура воздуха колеблется от 24 °C до 34 °C, а относительная влажность обычно превышает 80 %. Поэтому натурные исследования были проведены в июле 2021 года, чтобы условия измерений отражали ожидаемое тепловое поведение в атриуме, как если бы он был расположен в Хошимине (Вьетнам). В данной работе мы рассмотрим летние условия в атриуме. Они наиболее подходят для условий в жарких странах, таких как Вьетнам.

В связи с этим необходимо учитывать данные климатические условия при проектировании и оптимизации площади вентиляционных проемов в атриумных зданиях Москвы. В жаркие летние дни потребуется расходование энергии на систему кондиционирования воздуха. Для повышения энергоэффективности и создания комфортной среды необходимы исследования, включающие анализ влияния климатических факторов на тепловой режим объекта с целью снижения энергозатрат на охлаждение и обогрев теплых объектов здания. Также необходимо проводить исследования, связанные с климатом и его влиянием на внутренние пространства зданий, включающие анализ воздействия климатических факторов на тепловой режим помещений и энергоэффективность зданий.

2.2 Исследования тепловых и воздушных характеристик атриумов и прилегающих помещений, опубликованные в зарубежной литературе

Рассмотрим три типа атриумов.

Согревающий атриум – это тип атриума, который используется в зданиях, где требуется больше тепла. Режим вентиляции для этого типа называется «Атриум в здании». Воздух поступает из атриума во внутреннюю часть здания. Это означает, что атриум поглощает значительное количество солнечного тепла, в результате чего его температура становится выше, чем в основном здании. Исследования показали, что атриум может быть местом прямого притока тепла благодаря своему парниковому эффекту [113]. Данный эффект возникает, когда короткие волны солнечного изучения попадают в атриум, ударяются о поверхности предметов, трансформируются в длинные волны и, задерживаясь в замкнутом пространстве не выходят через стекло наружу. Как показано (На рисунке 2.1), согревающие атриумы закрыты стеклянной крышей. Согласно результатам проведенного моделирования, как и ожидалось атриум с открытым верхом увеличивает отношение поверхности здания к его объему, что приводит к большей подверженности здания внешним условиям и большим потерям тепла [103]. Следовательно, для обеспечения потребностей в отоплении требуется больше

энергии. Напротив, закрытый застекленный атриум может сделать внутреннюю среду более теплой, чем атриумы с открытым верхом. Талегани и др. (2014) утверждают [104], что внутренние дворы или атриумы с открытым верхом приводят к еще большим потерям тепла в холодные зимние дни по сравнению со зданиями без атриумов из-за большей подверженности фасада внешним условиям. Таким образом, согревающие атриумы используются в климатических условиях континентального климата с холодным и солнечными зимами и не очень жарким летом.

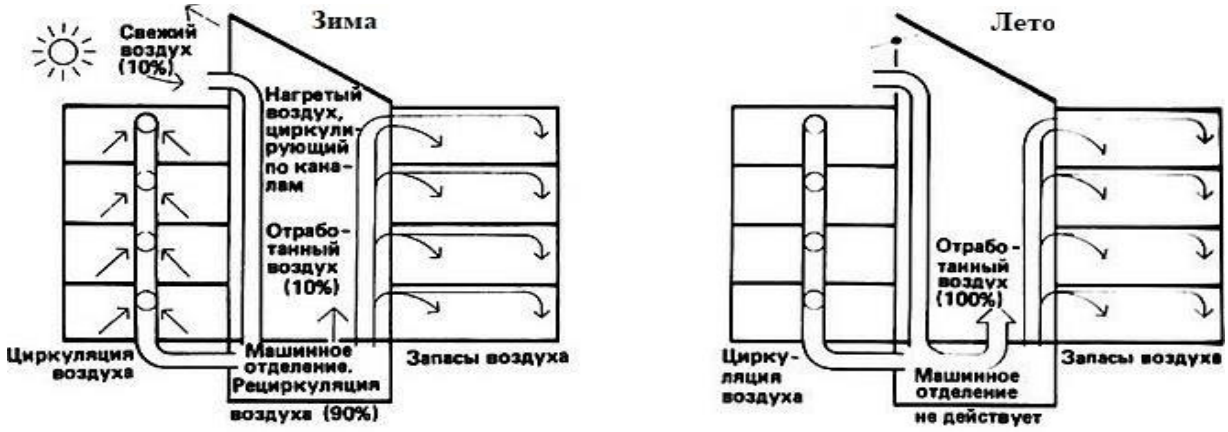


Рисунок 2.1 – Атриум, приспособленный для обогрева здания

Согревающий атриум рассчитан на свободное проникание солнечного света. Как правило, температура воздуха летом в нем градусов на пять выше, чем в окружающей атмосфере [23]. Даже в облачную погоду температура примерно на два градуса выше, чем снаружи в дневное время благодаря теплу, попадающему в атриум из прилегающих помещений. Поэтому использование согревающего атриума уменьшает отопительный сезон в прилегающих помещениях. Это, в свою очередь, ведет к экономии энергии.

Отопление здесь необходимо в течение девяти месяцев в году, а кондиционирование воздуха – только в специальных случаях, обусловленных планировкой, конструкциями или функциональными особенностями сооружений. В последнее время явственно ощущается тенденция к возможно большему снижению затрат на искусственное освещение и охлаждение помещений.

Охлаждающий атриум – это тип атриумов, используемых для снижения теплопоступлений в зданиях. Они обладают противоположной функцией по сравнению с согревающими атриумами.

Охлаждающие атриумы сосредоточены на снижении теплопоступлений, поэтому рекомендуется, чтобы остекление было ориентировано в сторону от чрезмерных солнечных лучей, минимизировано или затенено [98]. Существует много исследований о том, как вентилируются атриумы и как они помогают вентиляции в прилегающих помещениях. Две основные движущие силы, создающие воздушный поток в вентилируемых атриумных зданиях, а именно: вентиляция, обусловленная температурной тягой, и вентиляция, вызванная ветром. В течение дня атриум должен функционировать как холодильная камера, удерживая в своем объеме запас охлажденного воздуха. Там, где перепад дневной и ночной температур достаточно резок, атриум может использоваться как резервуар охлажденного ночного воздуха, накопленного предыдущей ночью и не используемого для обычных вентиляционных целей. Этот принцип соответствует исторически сложившемуся способу эксплуатации атриумных сооружений в арабских странах: глубокие дворы сохраняют свежий ночной воздух и охлажденные стены, и в течение жаркого дня атриум используется как воздухообменный резервуар здания [23]. Теплоизоляция наружного ограждения в охлаждающих атриумах не представляет проблем. Как правило, конденсат на внутренних поверхностях остекления отсутствует благодаря движению воздуха у остекления. Охлаждение достигается использованием самой воздушной массы и солнцезащитными шторками, а не путем усиления изолирующих свойств остекления.

Трансформируемый (конвертируемый) **атриум** эффективен при защите от летнего перегрева помещений, а также используется в отопительном сезоне. Основной особенностью такого атриума является система буферной зоны. Основной целью атриума является пропуск солнечных лучей зимой, когда угол подъема солнца над горизонтом небольшой, и препятствие прямому попаданию солнечных лучей летом, когда солнце стоит высоко. Трансформируемый

(конвертируемый) атриум (Рисунок 2.2) может быть использован как буферная зона и для отопления в зимнее время. Летом схемой защита от солнца является ориентация остекления атриума в сторону, противоположную максимальной солнечной радиации.

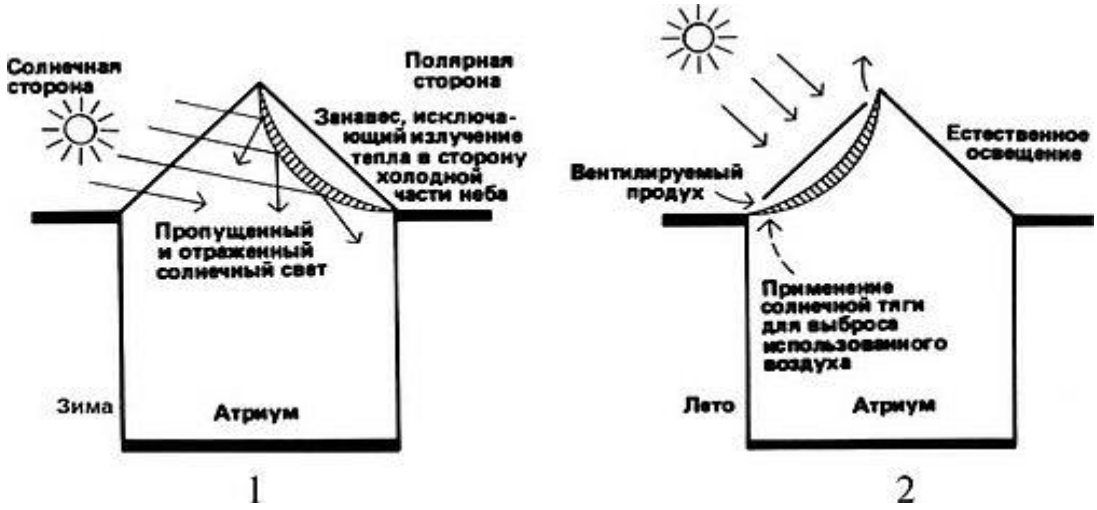


Рисунок 2.2 – Атриум, трансформируемый в зависимости от времени года: 1 – теплозащитный занавес, в зимнее время заменяет двойное остекление; 2 – теплозащитный занавес, в летнее время препятствует попаданию прямого

Система вентиляции с помощью тяги воздуха, подробно каминной трубе.

В помещениях, имеющих отверстия для выхода в вертикальное пространство, такое как атриум или дымоход, создается эффект тяги. Движущие силы естественной вентиляции зависят от ветрового воздействия, тепловой тяги эффект дымовой трубы и их сочетания в зданиях [98]. Возникающий эффект тяги, оказывает значительное влияние на тепловой режим помещения [89]. Вентиляция, осуществляемая только за счет сил тяги, как правило, является наихудшим вариантом естественной вентиляции, особенно в теплый и безветренный день. По результатам исследований [87], эффект тяги может быть использован для поддержания приемлемого уровня комфорта в помещении путем выпуска нагретого воздуха из помещения в атриум и затем наружу. Тем не менее важно понимать, какие факторы способствуют этому эффекту. Помимо температуры, сопутствующими факторами, создающими эффект тяги, являются перепады высот между низко расположенными приточными и высоко расположенными

вытяжными отверстиями атриума [86]. По результатам исследования, факторами, влияющими на вентиляцию с эффектом тяги, также являются снижение уровня приточных отверстий, повышение уровня вытяжных отверстий и тепла, причем оптимальным расположением вытяжных отверстий является вершина атриума. Однако эта система имеет ограничение: она может привести к тепловому дискомфорту для людей, находящихся на верхних этажах здания, из-за скопления теплого воздуха в верхней части атриума. Это привело к тому, что атриумы нашли широкое применение во многих многоэтажных административных зданиях. В данном случае атриум обладает такими преимуществами, как высота помещения и источник тепла, отводящий теплоту от большого количества движущихся людей. Большая разница давлений внутри и снаружи приводит к эффективной естественной вентиляции. На практике между низко расположенным входом наружного воздуха и высоко расположенным выходом его из помещения возникает тепловая стратификация [68]. Основной задачей при проектировании вентиляции является обеспечение достаточной скорости вентиляции. Поэтому при проектировании естественной вентиляции всегда уделялось внимание температурной стратификации и скорости удаления во внешнюю среду нагретого воздуха, обусловленного тягой. Однако очевидно, что состояние вытяжного проемов (открыто/закрыто) оказывает существенное влияние как на внутренние температуры, так и на воздушный поток через здание атриума. Так, например, открытые вентиляционные отверстия проводят через модель почти в два раза больше воздуха и уменьшают вертикальный градиент температуры на 7°C [83]. В случае закрытых вентиляционных проемов изменяется схема движения потока, и воздух через приточные проемов на верху выходит в окружающие помещения на верхних этажах. При этом расположение выходного отверстия оказывает меньшее тепловое воздействие на атриум. Однако расположение приточных отверстий между атриумом и окружающими помещениями оказывает значительное влияние на характер движения воздуха. Поэтому при закрытых вытяжных проемах это может направлять поток наружного воздуха в зону кондиционирования. Это приводит к большому расходу электроэнергии. Кроме того, низкое соотношение

площадей притока и вытяжки при естественной вентиляции в атриуме, обусловленной тягой, увеличивает скорость воздушного потока в здании.

В то время как в исследованиях рассматривались различные параметры проектирования для улучшения тепловых характеристик атриума, такие как влияние конструкции проемов [45, 96], различные геометрические параметры атриума [48, 76] или формы крыши атриума, материалов и характеристик остекления [94], были предприняты некоторые специальные попытки оценить тепловые характеристики атриумов с различными проемами (размер, расположение и состояние). Для этого Лин и Линден [81], Холфорд и Хант [64], Ванг и Хуанг [107] использовали отдельно теоретические и экспериментальные методы. Среди всех этих аспектов размер вытяжного отверстия является наиболее влиятельным параметром, который влияет как на тепловой режим в помещении, так и на естественную вентиляцию атриума и, соответственно, снижает нагрузку на энергопотребление.

В общем случае с увеличением размера приточных отверстий значительно уменьшается температурная стратификация воздуха в атриуме [78]. Однако соотношение приточных и вытяжных отверстий имеет большое значение для обеспечения мощного и хорошо распределенного воздушного потока по всему зданию. Например, в умеренном климате работающий за счет тяги атриум может усилить воздушный поток по всему этажу, если только его верхние отверстия будут среднего размера, а нижние отверстия будут достаточно малы. В тропических регионах с напорной вентиляцией достаточно высокое отношение площади вытяжных отверстий к площади приточных отверстий (n >1) может привести к улучшению теплотехнических характеристик на других уровнях, занимаемых жильцами [105]. Кроме того, увеличение количества приточных отверстий увеличивает скорость воздушного потока через атриум, но уменьшает скорость воздушного потока через каждый этаж, что приводит к повышению температуры практически на всех высотах здания [105].

На сегодняшний день тщательное изучение тепловых характеристик атриума ограничено из-за неточностей и ограничений доступных инструментов

прогнозирования и контролируемых экспериментов. Предположение о том, что температура в атриуме одинакова в большинстве аналитических работ, не может должным образом отражать реальную ситуацию. Исследования влияния площади приточных и вытяжных отверстий на улучшение тепловых характеристик, повышающих эффективность естественной вентиляции при стратегии пассивного охлаждения атриума, до сих пор не были достаточно изучены. Среди различных исследований тепловых характеристик атриумов лишь немногие посвящены изучению реальных тепловых условий внутри атриума с помощью натурных измерений и мониторинга [90, 97]. Многие из соответствующих исследований были посвящены проверке аналитических методов. По сравнению с другими подобными объектами, исследованные параметры атриумов с естественной вентиляцией были далеки от адекватных. В связи с этим необходимы дальнейшие исследования инновационных решений для атриумов с естественной вентиляцией и разработка надежных методик испытаний. По сравнению с эффектом ветра, эффект тяги, который опирается на теплоту внутри помещения, обеспечивает более надежное управление воздушным потоком. Кроме того, он позволяет более надежно прогнозировать эксплуатационные характеристики на стадии проектирования [97]. Напротив, в простых зданиях естественная вентиляция, вызванная ветром, может создавать более сильное движение воздуха внутри здания, а вентиляция, вызванная эффектом тяги, обеспечивает более равномерное распределение потока воздуха в здании.

Поскольку сила тяги не слишком сильна, при проектировании естественной вентиляции атриумных зданий необходимо одновременно компенсировать силу ветра и силу тяги (одновременно уравновешивать силу, вызываемую ветром, и силу, вызываемую тягой). Это особенно важно для регионов с низкой разницей наружных и внутренних температур [62]. В результате проектирование таких систем вентиляции является сложным и требует повышенного внимания, так как несоблюдение этого требования может привести к непредсказуемым изменениям характера воздушных потоков. Движение воздуха в здании обусловлено разницей давлений внутри и снаружи, которая возникает под действием таких факторов, как

ветер и сила тяги. Более подробно эти факторы будут рассмотрены в следующих подразделах [91].

Естественная вентиляция в атриумном пространстве основана на силе тяги, которая возникает, когда температура внутри помещения выше температуры снаружи [77]. Для создания вентиляционной силы, обусловленной тягой, необходимы три фактора: наличие приточного проема на более низком уровне, вытяжного проема на более высоком уровне и источников тепла, создающих разницу температур внутри и снаружи помещения. Поток, движимый тягой, создается за счет разницы температур и высоты, что приводит к изменению плотности и давления воздуха внутри и снаружи. Наружный воздух высокой плотности поступает (в здание) через низко расположенные приточные отверстия и нагревается от нагретых поверхностей в здании. В результате нагретый воздух становится легче и выходит через приточные отверстия высокого уровня [88]. Без учета ветрового эффекта давление внутри и снаружи помещения может быть выражено следующим образом:

$$\begin{cases} p_{внутри} = p_0 - p_{наружи} gh \\ p_{наружи} = p_0 - p_{внутри} gh \end{cases} \quad (2.1)$$

где: h – высота внутреннего или наружного помещения относительно опорной высоты, (м); p_o – статическое давление наружного воздуха на опорной высоте, (Па); $p_{наружи}$ – давление наружного воздуха на высоте h относительно опорной высоты, (Па), $p_{внутри}$ – давление внутреннего воздуха на высоте h относительно опорной высоты, (Па). Поэтому разность давлений между внутренней и наружной средой на высоте h составляет: $\Delta p = (p_{наружи} - p_{внутри})gh$

Из-за нагретого воздуха внутри здания его плотность ниже, чем у воздуха снаружи здания. Следовательно, давление наружного воздуха выше давления воздуха внутри здания, что приводит к тому, что наружный воздух поступает в здание до тех пор, пока давление воздуха внутри и снаружи будет уравновешено, после чего наружный воздух впускается в здание на более низком уровне, а внутренний воздух покидает здание на более высоком уровне [63]. В связи с этим

Холфорд и Хант [64] считают, что в жаркое время года увеличение разницы температур в слое теплого воздуха между наружным и внутренним пространствами может прервать процесс естественной вентиляции, вызванный тягой.

2.3 Натурные экспериментальные исследования температурно-воздушного режима в здании УЛК-МГСУ

В данной главе исследуется влияние площади приточных и вытяжных проемов в светопрозрачном покрытии на температурный режим при охлаждении атриума, в здании учебно-лабораторного корпуса Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (УЛК-МГСУ). Данное исследование сосредоточено на изучении естественной вентиляции, основанной на эффектах тяги, с помощью натурных измерений, вычислений и аналитических экспериментов.

Для оценки тепловых характеристик атриума были применены различные методы, такие как натурные исследования, аналитическое моделирование, математика, численное моделирование, маломасштабные имитационные исследования с использованием компьютерных моделей и их комбинации. Среди этих работ предпочтение отдается методу крупномасштабных полевых испытаний из-за его простоты в сборе необходимого достаточного количества данных и условий контроля по сравнению с другими методами в реальных условиях.

Результаты испытаний отражают реальные условия без особых допущений. Скорость потока определяется эффектом тяги и сопротивлением створок, входных и выходных дверей, крыши и коридора. Температура воздуха зависит от температуры поверхности и теплообмена с атриумом. Следовательно, скорость потока и температура воздействуют друг на друга.

2.3.1 Цели, задачи и планирование экспериментального исследования

Целями экспериментального исследования являются:

- изучение температурных полей помещения атриума для повышения тепловой эффективности здания атриума УЛК-МГСУ в летний период с помощью

недорогого вентиляционного решения путем изменения площадей входных дверей и площадей выходных проемов в кровельном покрытии для повышения теплового комфорта;

- анализ физических параметров вентиляции путем сравнения расчетных данных и экспериментальных измерений в расчетных точках. 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 этих целей решаются следующие задачи:

Измерение температуры воздуха внутри и снаружи здания, включая температуру внутренней поверхности стеклянной пирамиды крыши и стеклянных стен, отделяющих коридоры и контактирующих с солнечной радиацией в различных точках атриума на каждом этаже.

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.

Получение измеренных данных, особенно температуры воздуха в помещении необходимо для проверки результатов термодинамического моделирования атриума этого здания с использованием программного обеспечения CFD. Это будет оценкой возможностей и точности программного обеспечения CFD при моделировании и точности моделирования температурной стратификации, влияющей на тепловые характеристики атриума.

Результаты данного исследования, подтверждающие надежность программы CFD при проведении динамического моделирования тепловых атриумов,

обосновывают ее использование для моделирования тепловой стратификации в среднеэтажных линейных репрезентативных моделях атриума, что будет подробно **рассмотрено в главе 3.** Таким образом, в работе были проведены измерения:

- распределение температуры и воздушных потоков в атриуме. Оно характеризуется измерением температуры внутреннего воздуха на каждом этаже, в дверях и в приемах на крыше (температуру внутренней поверхности стеклянной пирамиды);
- измерение температуры снаружи здания и воздуха внутри в различных точках атриума на каждом этаже, а также температуры внутренней поверхности стеклянной пирамиды и внутренних стеклянных стен, находящихся в контакте с солнечным светом, а также средней интенсивности солнечного излучения на внутренних поверхностях, находящихся в контакте с солнечным излучением.

2.3.2 Проведение натурных исследований в здании учебно-лабораторного корпуса УЛК -МГСУ.

В данной главе представлен натурный эксперимент, проведенный в корпусе УЛК-МГСУ с целью определения распределения температуры и воздушных потоков в атриуме здания в городе Москве.

Характеристика объекта задания УЛК -МГСУ

По старому проекту УЛК должен был быть построен из унифицированного каркаса 6 х 6 и большепролетного каркаса 6 х 9. В период подготовки проекта возможности строительства шагнули далеко вперед. В окончательном проекте нового УЛК был применен световой фонарь над атриумом. Каркас фонаря состоит из стальных наклонных ферм с параллельными поясами, которые образуют усеченную пирамиду высотой 5,14 м. В основании пирамиды фермы опираются на монолитную железобетонную балку по периметру проема в перекрытии. Основной шаг ферм 2600 х 3000 мм. Фермы запроектированы из квадратных и прямоугольных стальных труб из стали С245. Покрытие фонаря – алюминиевые витражи с заполнением стеклопакетами с закаленным стеклом. Сложную конструкцию фонаря собирали непосредственно на строительной площадке. В

готовом виде его установили в проектное положение с помощью подъемного крана. Фонарь перекрыл атриум.

Здания с атриумом, имеющим приточные и вытяжные проемы, встречаются относительно редко. Большинство атриумов рассчитано на использования. В обычном атриумном здании требуется интенсивное использование движения воздуха. Это связано с большим пространством атриума и множеством других неконтролируемых влияющих факторов, таких, как обьемно-планировочные и конструктивные решения. Поэтому, а также из-за простоты организации исследований нами был выбран атриум здания УЛК-МГСУ в городе Москве, построенный в 2006 году (Рисунок 2.3 а и б). Климатические условия летнего периода в этом атриуме очень похожи на условия во Вьетнаме. В атриуме имеют место конкретные архитектурные решения, на примере которых была разработана методика исследований.



а) б)

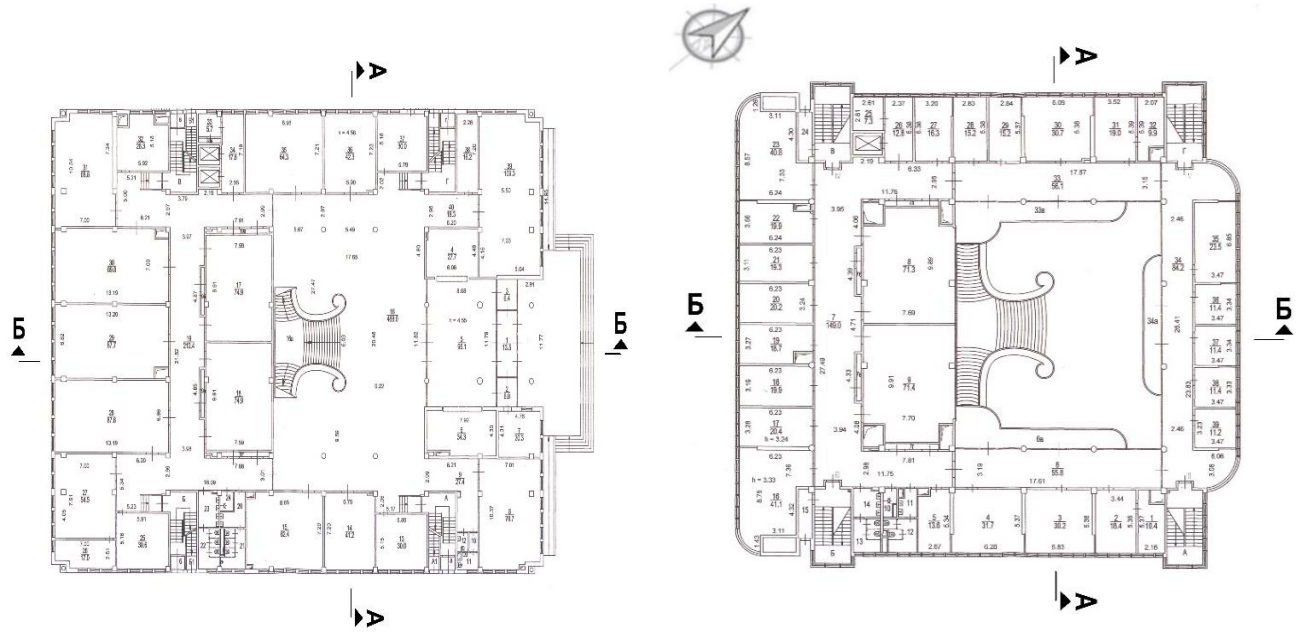
Рисунок 2.3 – Фотография атриума объекта исследования (а); внутренне пространство атриума (б)

Здание состоит из пяти этажей с прямоугольным планом, габаритные размеры которого составляют 42,2 м. по ширине, 60,2 м. по длине, 23,7 м. по высоте, общей площадью 12000 м^2. Главный фасад здания выходит на северо-восток. На рисунке 2.4 а, б показана ориентация корпуса УЛК. Схема этажей и разрез здания с атриумом показан на рисунках 2.4 а, б и 2.5 а, б. На втором этаже атриум соединяется с учебными и административными помещениями других

корпусов МГСУ. Через коридоры, отделенные от атриума стеклянными перегородками он соединяется с учебными и административными помещениями УЛК. В центральной части здания располагается атриум, окруженной помещениями с прямоугольным поэтажным планом размерами 17,4 м (ширина) х 21,2 м (длина). Пространство атриума освещается светопрозрачной кровлей. Суммарный объем помещения атриума составляет 8742 м^3. Тип атриума четырехстенный. Высота 1 этажа составляет 4,8 м, а со 2 по 5 этаж - 3,6 м. Площадь остекления крыши 100 %, общая площадь открывающихся фрамуг 5 %. В самом атриуме нет кондиционеров, однако в прилегающих офисных помещениях кондиционирование есть. В Таблице 2.2 приведены характеристики здания УЛК-МГСУ).

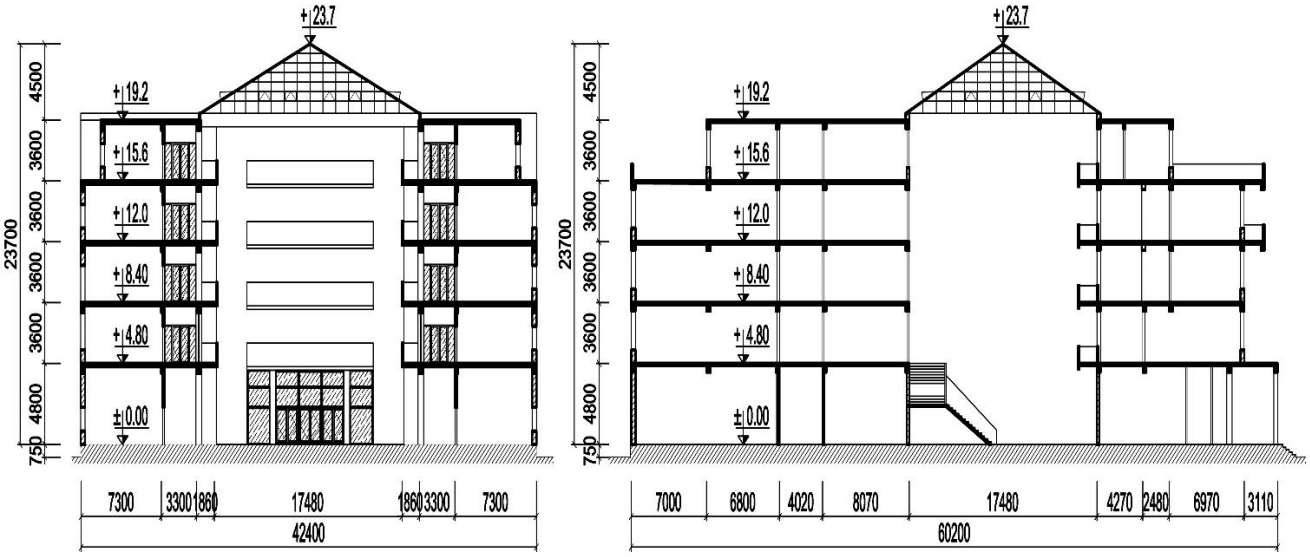
Таблица 2.2 – Характеристики здания УЛК-МГСУ

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 каждый этаж высотой 3,6 м Общая высота УЛК по парапету кровли: 17,3 м^2 Высота по верху фонаря: 23,7 м
Ориентация здания	Северо-Восточная (С-В)
Площадь плана атриума	17,48 × 21,2 м^2
Соотношение остекления кровли и площади пола атриума	100 %
Вид атриума	Четырехстенный атриум
Отношение площади открывающеюся остекления на кровле к общему остеклению	5 %



а) б)

Рисунок 2.4 – Планы первого и пятого этажей атриумного здания УЛК-МГСУ: а) план первого этажа; б) план пятого этажа



а) б)

Рисунок 2.5 – Разрез здания атриума УЛК-МГСУ: а) разрез А-А; б) разрез Б-Б

Крыша атриума выполнена из прозрачного флоат-стекла толщиной 10 мм. и имеет стальной каркас). Свойства пропускания и отражения стеклянного материала составляют 0,87 (видимое) и 0,75 (солнечное) для пропускания и, соответственно, 0,1 (видимое) и 0,08 (солнечное) для отражения. Атриум, являющийся центральной частью здания, выполняет не только функцию переходного пространства, но и

общего места встречи студентов и преподавателей университета. В соответствии с проектными рекомендациями, в вестибюле и коридорах атриума необходимо поддерживать внутренний микроклимат с температурой в пределах 25-27 °C [63].

Однако администрация здания неоднократно получала многочисленные жалобы от студентов, преподавателей и других сотрудников университета на температурный дискомфорт внутри атриума, особенно в летнее время. Несмотря на то, что стеклянная крыша была спроектирована с открывающимися фрамугами для улучшения циркуляции воздуха и охлаждения всего здания, это оказалось не столь эффективным, как ожидалось в проектных рекомендациях. Проемы используются только для пожарного удаления дыма и всегда закрыты. В жаркие и ясные дни во второй половине дня в летнее время при полностью остекленной крыше и отсутствии вытяжной вентиляции (проемов) на крыше температура воздуха в подкровельной части (на уровне пятого этажа) может составлять около 37 °C и, как правило, выше температуры наружного воздуха. Из-за высокого уровня прямого и рассеянного солнечного излучения, температура внутреннего воздуха атриума, особенно на верхнем этаже, значительно повышена, что существенно влияет на комфортное пребывание людей в помещении.

- **Метод и место (точки) измерения**

Данный натурный эксперимент был проведен в течение пятнадцати дней с 15 июля по 1 августа 2021 года в здании УЛК-МГСУ в условиях жаркой и влажной летней погоды в солнечные дни. Планирование проведения эксперимента проводилось в соответствии с прогнозом гидрометцентра Москвы. Средняя температура наружного воздуха составляла около 29°C, а относительная влажность днем, как правило, была около 80 %, с охватом пасмурных, и ясных дней. Измерения были проведены на пяти разных этажах атриума с 9:30 до 17.00. Для достижения наиболее точных результатов, были использованы выходные дни, в связи с уменьшенным воздействием теплового излучения людей на проведение эксперимента. Измерения проводились после входных дверей в течение достаточного периода времени, чтобы температура оставалась стабильной.

Для оценки тепловых характеристик атриума с учетом теплового комфорта были проведения измерения температуры воздуха внутри и снаружи здания, около внутренней поверхности стеклянной пирамиды. Были записаны параметры и проанализированы данные, которые показывали влияние состояния открытия и закрытия вентиляционных проемов на тепловые параметры атриума. Для измерения температуры внутреннего воздуха на каждом этаже были использованы четыре точки на каждом этаже, а также точки у входных дверей на первом этаже и у проемов на остеклении крыши. Распределение температуры и воздушных потоков в атриуме характеризовалось измерением температуры внутреннего воздуха в точках, как показано на (Рисунок 2.6).

Для примера приведем описание проведения измерений за один из дней: Система записи данных имеет жизненно важное значение в долгосрочных полевых испытаниях, поскольку от ее точности и надежности зависит, будет ли испытание успешным или неудачным. Данные измерений температуры воздуха в натурных условиях были записаны с интервалом в 1 минуту, а затем каждые десять минут вычислялось среднее значение.

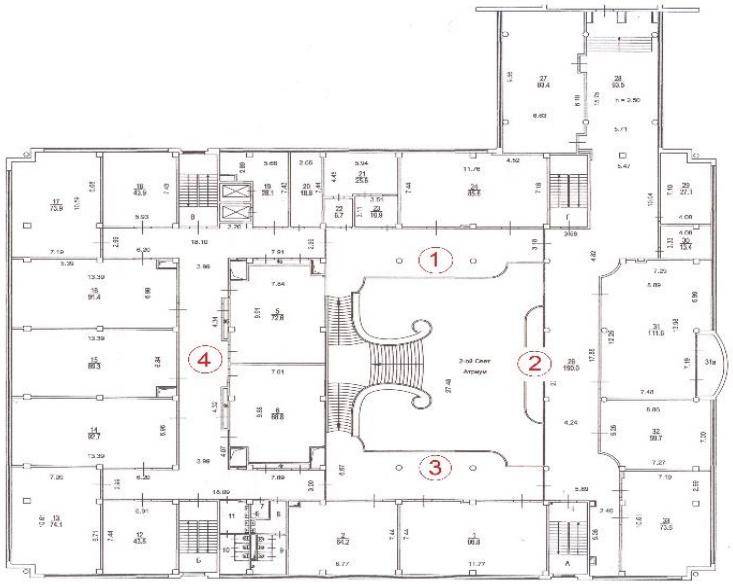


Рисунок 2.6 – Расположение точек измерения температуры на каждом этаже в атриуме здания УЛК МГСУ

Перед проведением измерений в течение дня каждый день выполнялась рутинная процедура, позволяющая свести к минимуму вероятность возникновения

ошибок. Сначала проводилась проверка всех инструментов, чтобы убедиться в их надежной фиксации, затем проверялись выходные сигналы, чтобы убедиться в безотказной работе приборов и отсутствии сбоев или недостаточного питания во время или после предыдущего запуска. Затем проводилась проверка всех записанных данных измеряемых переменных за день, чтобы выявить любые проблемы с использованными приборами или возможные ошибки человека в обращении с оборудованием, чтобы можно было внести необходимые корректировки и исправления. Наконец, данные о температуре воздуха, записанные в течение дня, передавались на портативный компьютер, чтобы затем перевести их в формат Excel для обработки. Это делалось каждый день, чтобы проанализировать результаты в виде графиков и выявить тенденцию, которая позволила бы выявить любые проблемы, возникающие при работе термогигрометра.

Внутри помещения рассматривалась только естественная вентиляция. Механическая вентиляция, не была предусмотрена. Хотя коридоры на каждом этаже соединены с лестничной клеткой, все двери были закрыты во избежание прохода людей и уменьшения теплопотери и воздухообмена в коридорах за стеклянными стенам отделяющими коридора от атриума. Испытатели контролировали двери на протяжении всего эксперимента, чтобы предотвратить любые непредвиденные ситуации. Все двери, соединяющие коридоры, были закрыты с 9.30.

Длительное измерение температуры воздуха в помещении являлось важным для изучения теплового поведения, особенно в отношении нежелательной тепловой стратификации и проблем перегрева воздуха в солнечные жаркие дни. Данные измерений температуры воздуха в натурных условиях были записаны с интервалом в 1 минуту, а затем каждые пять минут вычислялось среднее значение.

Чтобы изучить влияние внутренних поверхностей и всех поверхностей, включая стеклянные стены с одной стороны вестибюля, мы провели измерения с помощью термогигрометра Testo 625 с NTC-датчиком температуры, продукт датской компании АО «Тетис Про», параметры которого приведены в Таблица 2.3.

Таблица 2.3 – Параметры измерительного оборудования

Наименование прибора, производитель	Фото	Параметры измерительного оборудования
Прибор для измерения влажности/температуры Testo 625 с подключаемой головкой зонда влажности, батарея и протокол калибровки (АО "Тетис Про", Россия, г. Москва)		1) Датчик температуры NTC Диапазон измерения: -10 ~ +60 °C Точность: ±0,5 °C 2) Датчик температуры в ед. Кельвина типа K Диапазон измерения: -200 ~ +1370 °C 3) Влажность Диапазон измерения: 0,0 ~ 100,0 %RH Точность: ±2,5 %RH (5 ~ 95 %RH)

Термогигрометр Testo 625 представляет собой портативный прибор для измерения температуры внутренних окружающих поверхностей в атриуме. Данное измерительное оборудование было откалибровано в процессе производства и протестировано в научно-исследовательской и учебной лаборатории кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики окружающей среды НИУ МГСУ, чтобы убедиться, что оно будет функционировать должным образом в соответствии с процедурой, указанной производителем. Поэтому пользователям не требовалось производить никаких настроек. В режиме измерения температуры с использованием встроенных датчиков возможна регистрация температуры в диапазоне от -10 °C до +60 °C с точностью ±0,5 °C. Датчик температуры типа K имеет диапазон измерения от -200K до +1370 K.

Портативный термогигрометр (Testo 625) не только отображает температуру воздуха и поверхностей в реальном времени, но и рассчитывает максимальную, минимальную, среднюю температуры. Функция Recall позволяет получить доступ

к последнему показанию температуры. Кроме того, Testo 625 компенсирует энергию, отраженную от фона вокруг исследуемой поверхности. Поэтому она не влияет на точность показаний. Точность Testo 625 составляет ±0,5 °C. Подробные технические характеристики прибора приведены в Таблица 2.3.

Во время эксперимента движение воздуха и относительная влажность в точках не измерялись, поскольку подвижность воздуха в атриумном пространстве была обычно слишком мала ($v < 0{,}1$ м/с) и соответствовала 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 приточных и вытяжных 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 системы охлаждения (кондиционеры) 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 открытой площадью 20,16 м^2.

Каждый случай предназначен для проверки значимости его в создании температурно-воздушного режима в атриуме при данной наружной температуре.

2.3.3 Методы анализа натурных исследований

Для анализа данных натурных исследований было предложено два распространенных метода – метод простой линейной регрессии и метод пробит-анализа Хамфриса [1976] [65]. Согласно Хамфрису метод простого линейного регрессионного анализа используется для тщательного изучения прогресса средних реакций по всему спектру наблюдаемых температур. Этот метод обычно

дополняется процедурой корреляции (взаимосвязи), которая оценивает величину линейной зависимости между двумя переменными, такими как температура и высота здания атриума. Для установления корреляции между измеряемыми переменными температурой воздуха и высотой здания в атриуме, позволяющей определять температуру на любой высоте, в данном исследовании для статистического анализа данных мы использовали только метод простой линейной регрессии. На (Рисунок 2.7) изображен пример диаграммы рассеяния, показывающей линейную корреляционную зависимость между двумя переменными.

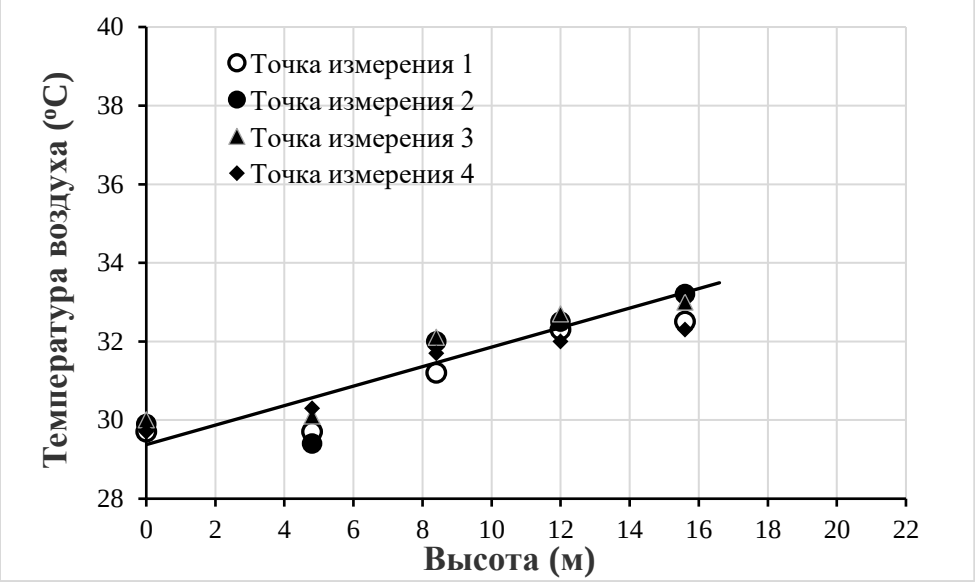


Рисунок 2.7 – Пример диаграммы рассеяния, показывающей линейную корреляционную зависимость между двумя переменными

Анализ простой линейной регрессии между температурой и высотой позволяет получить информацию о коэффициенте регрессии (наклоне графика) и степени соответствия (R^2). Данная линия регрессии позволяет определить температуру на любой высоте над уровнем пола с помощью линейного уравнения (см. уравнение 2.1). Общий вид линейного уравнения имеет следующий вид [65]:

$$y = ax + b \tag{2.1}$$

где: y – температура на любой высоте (зависимая переменная), $°C$;

x – температура пограничного слоя на полу (независимая переменная), $°C$;

a – изменяющийся линейный коэффициент (наклона графика);

b – высота между двумя вертикальными отверстиями, м;

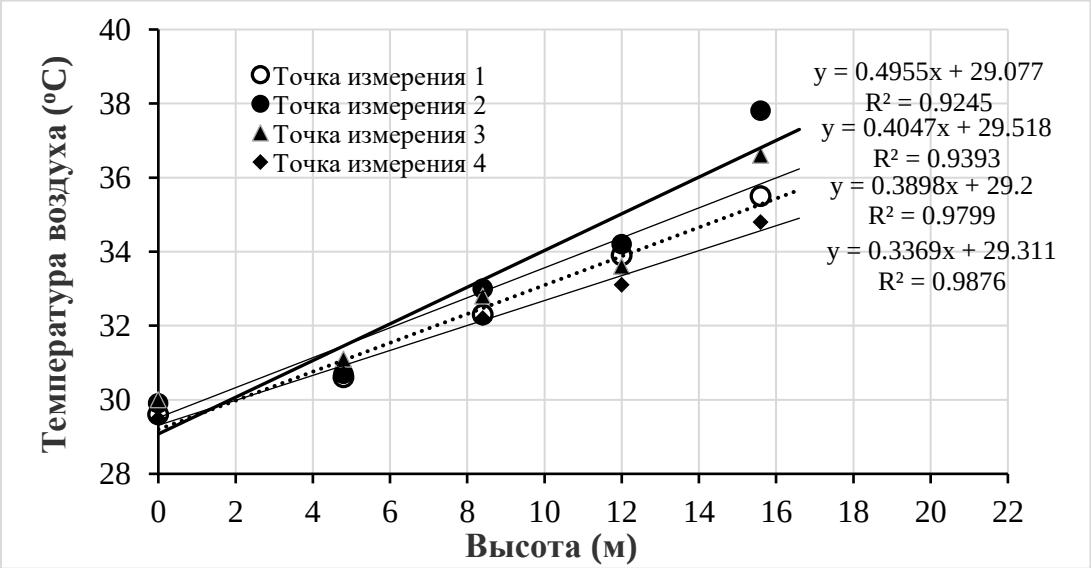
Согласно исследованию, проведенному авторами [65], простой регрессионный анализ можно расширить, включив в него более одной переменной окружающей среды, используя метод множественной корреляции и регрессии. Для изучения влияния площади вытяжных и приточных отверстий на тепловые характеристики атриума для всех четырех показательных случаев были зафиксированы скорость и направление ветра по данным погоды на уровне 3,0 м/с соответственно и 90° (северо-восточный ветер). В целом, экспериментальные измерения показали, что стратификация температуры воздуха в атриумном пространстве значительно уменьшается с увеличением размера проема. Из рисунка 2.8 а, б видно, что для случаев 1 и 2 разница температур воздуха между нижним этажом на высоте 0,00 м и 2-м этажом на высоте 4,2 м составляет примерно 1-2 °C, а для случаев 3 и 4 (расстояние между нижележащим и вышележащим этажами 3,6 м составляет примерно 0,5-1 °C. Такая небольшая разница температур также объясняется северо-восточным ветром, который не только загоняет горячий воздух извне в здание, но и усиливает стратифицированный поток горячего воздуха на верхних этажах выходящего из здания. Большой приточный проем обеспечивает относительно стабильную температуру воздуха в вытяжных окнах. Кроме того, во всех четырех показательных случаях наблюдается почти линейное распределение температуры воздуха по пяти этажам атриума независимо от размера проемов.

2.3.4 Анализ результатов

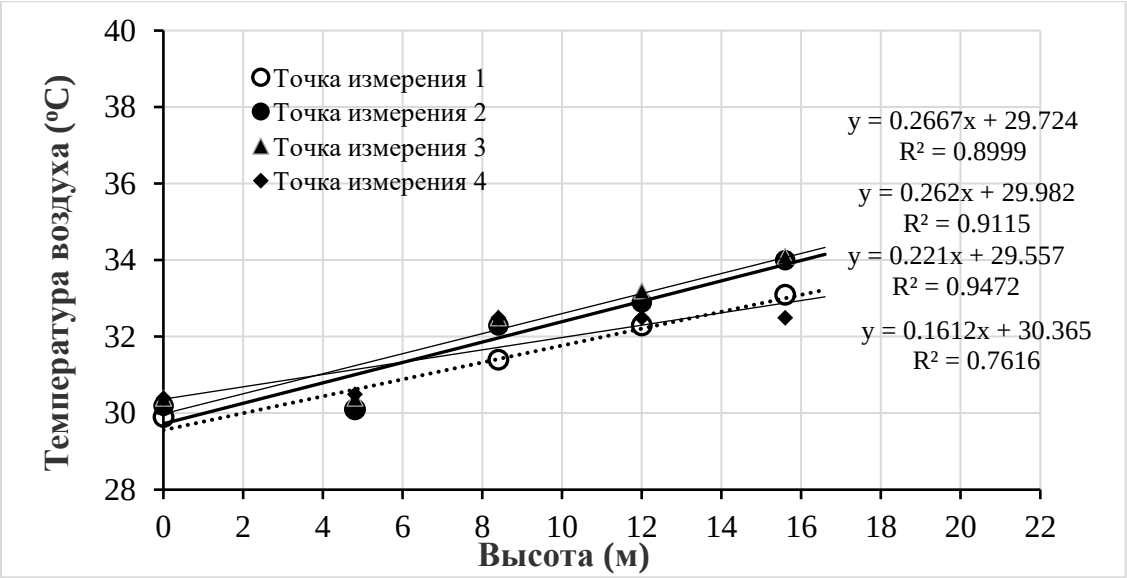
Сравнение изменения температуры между случаями 1 и 2

В случаяя 1 и 2 измерения проводилось при полностью закрытых дверях на первом этаже, как показано на рисунке 2.8 а, б. Графики на рисунке 2.8 а, б в обоих показательных случаях указывают на значительную стратификацию температуры воздуха в пространстве атриума по этажам. Для первого случая, когда вытяжные отверстия на прозрачной стеклянной крыше здания полностью закрыты, как

показывают результаты на рисунке 2.8 а, видно, что разница температур воздуха между нижним (первым) и верхним (пятым) этажами относительно велика и составляет 4-5 °C, а между каждым этажом составляет 1-2 °C. В целом, для случая 1а мы видим, что без вытяжных отверстий на прозрачной стеклянной крыше температура воздуха на верхнем этаже, особенно температура в 4 различных точках измерения на 5-м этаже под стеклянной крышей атриумного здания изменялась в диапазоне от 35 до 37,7 °C. Однако по результатам измерений в случае полностью открытых дверей и светопрозрачных проемов атриума, общая площадь открытия которых составляет 8,19 м^2 (что соответствует 5 % площади стеклянной крыши), в 4 различных точках на 5-м этаже были получены значения температуры от 32,5 °C до 34,4 °C. Это ниже, чем в случае полностью закрытых светопрозрачных проемов на крыше здания. При этом температура снизилась примерно на 3-4 °C.



а)



б)

Рисунок 2.8 – 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)

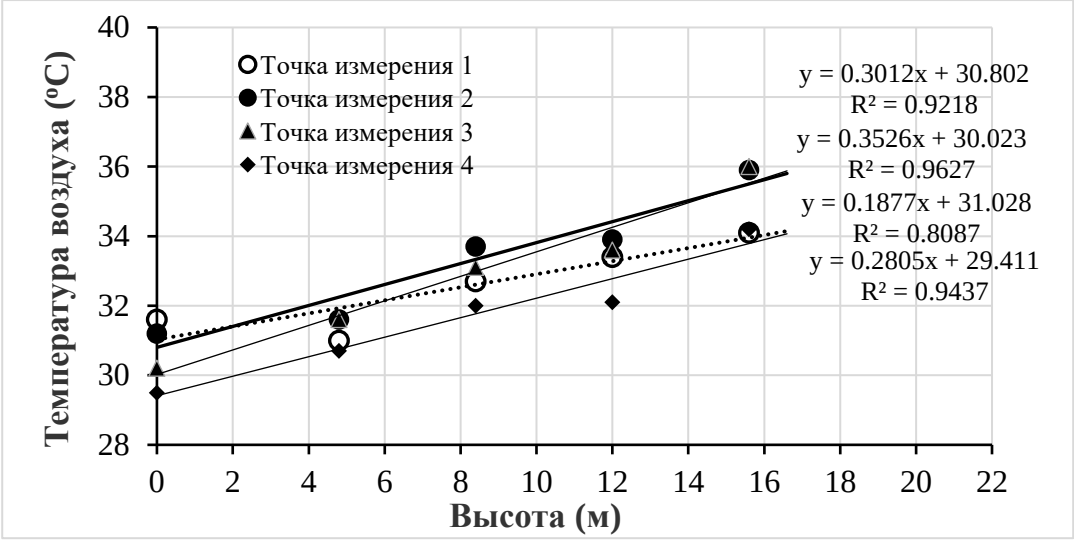
Сравнение изменения температуры воздуха в случаях 3 и 4

Из рисунка 2.9 а, б видно, что в случае 3 и 4 измерения проводились при полностью открытых дверях первого этажа площадью 8,19 м^2 и полностью закрытых фрамугах в стеклянной крыше. Результаты измерений показывают, что разница температуры воздуха между подкровельной зоной (при высоте атриума 15,3 м) и первым этажом (при высоте атриума 0,00 м) составляет 2-3 ºС. Разница температур воздуха между первым и вторым этажами составляет 0,5-1 ºС. Распределение температуры в 4 различных точках на пяти этажах здания колеблется от 34,1 °С до 36 °С.

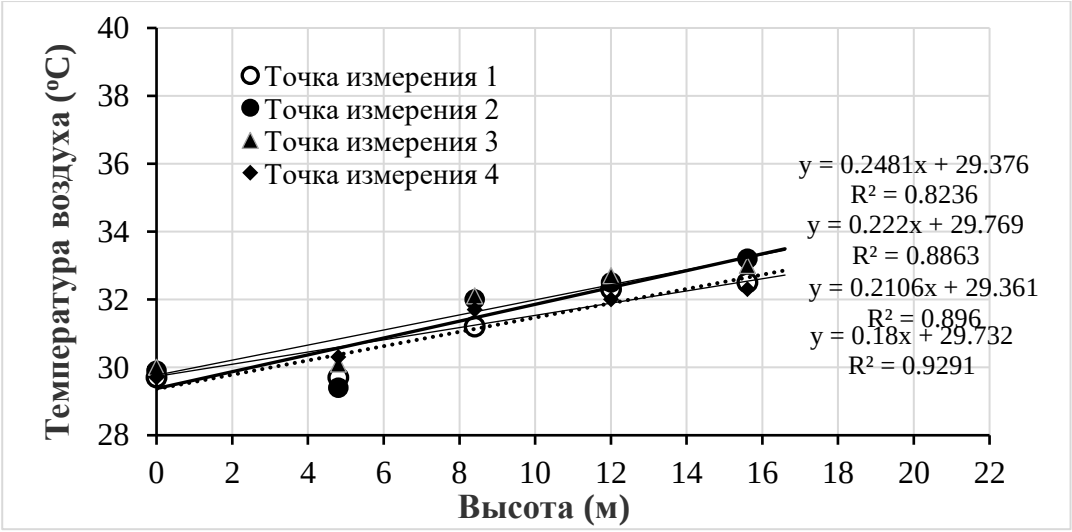
Как видно из рисунка 2.9 б, увеличение площади открытия входных дверей до максимального уровня 100 % привело к снижению температуры воздуха:

- примерно на 0,5-1 ºС на первом этаже;
- на 1-1,5 ºС на 2-м, 3-м, 4-м этажах;
- на 2-3 ºС на 5-м этаже;
- на 3-4 ºС в подкровельной зоне при высоте атриума 15,3 м.

Все это свидетельствует о том, что разница температуры воздуха между нижним и верхним этажами относительно невелика.



а)



б)

Рисунок 2.9 – График распределения температурыв атриуме по этажам в здании с атриумом: а) при закрытых светопрозрачных проемов и открытых внизу входных дверях на 100% (случай 3); б) при открытых светопрозрачных проемах и открытых внизу входных дверях на 100% (случай 4)

Таким образом, наличие больших дверных проемов и мансардных окон позволяет минимизировать температуру воздуха не только на этажах, где находятся люди, но и в зоне под кровлей, что приводит к относительно хорошему перемешиванию температур внутреннего воздуха в атриуме. Это свидетельствует

о повышении эффективности атриума в снижении дневных температур при максимальном увеличении размеров приточных и вытяжных отверстий в системе вентиляции за счет тяги воздуха.

В целом среди различных режимов открытия и закрытия отверстия наиболее оптимальный температурный режим в атриуме УЛК-МГСУ имеет случай 4. Однако в случае 2 температурный диапазон несколько лучше, чем в случае 3. В случае 1 максимальная температура для наихудшего случая (34,8-37,8 ºС). Данные результаты показывают различное влияние площадей приточных и вытяжных проемов на изменение температурного режима в помещении, что позволяет улучшить эффект естественного охлаждения за счет изменения направления скорости воздушного потока в атриуме при наличии большого количества проемов.

В ходе проведения эксперимента температура воздуха в помещении была относительно стабильной на всех этажах. Однако по ходу движения воздушного потока снизу вверх температура воздуха повышалась. Воздух отбирает теплоту от более горячих поверхностей, обдувая их, а затем создает эффект дымохода (эффект дымовой трубы). Эти результаты показывают, что в зданиях с мансардными окнам и с маленькой площадью окон, которые использовались во многих исследованиях, не подходят. Температурное поле постепенно линейно увеличивается в вертикальном направлении внутри атриума, что отражает реальную ситуацию.

Результаты исследований показывают, что температурная стратификация на верхнем этаже вызывает дискомфорт людей на 5-м этаже атриума, особенно в зоне коридора 5 этажа, поскольку стеклянная крыша собирает энергию солнечного излучения и постепенно увеличивает температуру внутренних поверхностей, тем самым повышая среднюю лучистую температуру внутренних поверхностей, на верхнем этаже дополнительно усиливая расслоение температур в атриуме. Однако наличие верхних открытых фрамуг приводит к усилению циркуляции воздуха в помещении, снижает температуру воздуха на 5 этаже и приводит к уменьшению разницы температур между верхним и нижним этажами.

На основании этих результатов и данных натурных измерений, было установлено, вытяжные отверстия различных размеров и положений оказывают

влияние на температурный режим атриума. Температура на каждом этаже атриума постепенно увеличивается. Результаты показывают, что температура воздуха в зоне коридора на 5-м этаже под прозрачной крышей очень высокая из-за сочетания высокой средней температуры излучения и стратифицированного нагретого воздуха. Для естественной вентиляции необходимо, чтобы все проемы в кровле были открыты. Это позволяет эффективно минимизировать воздействие высокой лучистой тепловой энергии от окружающих горячих поверхностей, особенно в зоне балкона 5 этажа. В коридорах следует поддерживать температуру от 25 до 27 °C, что в этом случае достижимо [89]. Из рисунка 2.5 видно, что в нынешнем здании атриума соотношение площади открывающихся вентиляционных отверстий составляет около 5 % по сравнению с общей площадью остекления на крыше атриума. Хотя дверные проемы необходимы, их площадь не обязательно должна быть слишком большой, поскольку разница в проемах в диапазоне 50 % до 100 %, очень мало влияет на поле скоростей и температуру внутри здания. При этом, температуру воздуха в помещении можно снизить на 5-7 °C в жаркий летний день, когда выход воздуха происходит через открытые проемы в кровле, которые превышают 26,88 м^2 т. е. 7 % от общей площади стеклянной крыши в атриуме здания. Это помогает усилить эффект дымовой трубы и эффективность вентиляции для достижения оптимального охлаждения атриумов и предотвращения неблагоприятного обратного потока воздуха.

В нынешнем здании атриума открываются лишь около 5 % от общей площади стеклянной крыши атриума, однако при этом еще не достигается комфортный температурный режим. При реконструкции атриума рекомендуется увеличить скорость потока воздуха и соотношение площадей световых проемов к размеру площадей открывающихся вытяжных проемов (> 5 %) для достижения оптимальной эффективности охлаждения атриума. Это существенно снизит дискомфорт в коридорах атриума, нагрузку на кондиционеры в прилегающих кондиционируемых помещениях и повысит эффективность вентиляции за счет теплового давления для оптимальной производительности и предотвращения обратного движения воздуха. Летом все стекленные двери из вестибюля в атриум

должны быть полностью открытии. Схема расположения открывающихся вытяжных проемов в стеклянном покрытии атриума УЛК-МГСУ рекомендуемые согласно моим предложением приведена на рисунок 2.10.

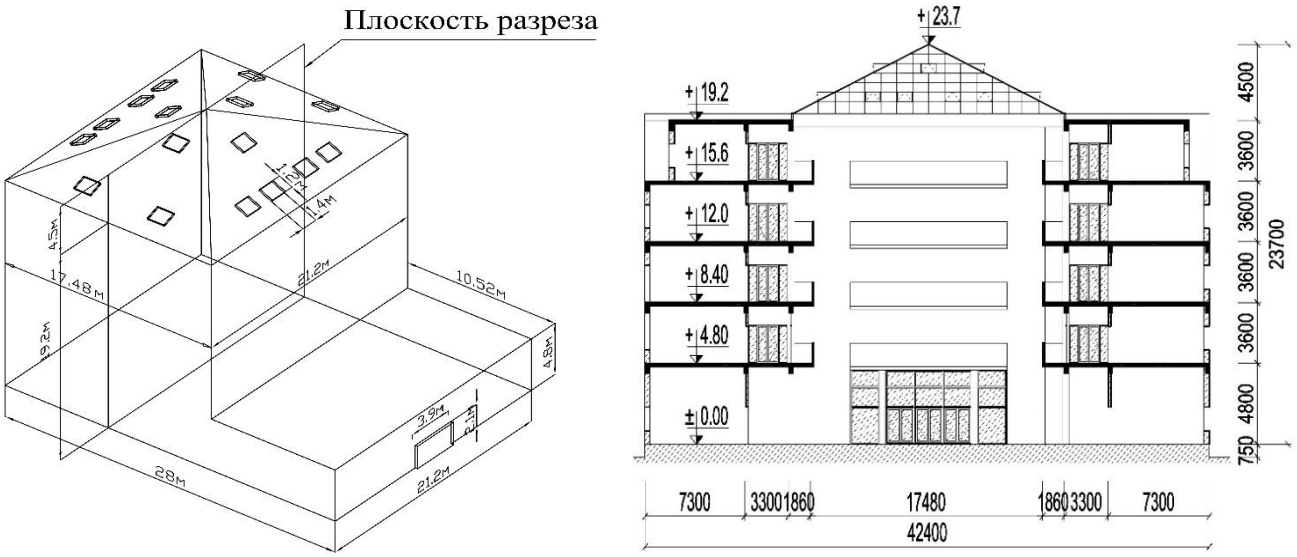


Рисунок 2.10 – Рекомендуемое расположение приточных и вытяжных проемов

2.4 Выводы по главе 2

Как показано на рисулке 2.8 а, б и 2.9 а, б, линии графиков указывают на то, что линейная зависимость между температурой воздуха и высотой здания в атриуме, является достоверной (R^2 = 0,92-0,98). Очевидно, что чем меньше коэффициент регрессии R^2 (наклон) и чем ближе значение R^2 к единице, тем выше достоверность.

В следующей главе будет рассмотрена компьютерная CFD-модель того же здания с атриумом, созданная не только для исследования явлений внутри атриума, но и для дополнения результатов натурных измерений, а измеренные данные будут использованы в качестве подтверждения возможностей и точности CFD-моделирования тепловой стратификации в многоярусном атриуме. В частности, измеренные данные температуры воздуха в помещении будут сравниваться с прогнозируемыми данными компьютерного моделирования с целью проверки и подтверждения возможностей и точности программного обеспечения для моделирования тепловых характеристик окружающей среды в атриуме.

В данном исследовании рассматривается влияние различных соотношений площадей отверстий на улучшение теплового режима во внутренних помещениях атриума и вестибюля в жаркие ясные летние дни. В целом средняя разница температур между этажами 1 и 5 составляет до 5,5 °C. В то же время при полном открытии световых фонарей в верхней части атриума средняя разница температур воздуха между каждыми двумя этажами составляет от 1 до 2,5 °C.

Результат натурных исследований показывают, что различия в расположении и размерах проемов в прозрачной стеклянной крыше атриума оказывают существенное влияние на температурное поле внутри зданий с атриумом. В частности, стратификация температуры воздуха в атриумном пространстве значительно уменьшается при увеличении количества и размеров проемов в вершине остекления крыши атриума. Среди всех вариантов атриум имеет самую высокую тепловую эффективность в случае 4 за счет реализации полностью открытых дверей на первом этаже и оконных проемов на прозрачной стеклянной крыше. При этом условии, люди, находящиеся в атриуме, будут чувствовать себя максимально комфортно, при этом разница температур между этажами будет минимальной, особенно в окружающих соседних аудиториях.

Таким образом, тепловые характеристики атриума можно улучшить за счет размера и расположения приточных и вытяжных проемов при условии, что световой проем в атриуме достаточно велик, а дверной проем сравнительно мал, а степень открытия варьируется в зависимости от климатических условий наружного воздуха. Контролируемые условия внутренних и наружных проемов улучшают поток воздуха в прилегающих помещениях, определяя оптимальные скорости потока воздуха в этих помещениях. Исследование методов натурных испытаний эффективных проектных параметров атриумов и их теплового воздействия, поможет проектировщикам и инженерам принять решение о проектировании проемов в естественно вентилируемых зданиях в будущем.

ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-ВОЗДУШНЫХ ПАРАМЕТРОВ В АТРИУМЕ ЗДАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА CFD

Проектирование и прогнозирование естественной вентиляции является сложной задачей из-за нестабильности эффектов тяги, сложных архитектурных конструкций и сочетания изменений температуры и скорости потока (связи между изменениями температуры и скорости потока). Простых аналитических моделей и натурных экспериментов недостаточно для изучения эффективности вентиляции в зданиях с различными конструкциями и характеристиками, и количеством открытых вытяжных проемов. Однако программа CFD может моделировать эти сложные случаи и давать подробные результаты, которые можно сравнивать. В этой 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, чтобы проверить способность и точность CFD моделировать тепловую стратификацию в многоуровневом атриуме.

3.1 Выбор теоретического метода для прогнозирования температурно-воздушных параметров

Характер воздушных потоков и распределение температуры в атриуме подчиняются законам сохранения массы, импульса и энергии. Поскольку естественная вентиляция – явление случайного характера, обусловленное постоянными изменениями внешних погодных условий, любая математическая

модель, применяемая для прогнозирования естественной вентиляции, должна включать динамический характер внешних условий [72]. При применении метода вычислительной гидродинамики (CFD) необходимо использовать модель, зависящую от времени, что потребует знания зависящих от времени изменений используемых граничных условий. Такой метод позволит получить подробную информацию о естественной вентиляции, но для практического применения он требует чрезмерных вычислительных ресурсов.

Метод вычислительной гидродинамики заключается в дискретизации основных дифференциальных уравнений гидродинамики и замене системы дифференциальных уравнений системой алгебраических уравнений. Основные уравнения гидродинамики описывают динамическое поведение текучих сред и определяются законами сохранения. В сочетании с теорией и экспериментом, это является третьим методом гидродинамики [108]. В интегральной форме они записываются следующим образом [56]:

Уравнение сохранения массы, или уравнение неразрывности, можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0 \qquad (3.1)$$

Уравнение (3.1) представляет собой общую форму уравнения сохранения массы и справедливо как для несжимаемых, так и для сжимаемых потоков.

Уравнения сохранения импульса (закона сохранения импульса) в инерциальной (неускоряющейся) системе отсчета описывается следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho \vec{v}\right) + \nabla\left(\rho \vec{v}\vec{v}\right) = -\nabla p + \nabla\left(\bar{\bar{\tau}}\right) + \rho \vec{g} + \vec{F} \qquad (3.2)$$

где: p – статическое давление, Па; $\vec{v}$ – вектор скорости, м/с; ∇ – оператор Гамильтона набла; $\bar{\bar{\tau}}$ – тензор напряжений (описывается ниже); а $\rho \vec{g}$ и $\vec{F}$ – гравитационная сила тела и внешние силы тела (например, возникающие при взаимодействии с дисперсной фазой), соответственно. $\vec{F}$ также содержит другие

исходные термины, зависящие от модели, такие как пористые среды и определяемые пользователем источники.

Тензор напряжения $\bar{\bar{\tau}}$ определяется:

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu\left[\left(\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^{T}\right) - \frac{2}{3}\nabla\vec{v}I\right] \tag{3.3}$$

$$\mu = 1.72\cdot 10^{-5}\cdot\left(\frac{T}{273}\right)^{1.5}\frac{273+122}{T+122}$$

где: $\mu = 1.72\cdot 10^{-5}\cdot\left(\frac{T}{273}\right)^{1.5}\frac{273+122}{T+122}$ – молекулярная вязкость, кг/(м · с); I – единичный тензор, а второй член в правой части является эффектом объемного расширения.

Уравнение сохранения энергии (закона сохранения энергии) описывается в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\left(e + \frac{v^2}{2}\right)\right) + \nabla\left(\rho\vec{v}\left(h + \frac{v^2}{2}\right)\right) = \nabla\left(k_{eff}\nabla T + \bar{\bar{\tau}}\vec{v}\right) \tag{3.4}$$

где: k_{eff} – эффективная проводимость $\left(k + k_t\right)$, k_t – турбулентная теплопроводность, определяемая в зависимости от используемой модели турбулентности.

Внутренняя энергия e определяется единообразно для сжимаемых и несжимаемых материалов как:

$$e = h - \frac{\left(p + p_{op}\right)}{\rho}$$

В приведенных выше формулах p и p_{op}– манометрическое и рабочее давление, соответственно. Такие определения энтальпии и внутренней энергии соответствуют несжимаемому идеальному газу в общепринятой формулировке:

$$h = c_p T + \frac{p}{\rho}$$

Замыкающие соотношения для системы уравнений Навье-Стокса (RANS) имеют вид:

$$p = \rho RT$$

где: $R = 287.065\,Дж/\left(кг{\cdot}К\right)$.

Модель турбулентности $k-\varepsilon$ (k-эпсилон) была первой моделью турбулентности, которая была широко принята для различных моделей в CFD. Это одна из семейства моделей с двумя уравнениями, в которых решаются два уравнения переноса, одно из которых обычно для eqn, а другое для другой переменной, часто для скорости диссипации. Эти модели являются отраслевым стандартом для CFD.

Кинетическая энергия турбулентности k, и скорость его диссипации ε получаются из следующих уравнений переноса:

$$\frac{\partial}{\partial}\left(\rho k\right)+\frac{\partial}{\partial\left(x_i\right)}\left(\rho k u_i\right)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\frac{\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M+S_k \qquad (3.5$$

И

$$\frac{\partial}{\partial}\left(\rho\varepsilon\right)+\frac{\partial}{\partial\left(x_i\right)}\left(\rho\varepsilon u_i\right)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\frac{\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}\left(G_k+C_{3\varepsilon}G_b\right)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}+S_\varepsilon \qquad (3.6)$$

В этих уравнениях, G_k – представляет собой генерацию кинетической энергии турбулентности за счет (из-за) градиентов средней скорости; G_b – генерирование кинетической энергии турбулентности за счет плавучести; Y_M – представляет собой вклад флуктуирующей дилатации в сжимаемой турбулентности в общую скорость диссипации; $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ и $C_{3\varepsilon}$ константы. σ_k и σ_ε – турбулентные числа Прандтля для k и ε, соответственно. S_k и S_ε – определяемые пользователем условия источника.

Модель излучения

При моделировании атриумного пространства крайне важно учитывать теплопередачу за счет теплового излучения. Для учета излучения решаются уравнения переноса интенсивности излучения (RTEs). Программа FLUENT предлагает пять моделей излучения: Дискретная модель переноса излучения (DTRM), модель излучения P-1, модель излучения Росселанда (Rosseland), модель излучения от поверхности к поверхности (S2S) и модель излучения с дискретными ординатами (DO). Модель излучения DTRM подходит для проведения настоящего исследования. Модель DTRM использует алгоритм трассировки лучей для интегрирования интенсивности излучения вдоль каждого луча и является относительно простой моделью, точность которой повышается при увеличении числа лучей, при этом она применима к широкому диапазону оптических толщин [70].

3.2 Описание программы CFD

Геометрическая модель

Как было указано во второй главе, наиболее распространенным является центральный атриум, который соединяет соседние коридоры и оснащен запасным выходом. Моделирование проводится на основе относительно упрощенной геометрической модели пространства атриума. Используются общие размеры, однако для удобства исключены элементы, такие как лестницы, мебель и прилегающие к атриуму коридоры, а также мелкие углы внутри самого атриума. Общие размеры геометрической модели здания, использованные в CFD-моделировании в этой главе, представлены на (Рисунке 3.1). Габариты атриума составляют 17,4 м (ширина) x 21,2 м (длина) x 23,7 м (высота), а его общий объем составляет 8742 м^3, что рассматривается как одно большое пространство. В атриуме есть приточный проем площадью 2,1 × 1,3 × 3 = 8,19 м^2 (высота x ширина x количество дверей входа), через которую внешний воздух попадает в

пространство атриума. Затем воздух проходит через 12 вытяжных отверстий в крыше, размер каждого из которых составляет 1,2 м. по ширине, 1,4 м. по длине, позволяя воздуху выйти из атриума. Разрез проходит по центру приточного проема и симметрично по плану атриума, перпендикулярно входной двери, показаны на рисунке 3.1.

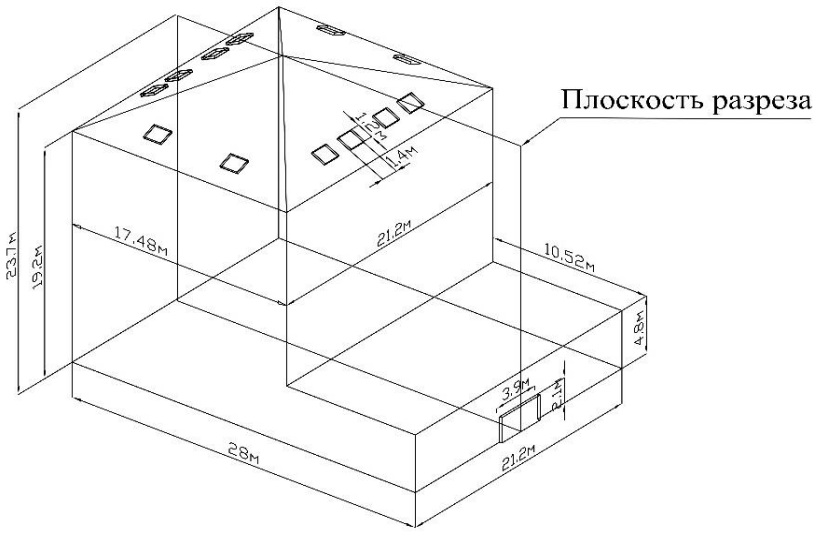


Рисунок 3.1 – Геометрические параметры модели атриума, взятые для теоретического исследования

Описание процесса настройки программ CFD

Большинство случаев моделируется в переходном режиме с помощью ANSYS Fluent, самого мощного программного обеспечения для вычислительной гидродинамики. Предполагается, что случаи достигают устойчивого состояния, когда объемная температура вытяжки изменяется менее чем на 0,003 °C в течение 1000 итераций. Турбулентная модель k ϵ RNG используется на основе ее хороших характеристик для точного моделирования динамики воздуха в реальных масштабах здания [100]. Излучение учитывается с помощью модели «поверхность к поверхности» (S2S) так как, эта модель является оптимальной для моделирования задач излучения. Модель S2S применяется с критерием сходимости остатков 0,001, которая предполагает, что воздух в помещении прозрачен. Все поверхности внутри помещения упрощаются, принимая излучательную способность равна 1,0. Такое упрощение оправдано, учитывая, что типичные материалы в помещении, за исключением полированных металлов, имеют излучательную способность выше

0,9 [60]. Плотность сетки увеличивается вблизи отверстий и стен с $y+ \leq 10$ в соответствии с расширенными функциями стен. Также рассматриваются расширенные функции стенок с усилением тепловых эффектов и эффектов плавучести. Для исследования чисто тяговой вентиляции окружающая среда принята безветренной со средней наружной температурой воздуха 29 °C для всех расчётных случаев. Поэтому начальные базовые и рабочие температуры для всех зон равны 29 °C.

Адиабатические граничные условия заданы для всех поверхностей, кроме полов на каждом этаже. Вытяжные проемы в верхней части атриума моделируется с условием «вытяжка под давлением», а приточные проемы с условием «приток под давлением» при той же удельной температуре 29 °C, хотя обратный поток на вытяжке никогда не предсказывается. Модель «PRESTO» (PREssure STaggering Option) используется для интерполяции давления, а алгоритм «SIMPLE» (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) – для связи скорости и давления. Пространственная дискретизация управляющих уравнений достигается с помощью схемы восходящего ветра второго порядка. В вентиляции, работающей по принципу тяги, источники тепла внутри помещения всегда важны для усиления воздушных потоков. В современных зданиях источники тепла в помещении всегда моделируются как обогреватели в углу или распределенные источники тепла на полу. Различные типы источников тепла приводят к различным воздушным потокам и температурным полям. В данной работе CFD-исследование применяется для изучения и сравнения влияния источников тепла в типичном полномасштабном здании. При рассмотрении сил тяги в уравнениях импульса был использован подход Буссинеска [60]. Предполагалось, что свойства жидкости в данном воздуха случае постоянны, за исключением изменения плотности с температурой, которое приводит к появлению сил тяги, которые рассматриваются как линейная зависимость между изменением плотности и изменением температуры. Кроме того, из-за низких скоростей в уравнении энергии членом диссипации мы пренебрегли.

В большинстве численных исследований гравитационной естественной вентиляции пространств или зданий главными объектами анализа являются воздушный поток и качество результирующего микроклимата. В качестве расчетного домена при математическом моделировании рассматривается все внутреннее пространство здания [75].

В предыдущих исследованиях доказывалось, что гравитационный воздушный поток в помещениях здания с атриумом, как правило, ламинарный, но в нагреваемом солнцем атриумном пространстве может приобрести характеристики турбулентного [75, 82]. Для моделирования стационарного воздушного потока в данном исследовании применялась турбулентная модель RNG k-ε [111]. Ее сходимость при математическом моделировании не полностью турбулентных потоков была подтверждена различными исследованиями [59, 71].

Моделирование здания атриума было проведено с помощью программы вычислительной гидродинамики (CFD) для четырех случаев или состояния открытия и закрытия проемов атриума (см. Таблица 3.1).

3.3 Результаты моделирования и сравнение их с экспериментом

В этом разделе представляется сравнение между измеренными значениями температуры и прогнозируемыми значениями в четырех рассмотренных случаях с использованием модели k-epsilon (двухпараметрическая k-ε RNG). Цель состоит не только в проверке программы CFD-модели (вычислительной модели гидродинамики CFD), но и в сравнении распределения характеристик для различных случаев, чтобы понять характер движения воздушных потоков и распределения температур воздуха в атриуме. Средние значения температуры на этажах с первого по пятый в атриуме используются для сравнения с измеренными и прогнозируемыми значениями. Эти сравнения сведены в таблицы 3.2 – 3.5 вместе с процентной ошибкой между прогнозируемым и измеренным значением. В таблице 3.1 показаны значения средней температуры воздуха, прогнозируемой и

измеренной на пяти различных этажах по всей высоте атриума в 13.00 в ясный день, характерный для четырех случаев, когда средняя температура наружного воздуха составляла около 29 °C, а относительная влажность воздуха обычно составляла около 80 % в течение дня. В этих случаях были выбраны различные варианты открытия и закрытия проемов атриума, а система искусственной вентиляции была полностью отключена.

Таблица 3.1 – Состояние открытия и закрытия проемов для вентиляции атриума

Условия	Случай			
	1	2	3	4
Приточные проемы	Закрыты	Закрыты	Открыты	Открыты
Вытяжные проемы	Закрыты	Открыты	Закрыты	Открыты
Наружная температура воздуха	29°C	29°C	29°C	29°C

Полученные прогнозы в результате численного моделирования в целом приемлемо согласуются с экспериментальными измерениями. Отклонение между прогнозируемой и измеренной температурой воздуха составляет от 2 % до 6 % (Таблица 3.2 – Таблица 3. 5). Вероятная причина данного отклонения может быть связана либо с экспериментальной ошибкой, или с допущениями в численной модели, то есть тепловой массой стен, которые принимались за изолированные во время моделирования или другими источниками тепла в атриуме, которые не были учтены в моделировании.

Сравнение результатов измеренных и прогнозируемых значений температуры для четырех вышеуказанных случаев показано в следующих таблицах.

Таблица 3.2 – Сравниваемые измеренные и прогнозируемые значения температуры для случая 1.

Высота (м)	**Точка измерения**	**Результаты натурных измерений температуры воздуха (ºC)**	**Расчет - CFD**	**% Ошибка**
0	1	29.60	28.95	2.23
	2	29.90	28.90	3.47
	3	30.00	28.40	5.62
	4	29.50	28.18	4.67
4.8	1	30.60	29.13	5.03
	2	30.70	29.48	4.15
	3	31.10	29.89	4.04
	4	30.70	29.50	4.07
8.4	1	32.30	31.08	3.93
	2	33.00	31.82	3.70
	3	32.80	31.62	3.72
	4	32.20	30.94	4.07
12	1	33.90	32.42	4.58
	2	34.20	32.98	3.69
	3	33.60	32.16	4.47
	4	33.10	32.14	2.99
15.6	1	35.50	33.81	5.01
	2	37.80	36.62	3.22
	3	36.60	34.95	4.73
	4	34.80	33.40	4.20

Таблица 3.3 – Сравниваемые измеренные и прогнозируемые значения температуры для случая 2.

Высота (м)	**Точка измерения**	**Результаты натурных измерений температуры воздуха (°C)**	**Расчет - CFD**	**% Ошибка**
0	1	29.90	28.69	4.21
	2	30.20	29.03	4.04
	3	30.40	28.81	5.50
	4	30.40	29.07	4.56
4.8	1	30.10	28.96	3.95
	2	30.10	29.12	3.36
	3	30.40	29.25	3.94
	4	30.50	29.34	3.96
8.4	1	31.40	30.24	3.82
	2	32.30	31.18	3.60
	3	32.50	31.37	3.62
	4	32.50	31.26	3.96
12	1	32.30	30.92	4.47
	2	32.90	31.76	3.58
	3	33.20	31.81	4.36
	4	32.50	31.46	3.31
15.6	1	33.10	31.55	4.90
	2	34.00	32.29	5.29
	3	34.10	32.93	3.54
	4	33.50	32.85	1.96

Таблица 3.4 – Сравниваемые измеренные и прогнозируемые значения температуры для случая 3

Высота (м)	**Точка измерения**	**Результаты натурных измерений температуры воздуха (°C)**	**Расчет - CFD**	**% Ошибка**
0	1	30.00	29.33	2.28
	2	30.20	29.17	3.52
	3	30.50	28.86	5.67
	4	29.50	28.17	4.72
4.8	1	31.00	30.20	2.65
	2	31.60	30.32	4.21
	3	31.60	30.04	5.19
	4	30.70	29.49	4.12
8.4	1	32.70	31.45	3.99
	2	33.70	32.48	3.76
	3	33.10	31.90	3.78
	4	32.00	30.73	4.12
12	1	33.40	31.92	4.64
	2	33.90	33.02	2.68
	3	33.60	32.15	4.52
	4	32.10	31.02	3.47
15.6	1	34.10	32.46	5.07
	2	35.90	34.04	5.46
	3	36.00	34.72	3.70
	4	34.20	33.49	2.12

Таблица 3.5 – Сравниваемые измеренные и прогнозируемые значения температуры для случая 4

Высота (м)	**Точка измерения**	**Результаты натурных измерений температуры воздуха (ºC)**	**Расчет - CFD**	**% Ошибка**
0	1	29.70	28.26	5.09
	2	29.90	28.88	3.52
	3	30.00	28.39	5.67
	4	29.70	28.36	4.72
4.8	1	29.70	28.44	4.42
	2	29.40	28.21	4.21
	3	30.10	28.61	5.22
	4	30.30	29.10	4.12
8.4	1	31.20	30.00	3.99
	2	32.00	30.83	3.80
	3	32.10	30.61	4.87
	4	31.70	30.45	4.12
12	1	32.30	30.87	4.64
	2	32.50	31.65	2.68
	3	32.70	30.89	5.85
	4	32.00	31.10	2.89
15.6	1	32.50	30.93	5.07
	2	33.20	31.48	5.46
	3	33.00	31.82	3.70
	4	32.50	31.67	2.63

Графическое представление результатов измеренных и прогнозируемых значений температуры для каждого из четырех случаев показывается на следующих рисунках. Полученные результаты показывают, что четвертый случай с открытыми приточными и вытяжными проемами является оптимальным, так как показывает квазилинейный характер.

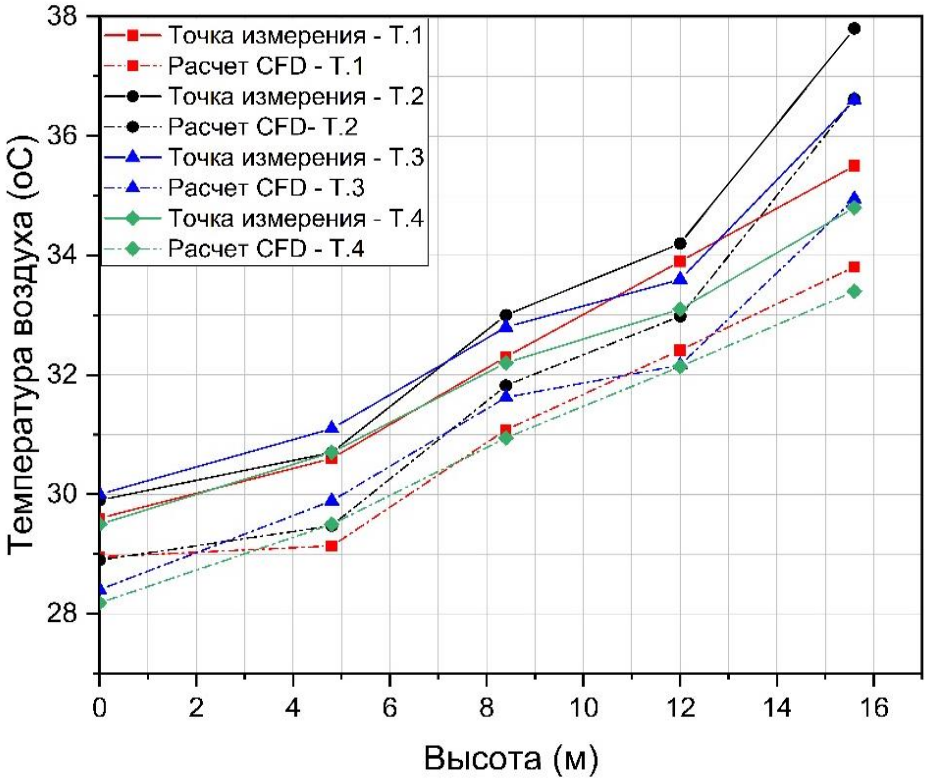


Рисунок 3.2 – Графики температуры воздуха по результатам экспериментальных измерений и численных прогнозов для случая 1 в зависимости от высоты точки измерения

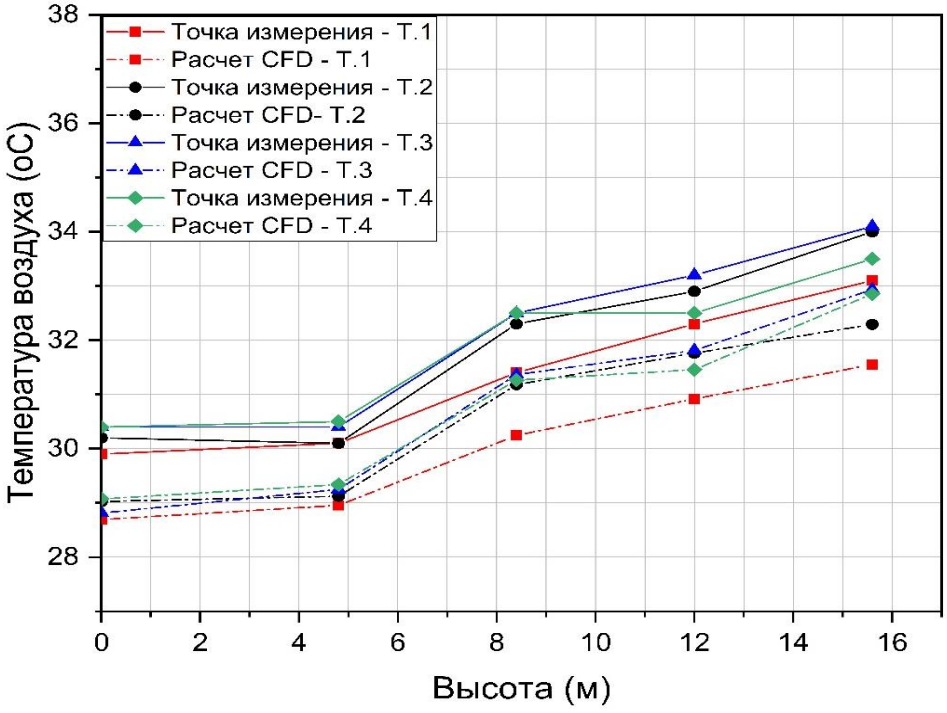


Рисунок 3.3 – Графики температуры воздуха по результатам экспериментальных измерений и численных прогнозов для случая 2 в зависимости от высоты точки измерения

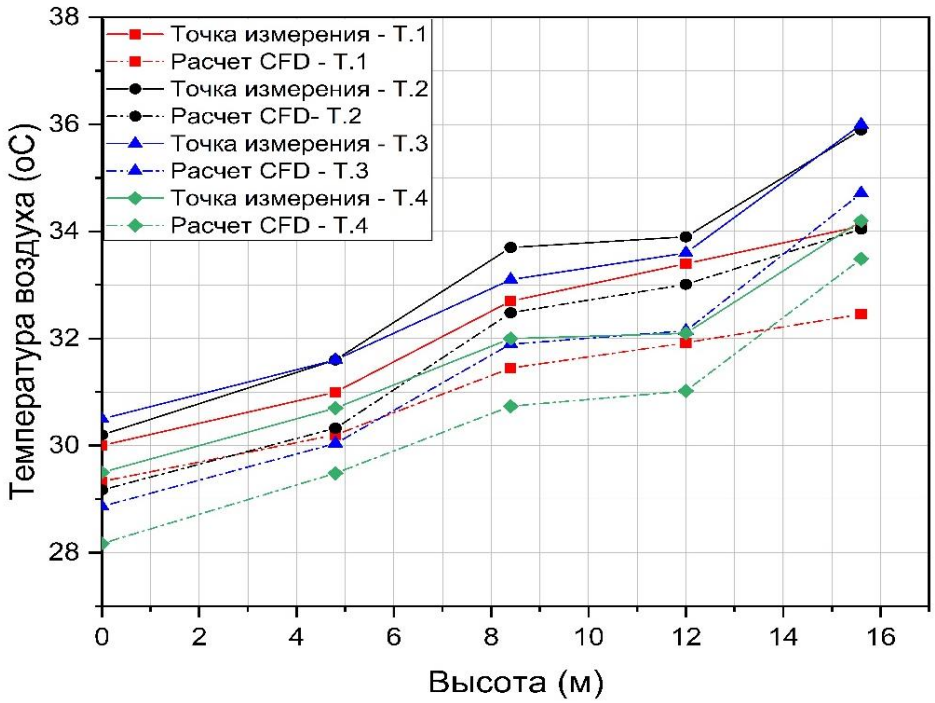


Рисунок 3.4 – Графики температуры воздуха по результатам экспериментальных измерений и численных прогнозов для случая 3 в зависимости от высоты точки измерения

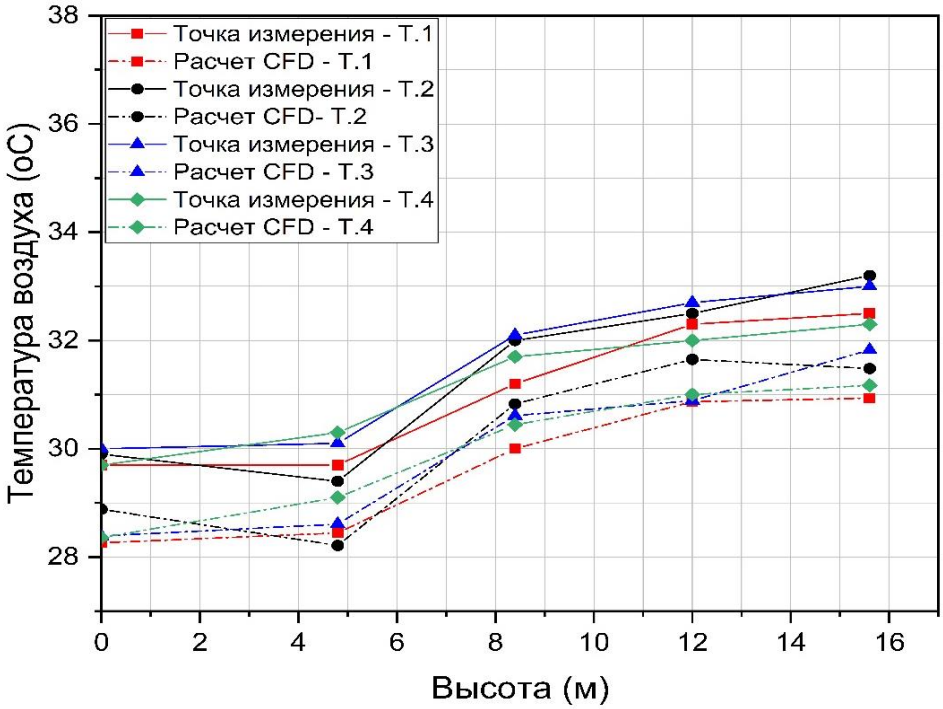
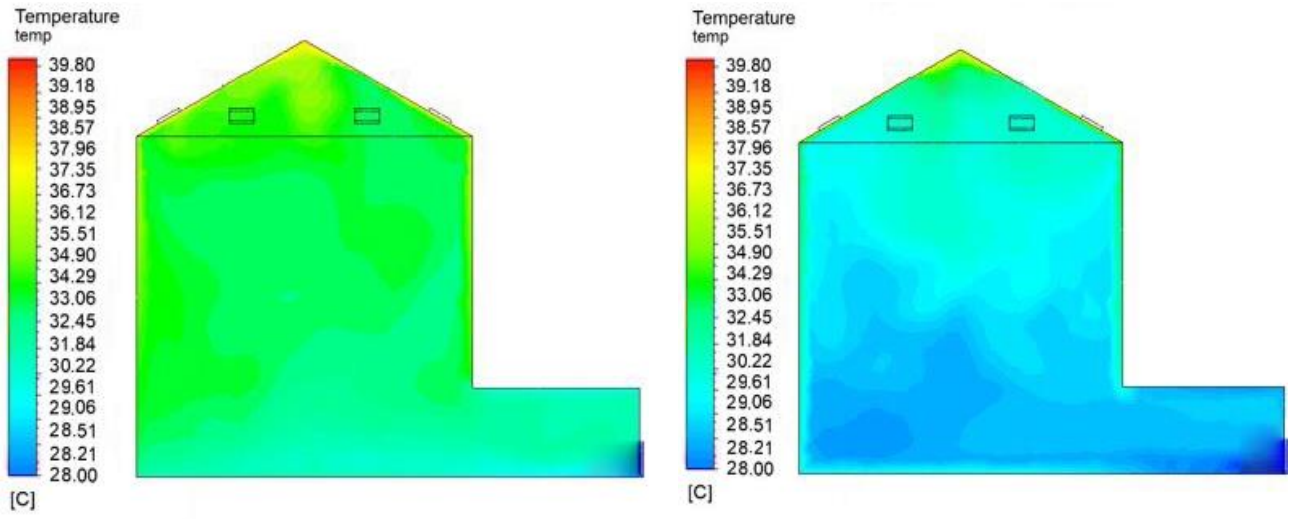
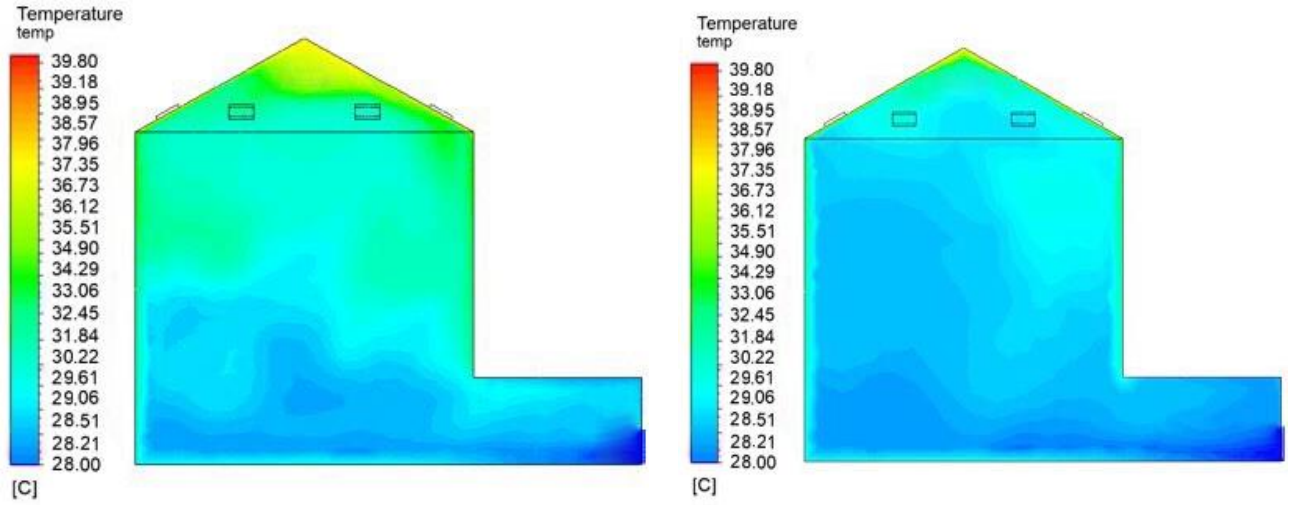


Рисунок 3.5 – Графики температуры воздуха по результатам экспериментальных измерений и численных прогнозов для случая 4 в зависимости от высоты точки измерения

На следующем рисунке 3.6 показано графическое распределение температуры в атриуме здания, полученное в результате численного моделирования каждого из четырех случаев. Во всех случаев наблюдается, что максимальная температура внутреннего воздуха концентрируется в верхней части атриума не зависимо от состояния приточных и вытяжных проемов. Наблюдается, что при открытом состоянии приточных и вытяжных проемов температура в атриуме распределяется равномерно от 30 до 32 °С по высоте атриума. Это свидетельствует о большом влияние состояния и площади приточных проемов.



а) случай 1 б) случай 2



в) случай 3 г) случай 4

Рисунок 3.6 – Графическое визуальное распределение температуры в здании с атриумом, для случаев с 1 по 4

3.4 Выводы по главе 3

Численные результаты проверки модели CFD численного для моделирования воздушного потока и распределения температуры в пространстве пятиэтажного атриума сравнились с экспериментальными измерениями. 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. 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 естественной вентиляцией, с учетом явления конвекции и радиационного теплообмена. С помощью численного метода можно проанализировать скорость потока и распределение температуры в атриуме. При этом общий воздухообмен, зависящий от разницы температур на входе и выходе, не будет равным воздухообмену в помещениях на отдельных этажах. Это требует дополнительного исследования.

Полученные результаты показали, что случай с открытыми приточными и вытяжными проемами является наиболее оптимальным состоянием и имеет квазилинейный характер распределения температуры в атриуме.

Во всех смоделированных случаях наблюдается, что максимальная температура внутреннего воздуха концентрируется в верхней части атриума не зависимо от состояния приточных и вытяжных проемов. При открытом состоянии приточных и вытяжных проемов температура в атриуме распределяется равномерно от 30 до 32 ^{o}C по высоте, что свидетельствует о большом влиянии состояния и площади приточных проемов.

ГЛАВА 4. ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АТРИУМА И ИХ ВЛИЯНИЯ НА СОЗДАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-ВОЗДУШНЫХ ПАРАМЕТРОВ В АТРИУМЕ

4.1 Теоретическая модель для расчета расхода воздуха при использовании заданных параметров вытяжных проемов в зданиях с атриумами

Построение модели расчета тепловых параметров атриумного здания

Теоретические основы модели были построены на формуле Брюса, записанной для нейтральной высоты, и использующей закон сохранения энергии [22, 57].

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, но температуры воздуха различны;
- энергия, получаемая за счет теплопроводности через стены и от излучения через стеклянную крышу здания, сохраняется и стабильна;
- основываясь на результатах эксперимента в главе 2, 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, когда поток воздуха достигает установившегося состояния;
- 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, $°C$ [51].

Фундаментальные уравнения потока

Предварительно предполагается, что число Рейнольдса для потока воздуха, проходящего через отверстия, очень велико. При входе и выходе из помещения поток принимает форму струй. Тогда давление воздуха в наименьшем сечении струй - vena contracta - равно окружающему давлению, и скорость воздуха в этих сечениях можно считать равномерной.

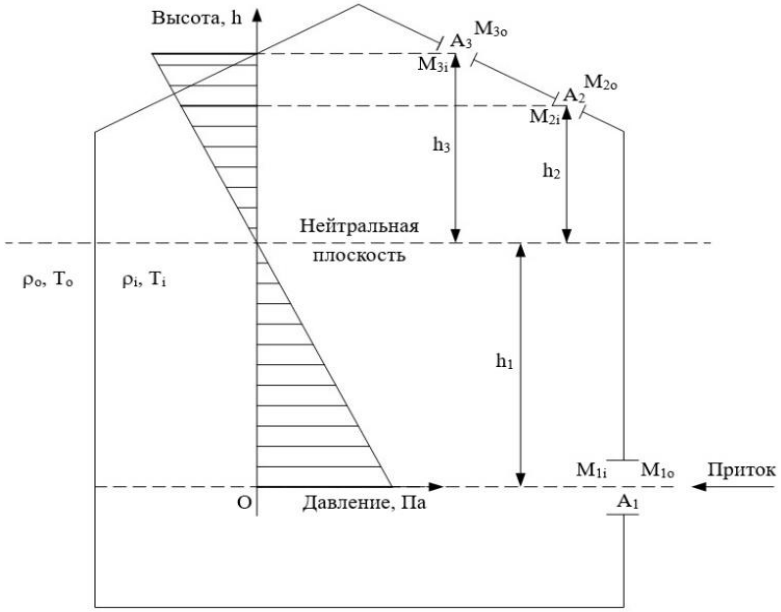


Рисунок 4.1 – Расчетная схема

где: A_1 – площадь приточных проемов, (м^2); A_2, A_3 – площадь вытяжных проемов, (м^2); T_0 – наружная температура воздуха, $°C$; T_i – внутренняя температура воздуха, (ºС); 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); $\rho_{o,}\rho_i$ – 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 между приточным отверстием на входе и вытяжным отверстием на выходе в помещении. Как показано на (Рисунок 4.1) этот

поток не является потоком как в трубе, хотя границы потока удовлетворяют требованию поточной трубы об отсутствии переноса жидкости через границы (кроме торцов). При перетекании из одного полого отверстия в другое жидкость не движется по струе. Не существует и прямой зависимости между параметрами потока (скоростями, площадями сечений и давлениями) в нижней и верхней частях помещения и в двух суженых желобах, подобно тому, как это имеет место для потока в струйной трубе. Таким образом, уравнение Бернулли для рассматриваемого потока воздуха оказалось недействительным. Оно справедливо только для случая, когда поток воздуха происходит в трубе без трения, без обмена теплотой и работой и при равномерной скорости воздуха в любом сечении потока. Даже модифицированный вариант уравнения, учитывающий трение и профиль скорости, также оказался несостоятельным.

Контрольный объем

Для того чтобы обеспечить учет всех факторов, влияющих на воздушный поток, был задан контрольный объем, представляющий собой помещение. Как показано на (Рисунок 4.2), контрольный объем в рассматриваемом случае был ограничен поверхностями помещения, двумя поперечными сечениями потока на входе и выходе.

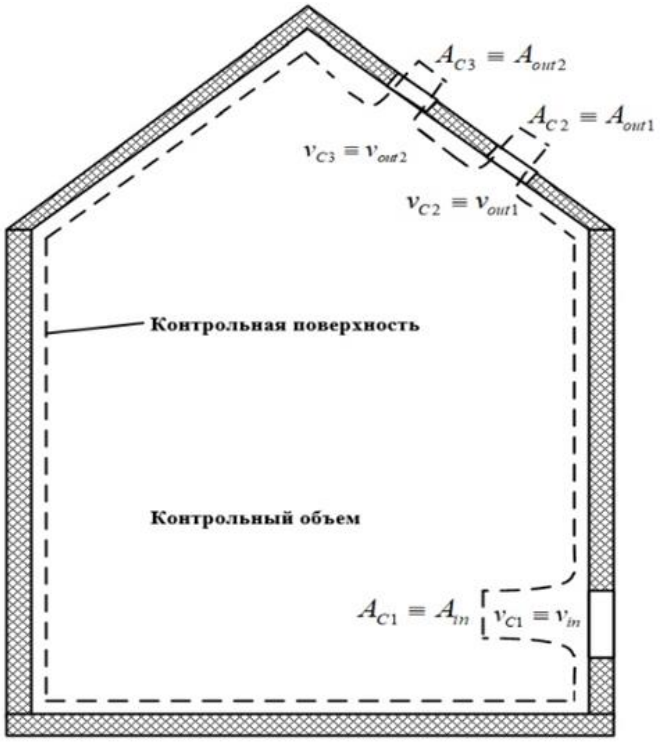


Рисунок 4.2 – Контрольный объем и контрольная поверхность для здания атриума с более чем двумя вытяжными отверстиями

В этом объеме обмен массой, энергией и импульсом через границы не происходит. В контрольном объеме рассматривалось суммарное изменение экстенсивного свойства (например, свойства, зависящего от присутствующего вещества, такого как масса, энергия и импульс). Согласно уравнению переноса Рейнольдса, суммарное изменение равно скорости изменения характеристики в контрольном объеме плюс отток этой характеристики через контрольные поверхности. В связи с оттоком интерес представляло статическое давление, скорость движения воздуха и площадь поперечного сечения в выходных отверстиях.

Статическое давление на входе было равно давлению в помещении на уровне входа, а в потоке – статическому давлению в помещении. Статическое давление на выходе равно наружному давлению на уровне выхода.

Скорость движения воздуха в потоке можно считать равномерной и определять по формуле (4.1):

$$v_c = C_v v_{c,Teop.} \tag{4.1}$$

где: v_c – скорость воздуха в потоке, м/с; C_v – коэффициент потери скорости; $v_{c,Teop.}$ – теоретически достижимая скорость (т.е. скорость потока без трения), м/с;

Площадь поперечного сечения потока может быть определена по следующей формуле (4.2):

$$A_c = C_c A_{1,2,3} \tag{4.2}$$

где: A_c – площадь сужения потока, $м^2$; C_c – коэффициент сужения; A_1 – площади приточного проемов, $м^2$, A_2, A_3 – площади вытяжного проемов, $м^2$

Баланс массы

Для контрольного объема с установившимся потоком уравнение переноса Рейнольдса приводит к уравнению неразрывности, которое гласит, что алгебраическая сумма скорости увеличения массы внутри контрольного объема и чистого оттока массы через контрольный объем равны нулю. Для случая, показанного на (Рисунок 4.2), это можно выразить формулой (4.3):

$$\rho_o A_{c1} v_{c1} - \rho_i A_{c2} v_{c2} - \rho_i A_{c3} v_{c3} = 0 \tag{4.3}$$

где: v_c – скорость воздуха в потоке, м/с; ρ – плотность воздуха, кг/м^3; A_c – площадь сужения потока, м^2; индексы “1”, “2”, “3” представляют вход и выходы, соответственно; индексы “*i*” и “*o*” означают параметры воздуха внутри и снаружи здания.

Подставив в формулу (4.3), получим:

$$\rho_o C_{c1} A_1 C_{v1} v_{Teop.1} - \rho_i C_{c2} A_2 C_{v2} v_{Teop.2} - \rho_i C_{c3} A_3 C_{v3} v_{Teop.3} = 0 \qquad (4.4)$$

или

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

где: C_d – коэффициент потери скорости потока на приточных и вытяжных проемах, определяемый как: $C_d = C_c C_v$. Обычно, $C_d = 0,6 \div 0,75$.

Уравнение импульса

Исходя из второго закона Ньютона для конечной системы, можно составить уравнение для действующих сил в контрольном объеме. Оно гласит, что чистая внутренняя сила, действующая на воздух в контрольном объеме, равна сумме временной скорости изменения импульса воздуха внутри контрольного объема и чистой скорости потока импульса. Являясь векторным, уравнение импульса может быть разбито на скалярные уравнения. В горизонтальном уравнении скоростные члены малы по сравнению с остальными членами, как и в уравнении энергии. В сочетании с неопределенностями в распределениях давления это уравнение не подходит для определения скоростей воздуха в проемах. В уравнении вертикального импульса вертикальная составляющая скорости в помещении пренебрежимо мала, и уравнение приводит к известному уравнению для линейного (гидростатического) распределения давления.

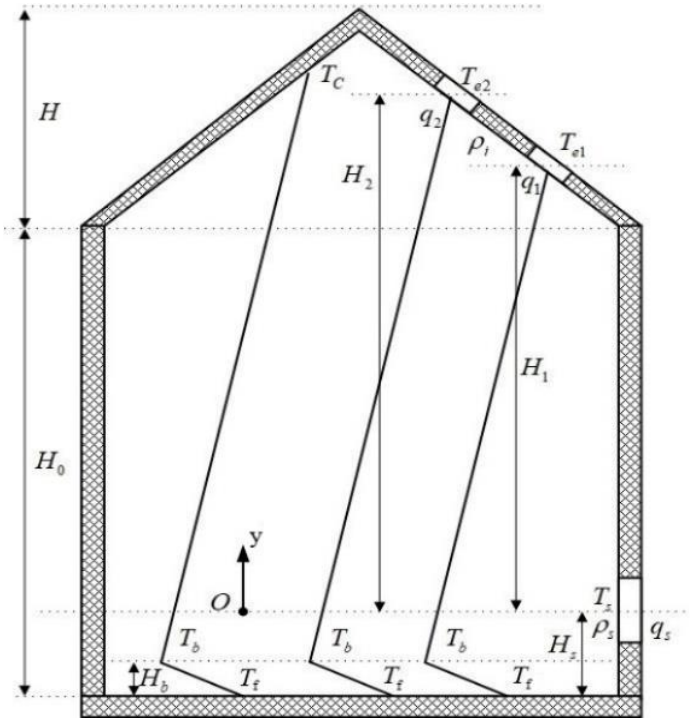


Рисунок 4.3 – Схема изменения температуры воздуха от пола T_f до покрытия T_c за счет излучения снаружи

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 4.3. Вертикальный профиль температуры внутри помещения изменяется по формуле (4. 5):

$$T = T_b + \gamma H_{1,2} \tag{4.5}$$

где: T – температура на любой высоте, $°C$; T_b – температура пограничного слоя на полу, $°C$; T_f – температура поверхности верхнего слоя пола, $°C$; T_c – температура поверхности потолка, $°C$; γ – изменяющийся линейный коэффициент; $H_{1,2}$ – высота между приточным и двумя вытяжным проемами, м.

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 (4.6):

$$\begin{aligned} p_i(h) &= p_{i0} - \int_0^h \rho_i g dh \\ p_o(h) &= p_{o0} - \int_0^h \rho_o g dh \end{aligned} \tag{4.6}$$

Разность давлений между наружным и внутренним воздухом на любой высоте представлена формулой (4.7)

$$\Delta p(h) = -\int_0^h (\rho_o - \rho_i) g dh - (p_{i0} - p_{o0}) \tag{4.7}$$

Видно, $\Delta p = p_i - p_o$ – это разница давлений внутри и снаружи здания на любой высоте h. За счет этой разницы воздух поступает снаружи внутрь. Используя формулу (4.8), предположим, что поток воздуха несжимаем, на нейтральной поверхности всегда существует положение, при котором давление внутри и снаружи одинаково:

$$p_i(h_n) = p_0(h_n) \tag{4.8}$$

где: h_n – высота нейтральной поверхности, (м); g – ускорение свободного падения (м/с^2); ρ_o, ρ_i – плотность воздуха снаружи и внутри, (кг/м^3); T_0 – температура в нейтральной плоскости снаружи здания атриума, $°C$.

Формула состояния воздуха имеет вид: $p = \rho RT \quad \Rightarrow \rho_o RT_o(h_n) = \rho_i RT_i(h_n)$

$$\Rightarrow \rho_i = \rho_o \frac{T_o}{T_i} \Rightarrow \frac{\rho_o - \rho_i}{\rho_i} = \frac{T_i - T_o}{T_0} \tag{4.9}$$

Определенное на любой высоте, приведенное выше формула (4.9) всегда считается приближенным, как и формула (4.10).

$$\frac{\rho_o - \rho_i}{\rho_i} \approx \frac{T_i - T_o}{T_o} \tag{4.10}$$

Подставив формулу (4.10) в формулу (4.7), получим:

$$\Delta p(h) = -\Delta p_i - \frac{\rho g}{T_o} \int_0^h (T_i - T_o) dh \tag{4.11}$$

Поскольку $\frac{\rho_o - \rho_i}{\rho_i} \approx \frac{T_i - T_o}{T_o}$ и температура изменяется линейно

$T(h) = T_b + \gamma h$

Подставляя $T(h)$ в уравнение (4.11), получаем:

$$\Delta p(h) = -\Delta p_0 - \frac{\rho g}{T_o} \int_0^h (T_b - T_o + \gamma h) dh = -\Delta p_0 - \frac{\rho g}{T_o} \left[(T_b - T_o) h + 0{,}5 \gamma h^2 \right] \tag{4.12}$$

Формула (4.11) представляет разностью давлений на любой высоте снаружи и внутри здания. Из приведенных выше результатов следует, что на входе:

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

На высоте проема H_1 (расстояние от H_1) до проема H_0, как:

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

На высоте проема H_2 (расстояние от H_2) до проема H_0, как:

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

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

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

где: C_d – коэффициент потери скорости потока на приточных и вытяжных отверстиях. Обычно, $C_d=0{,}6\div0{,}75$; 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:

$$q_s=C_dA_1\sqrt{\frac{-2\Delta p_o}{\rho}} \tag{4.13}$$

Например:

$$q_1=C_dA_2\sqrt{\frac{-2\Delta p_1}{\rho}}=C_dA_2\sqrt{\frac{2\left[\Delta p_o+\rho g\beta\left[\left(T_b-T_o\right)H_1+0{,}5\gamma H_1^2\right]\right]}{\rho}} \tag{4.14}$$

$$q_2=C_dA_3\sqrt{\frac{-2\Delta p_2}{\rho}}=C_dA_3\sqrt{\frac{2\left[\Delta p_o+\rho g\beta\left[\left(T_b-T_o\right)H_2+0{,}5\gamma H_2^2\right]\right]}{\rho}} \tag{4.15}$$

Обозначим, что $\beta=\frac{1}{T_o}$. Из уравнений (4.14) и (4.15) получаем уравнение (4.16). Общий расход воздуха через приточных и два вытяжных проема:

$$q_s=q_1+q_2 \tag{4.16}$$

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

Закон сохранения энергии

Сохранение энергии выражает первый закон термодинамики. Для контрольного объема мы получаем уравнение, которое гласит, что скорость изменения запасенной энергии (кинетической, потенциальной и внутренней энергии) внутри контрольного объема плюс отток запасенной энергии через контрольную поверхность. Оно равно скорости обмена теплотой и работой (например, чистое поступление теплоты и обмен мощностью). 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; и 3) уравнения излучения линеаризованы из-за умеренной разницы температур. Температура приточного воздуха считается известной. Предположим, что у нас есть следующая модель температуры, как показано на (Рисунке 4.3).

Уравнение сохранения энергии:

$$E = E_1 + E_2 \tag{4.17}$$

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. Это означает, что за счет энергии, которую воздух получает от источника тепла с приходом в здание, температура повышается (T_s до T_e).

Предположив, что распределение температуры линейно, мы имеем:

$$\begin{cases} T_{e_1} = T_b + \gamma H_1 \\ T_{e_2} = T_b + \gamma H_2 \end{cases} \tag{4.18}$$

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 проемами, м.

Кроме того, на уровне пола происходит конвекционный теплообмен между воздухом, входящим в здание, и от пола. Эта энергия выражается следующим уравнением:

$$E_3 = \alpha_f \tau_e A_f \left(T_f - T_b\right) \tag{4.19}$$

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.

Рассмотрим крайне малую площадь dA на стеклянной крыше, которая поглощает излучение солнца, и энергия его излучения, как показано на (Рисунке 4.4).

Она составляет:

$$dE_3 = \alpha_r \tau_e dA\left(T_c - T_f\right)$$
$$dA = l dh'$$

где: α_r – коэффициент радиационной теплоотдачи на полу Вт/(м^2·К); τ_e – коэффициент пропускания инфракрасной части энергетического спектра; T_f – температура поверхности на слоя, $°C$; T_c – температура поверхности потолка, $°C$

.

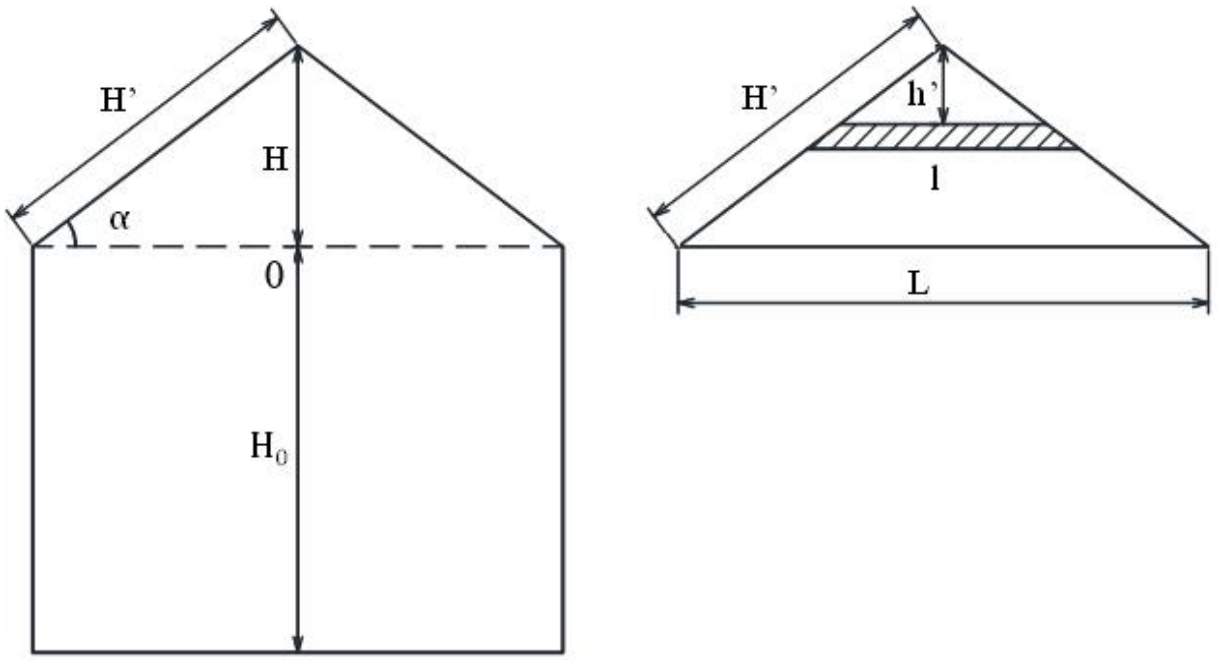


Рисунок 4.4 – Схема по правилу подобия интегрируется по всей четверти $(\frac{1}{4})$ кровли шириной L и умножается на 4

где: L – ширина крыши, м; H’ – длина крыши, м; H – высота крыши, м; H_o – высота от пола до карниза, м; α – угол наклона крыши.

Согласно правилу подобия из рисунка 4.4, имеем следующие результаты:

$$\frac{l}{L}=\frac{h^{'}}{H^{'}}\Rightarrow l=\frac{L}{H^{'}}h^{'}$$

Кроме того, мы имеем следующее: $H^{'}=\frac{H}{\sin\alpha}$; $h^{'}=\frac{h}{\sin\alpha}$; $dh^{'}=\frac{dh}{\sin\alpha}$

$$\Rightarrow dA=\frac{L\sin\alpha}{H}h^{'}dh^{'}=\frac{L}{H}\frac{1}{\sin\alpha}hdh$$

$$\Rightarrow T_e=T_b+\gamma\left(H_0+H-h\right)$$

$$\Rightarrow dE_3=\alpha_r\tau_e\frac{L}{H\cdot\sin\alpha}hdh\left[T_b+\gamma\left(H_0+H-h\right)\right]$$

Интегрируем по всей четверти крыши $(\frac{1}{4})$ с переменной h в диапазоне от $0\rightarrow H,$ тогда имеем следующий вид интегрального уравнения (4.19).

E_3 – вычисляется по формуле:

$$E_3 = \int_0^H dE_3 = \int_0^H \alpha_r \tau_e \frac{L}{H \sin\alpha} h\left[T_b + \gamma\left(H_0 + H - h\right)\right] dh$$

$$= \frac{\alpha_r \tau_e L}{H \sin\alpha}\left[T_b \frac{h^2}{2} + \gamma\left(H_0 + H\right)\frac{h^2}{2} - \gamma\frac{h^3}{3}\right]_0^H$$

$$= \frac{\alpha_r \tau_e L}{H \sin\alpha}\left[T_b \frac{H^2}{2} + \gamma\left(H_0 + H\right)\frac{H^2}{2} - \gamma\frac{H^3}{3}\right] \qquad (4.20)$$

$$= \frac{\alpha_r \tau_e LH}{2\sin\alpha}\left[T_b + \gamma\left(H_0 + H\right) - \gamma\frac{2H}{3}\right]$$

$$= \frac{\alpha_r \tau_e LH}{2\sin\alpha}\left[T_b + \gamma H_o + \gamma\frac{H}{3}\right]$$

Таким образом, излучаемая теплота, поглощаемое полом от потолка на всех четырех сторонах крыши, равно:

$$E_4 = 4E_3 = \frac{2\alpha_r \tau_e LH}{\sin\alpha}\left[T_b + \gamma H_o + \gamma\frac{H}{3}\right] \qquad (4.21)$$

Кроме того, происходит обмен энергией между воздухом, поступающим в помещение, и полом. Воздух нагревается за счет конвекции у поверхности пола. Обмен энергией описывается приведенным ниже уравнением:

$$\rho c_p q_s \tau_e \left(T_b - T_0\right) = \alpha_f \tau_e A_f \left(T_f - T_b\right)$$

Таким образом, мы имеем три энергетических уравнения следующего вида:

$$E = \rho c_p q_1 \left(T_b + \gamma H_1 - T_0\right) + \rho c_p q_2 \left(T_b + \gamma H_2 - T_0\right) \qquad (4.22)$$

$$\frac{2\alpha_r \tau_e LH}{\sin\alpha}\left(T_b + \gamma H_o + \gamma\frac{H}{3}\right) = \alpha_f \tau_e A_f \left(T_f - T_b\right) \qquad (4.23)$$

$$\rho c_p q_s \tau_e \left(T_b - T_0\right) = \alpha_f A_f \tau_e \left(T_f - T_b\right) \qquad (4.24)$$

В первом уравнении (4.22) показано, что общая тепловая нагрузка в помещении переносится вентиляционным воздухом без потерь. Во втором уравнении (4.23) показано, что излучаемая теплота от остекления, поглощаемая полом, передается слою воздуха над полом. Третье уравнение (4.24) выражает то, что вентилируемый воздух получает тепловую энергию за счет конвекции у пола.

Целью данного исследования является использование экспериментальных результатов для определения нескольких коэффициентов, определяющих

оптимальную площадь приточных и вытяжных отверстий. Эти коэффициенты затем используются методом интерполяции для других случаев. Этот способ называется полуэмпирическим методом.

Мы видим, что в уравнении (4.22) энергия E является неизвестной. Эта энергия получается за счет поглощения солнечной энергии через стеклянную крышу и от источников тепла, уже имеющихся в здании, таких как люди, компьютеры и отопительные приборы T_{e1} ,T_{e2} .

По результатам эксперимента можно определить, что температура на вытяжных проемах 1 и 2 составляет:

Мы имеем:

$$\begin{cases} T_{e1} = T_b + \gamma H_1 \\ T_{e2} = T_b + \gamma H_2 \end{cases} \tag{4.25}$$

$$\Rightarrow \gamma = \frac{T_{e1} - T_{e2}}{H_1 - H_2} \tag{4.26}$$

$$\Rightarrow T_b = T_{e1} - \gamma H_1 \tag{4.27}$$

Подставив результаты уравнений (4.26) и (4.27) в уравнение энергии (4.22), можно получить общую энергию E, содержащуюся в здании.

Предполагая, что общая энергия E известна, цель заключается в исследовании q_1, q_2 при изменении площади стеклянной крыши или высоты открытых вентиляционных проемов. В этом случае, как будет меняться тепловая стратификация в атриуме здания.

Из уравнений (4.23) и (4.24) имеем:

$$\frac{2\alpha_r LH}{\sin\alpha}\left(T_b + \gamma H_o + \gamma\frac{H}{3}\right) = \rho c_p q_s \left(T_b - T_0\right)$$

$$\Rightarrow q_s = \frac{2\alpha_r LH}{\sin\alpha}\frac{1}{\rho c_p}\frac{T_b + \gamma H_o + \gamma\dfrac{H}{3}}{T_b - T_0} \tag{4.28}$$

Итак, $q_s = q_1 + q_2$

где:

$$q_1 = c_d A_2 \sqrt{\frac{2\left[\rho g \beta \left[\left(T_b - T_0\right) H_1 + 0.5 \gamma H_1^2\right] + \Delta p_0\right]}{\rho}} \tag{4.29}$$

$$q_2 = c_d A_3 \sqrt{\frac{2\left[\rho g \beta \left[\left(T_b - T_o\right) H_2 + 0.5 \gamma H_2^2\right] + \Delta p_0\right]}{\rho}} \tag{4.30}$$

$$\Delta p_o = \frac{q^2}{c_{d0}^2 A_b^2} \frac{\rho}{2}$$

$$\Rightarrow f_1\left(T_b, \gamma\right) = q_s - q_1 - q_2 = 0 \tag{4.31}$$

Таким образом, путем применения фундаментальных уравнений потока, описывающих баланс массы, сохранение энергии и импульса, мы получим формулу, учитывающую все необходимые параметры для анализа и проектирования систем естественной вентиляции с использованием тепловой тяги в качестве доминирующей движущей силы, что позволяет получать достоверные решения при температурной стратификации в зданиях с атриумами и более чем двумя вытяжными отверстиями. Такими различными геометрическими параметрами являются площадь, высота, ориентация, форма конструкции крыши, отношение высоты к ширине, а также размеры и расположение вертикальных и горизонтальных приточных и вытяжных вентиляционных отверстий. Использование данной формулы позволяет проводить аналитические исследования архитектурно-строительных решений, имеющих важное практическое значение на ранних стадиях проектирования зданий с атриумами, а именно:

- для оптимизации площади приточных и вытяжных отверстий необходимо рассмотреть следующие вопросы, а именно:

- каково оптимальное соотношение площади вытяжных и приточных проемов в атриуме при различной его высоте?

- направление проема (вертикальное, горизонтальное или наклонное) для здания с атриумом, имеющим наклонное и вертикальное остекление?

- каковы соотношения площади отверстий и расхода воздуха при постоянном перепаде температур или постоянном подводимом тепловом потоке?

- какова связь между расходом воздуха, площадью отверстия и соотношением площадей отверстий при постоянном перепаде температур или с постоянным подводимым тепловым потоком?

4.2 Разработка алгоритма расчета расхода воздуха и температуры воздуха на разных этажах атриумов зданий

Применение методики расчета оптимизации геометрических параметров вытяжных и приточных проемов атриумных зданий

Из уравнения (4.22) следует, что:

$$f_2(T_b,\gamma)=0$$

$$f_2(T_b,\gamma)=\rho c_p q_1\left(T_b+\gamma\cdot H_1-T_o\right)+\rho c_p q_2\left(T_b+\gamma H_2-T_o\right)-E=0 \qquad (4.32)$$

Это нелинейное уравнение с двумя переменными T_b и γ. T_b можно определить приближенным методом секущих следующим образом:

Для нахождения приближенного решения нелинейных уравнения можно использовать метод хорд, где T_b температура оценивается по следующей формуле:

Установим, что: $X=\left[T_b,\gamma\right]$

Инициализация значения X на шаге 0 и 1.

$$X_0=\left[T_{b0},\gamma_0\right]$$
$$X_1=\left[T_{b1},\gamma_1\right]$$

Предположим, что

$$\begin{cases} T_{b0}=T_s+0{,}001 \\ \gamma_0=0{,}001 \end{cases}$$

$$\begin{cases} T_{b1}=T_{b1}+0{,}001 \\ \gamma_1=0{,}002 \end{cases}$$

Предположим, что решение уравнения на итерации (i+1) имеет следующий вид

$$X_{i+1} = X_i - J^{-1}F_i$$

где: $F = [\, f_1, f_2 \,]^T$

Матрица 2x2

$$J = \begin{vmatrix} \dfrac{f_1(i) - f_1(i-1)}{T_b(i) - T_b(i-1)} & \dfrac{f_1(i) - f_1(i-1)}{\gamma(i) - \gamma(i-1)} \\ \dfrac{f_2(i) - f_2(i-1)}{T_b(i) - T_b(i-1)} & \dfrac{f_2(i) - f_2(i-1)}{\gamma(i) - \gamma(i-1)} \end{vmatrix}$$

Обозначим:

$$f_1(i) \equiv f_1\big(T_b(i), \gamma(i)\big)$$

$$f_2(i) \equiv f_2\big(T_b(i), \gamma(i)\big)$$

$T_b(i); \gamma(i)$ представляют собой значения T_b и γ на итерации (i).

После нахождения T_b и γ мы можем определить температуру на вытяжных отверстиях и расход воздуха из следующих двух уравнений:

$$T_{e1} = T_b + \gamma H_1$$
$$T_{e2} = T_b + \gamma H_2$$

$$q_s = \frac{2\alpha_r LH}{\sin\alpha} \frac{1}{\rho c_p} \frac{T_b + \gamma H_o + \gamma \dfrac{H}{3}}{T_b - T_s}$$

Применение данного алгоритма является важным шагом, так как он позволяет оптимизировать размеры вытяжных и приточных отверстий в атриуме на различных высотах для обеспечения снижения температуры воздуха в атриуме проектируемого здания с учетом характерных геометрических параметров атриума и повышения эффективности систем охлаждения здания. Тепловую стратификацию в атриумах зданиях трудно уменьшить с помощью механической системы вытяжной вентиляции. Поэтому использование пассивных методов для уменьшения температурного градиента по высоте в атриуме здания позволит

снизить нагрузку на систему кондиционирования воздуха и, следовательно, уменьшить стоимость затрачиваемой на это электроэнергии и повысить энергоэффективность атриума здания.

4.3 Разработка блок-схемы для расчетной компьютерной программы.

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. Результаты работы программы позволяют быстро и точно определять оптимальные геометрические параметры для ранних этапов проектирования зданий с атриумами. На основе полученных результатов можно сделать вывод об оптимальной площади вытяжных и приточных проемов в атриуме при различной его высоте для обеспечения снижения температуры воздуха в атриуме для рассматриваемого здания.

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. При поиске температур на уровне этажей атриума используется допущение о линейном распределении температура по высоте, выполняется пространственное суммирование для аппроксимации множества точек на изображении прямыми линиями. Для поиска контуров программа использует алгоритмы линейного преобразования исходного изображения для выделения областей изменения температур. Она выполнена на языке С++. Тип ЭВМ: ПК на базе процессора Intel×86. Объем программы 42 Кб (приложение Б), Блок-схема алгоритма изображена следующим образом, показанным на рисунике 4.5 а и б. В программе решаются три основных расчета:

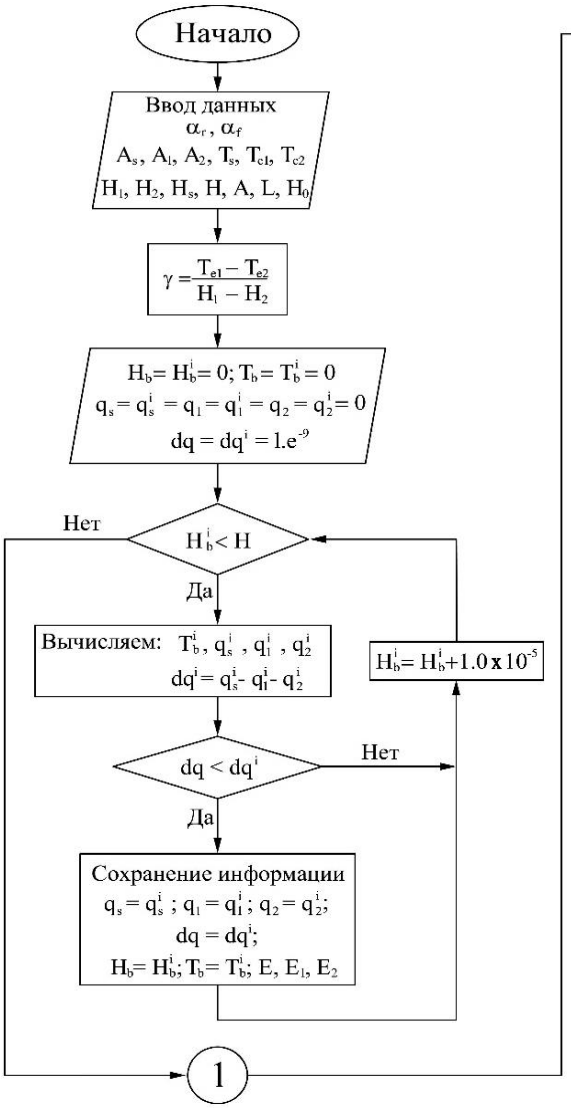


Рисунок 4.5 а – Блок схема первой стадии программы

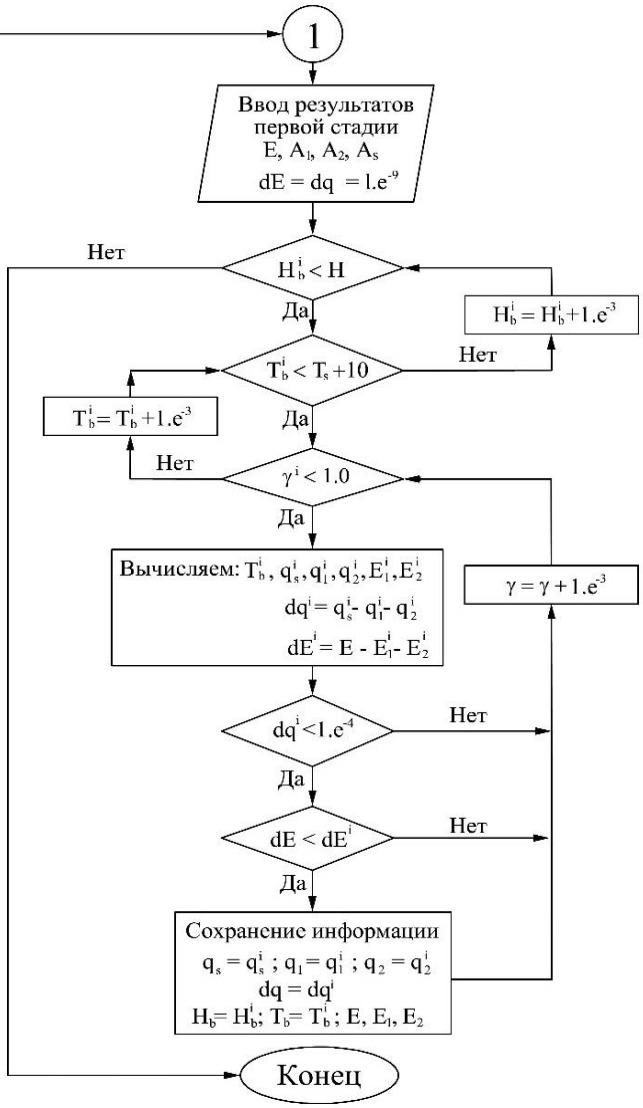


Рисунок 4.5 б – Блок-схема второй стадии разработки программы

- расчет расхода воздушных потоков на приточных и вытяжных проемах, применение формулы (4.28) и (4.29);
- расчет суммарной энергии E от излучения и от людей, механизмов, работающих внутри здания, по формуле (4.22);
- расчет температур воздуха и оптимальной площади вытяжных проемов в атриуме при различной высоте по формулам (4.25) и (4.30).

Исходные параметры для расчетов включают: размеры вытяжного и приточного отверстий для площади – A_s, A_1, A_2, коэффициент конвективной теплоотдачи на полу – α_r, коэффициент радиационной теплопередачи – α_f,

высоту расположения приточного и двух вытяжных вертикальных – H_s, H_1, H_2, площадь пола здания – A_f, ширина крыши – L, длина крыши – H', высота крыши – H, высота от пола до карниза – H_o, а также исходные данные по температуре воздуха на вытяжных и приточном отверстиях – T_s, T_{e1}, T_{e2}.

4.4 Пример расчета с использованием предлагаемой методики, проверочные эксперименты. Предложения по созданию геометрических параметров атриумов (объем, ширина и высота приточных и вытяжных проемов)

Методика и последовательность измерений, приборы приведены в главе 2. Ниже приводятся результаты измерений, средние за весь период с 15 июля по 1 августа 2021 года.

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 °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 = 118 кВт.

Энергия E будет оставаться постоянной, так как площадь стеклянной крыши для этого здания постоянна как и энергия поступающая извне. Построение программы для решения уравнений (4.31) и (4.32), когда E известна, имеет большое значение при проектировании и использовании здания, поскольку мы не имеем возможности ежедневно измерять температуру на крыше и у двери, чтобы знать поток воздуха и температурную стратификацию при изменении площади проема у двери и снаружи. Благодаря программе для вычисления и предложенным формулам архитектор или проектировщик может дать рекомендации по открыванию или закрыванию проемов для достижения желаемой температурной стратификации в здании без необходимости использования измерительного оборудования.

В данном случае это выглядит следующим образом: 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: (рисунок 4.6)

На рисунке 4.6 показана зависимость расхода воздуха от (шага) итераций программы. Поскольку алгоритм использует метод итерации, программа найдет решение, когда будет выполнено условие равенства расхода воздуха на приточных отверстиях и расхода воздуха на двух вытяжных проемах, то есть $dq = q_s - q_1 - q_2 = 0.$ Как было сказано выше, программа изменяет параметры итераций T_b, H_b, чтобы найти q_s, q_1, q_2 а затем проверяет $dq = q_s - q_1 - q_2 = 0$.

Если выполняется условие: $dq < 10^{-6}$, то программа сходится, то есть находит решение. На графике синяя линия обозначает dq, оранжевая линия обозначает q_s, фиолетовая линия обозначает q_1, а черная линия обозначает q_2 при изменении параметров итерации. Мы видим, что программа имеет только одно сходящееся решение на конкретной итерации при определенных значениях T_b, H_b (признаком сходимости является стремление графика к нулю). Эти значения сохраняются и являются решением задачи.

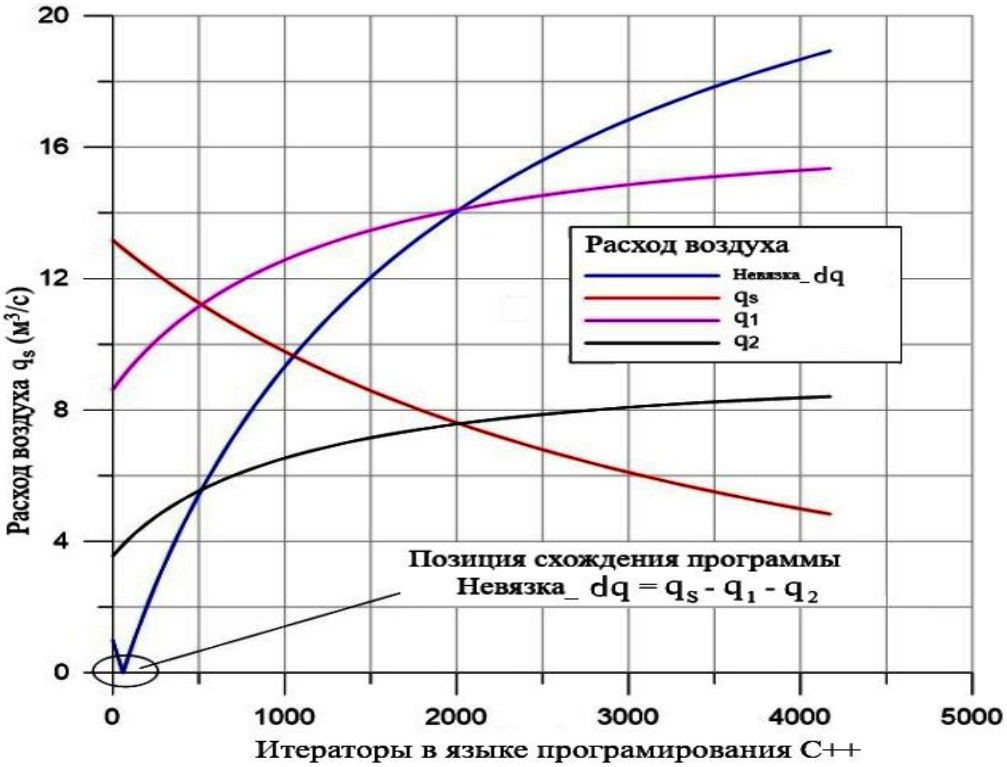


Рисунок 4.6 – Зависимость расхода воздуха от итератора программы

На рисунке 4.7 показана зависимость градиента температуры от высоты при различной площади приточного отверстия. Видно, что при небольшой площади приточного отверстия поток воздуха извне в здание происходит слабо, что приводит к быстрому нагреву здания из-за поглощения излучения стеклянной крышей, и следовательно, коэффициент температурного градиента очень высокий. Постепенное увеличение площади приточного отверстия приводит к увеличению потока воздуха в здании и большему обмену воздуха с внешней средой. Это приводит к уменьшению разницы температур внутри здания на разных высотах по

сравнению с температурой воздуха, поступающего через приточные отверстия, и в результате коэффициент температурного градиента снижается.

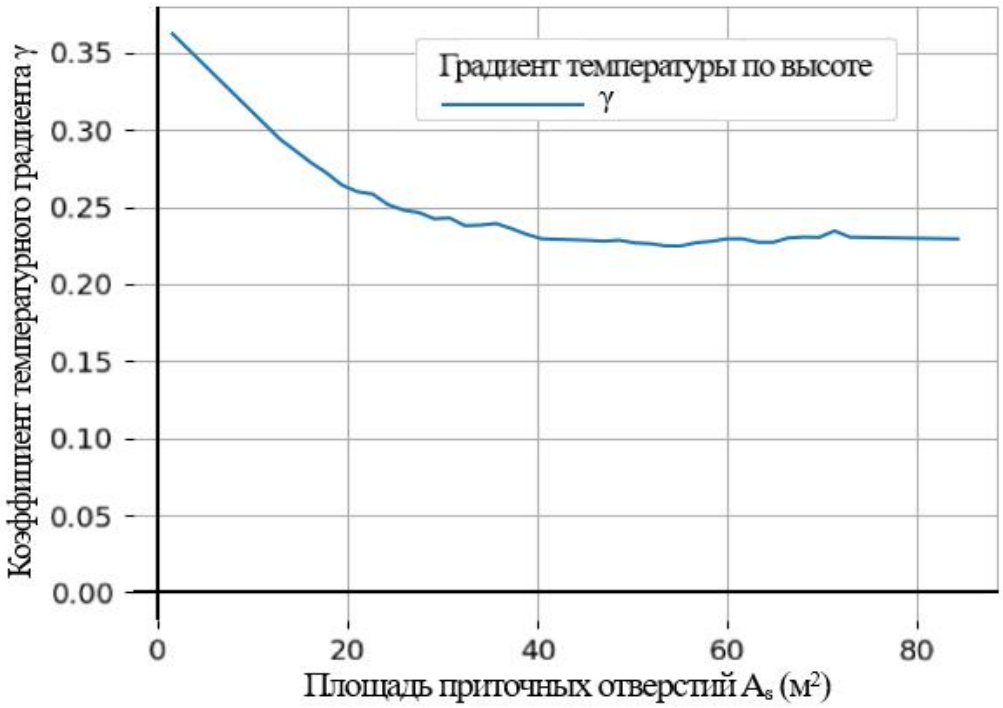


Рисунок 4.7 – Зависимость величины коэффициента γ от величины площади приточных отверстий

На рисунке 4.8 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 количества вытяжных проемов с одной стороны A_1 = 1,4 х 1,2 х (5 отв.) = 8,4 м^2; A_2 = 1,4 х 1,2 х (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.

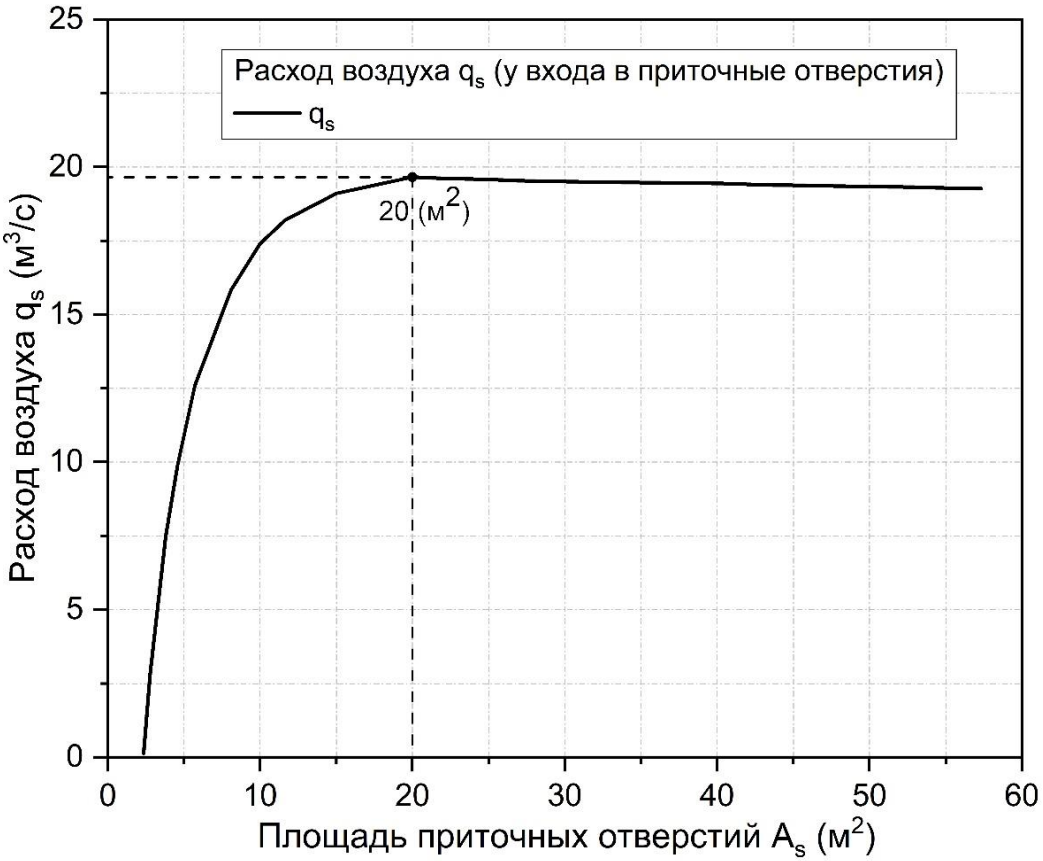


Рисунок 4.8 – Зависимость расхода воздуха от площади приточных отверстий при постоянной площади вытяжных отверстий A_1 = 1,4 х 1,2 х (5 отв.) = 8,4 м^2; A_2 = 1,4 х 1,2 х (3 отв.) = 5,04 (м^2)

Как видно из рисунка 4.8, при увеличении площадь приточных проемов с 0 до 20 м^2 расход воздуха q_s резко возрастает. При увеличении площади притока до 60 м^2 расход воздуха практически не увеличивается. В атриуме количество открытых входных дверей обычно ограничено одной-двумя дверьми из соображений безопасности. Остальные две могут быть закрыты. Летом, если требуется увеличить приток, надо закрыть остальные двери сквозными воздухопроницаемыми решетками, а стеклянные двери открыть.

На рисунке 4.9 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. Однако повышение температуры пола и краевого слоя при увеличении площади поверхности пола незначительно. Это можно объяснить тем

фактом, что количество излучения от стеклянной крыши постоянно (из-за ее постоянной площади). И это количество теплового излучения используется для повышения температуры поверхности пола.

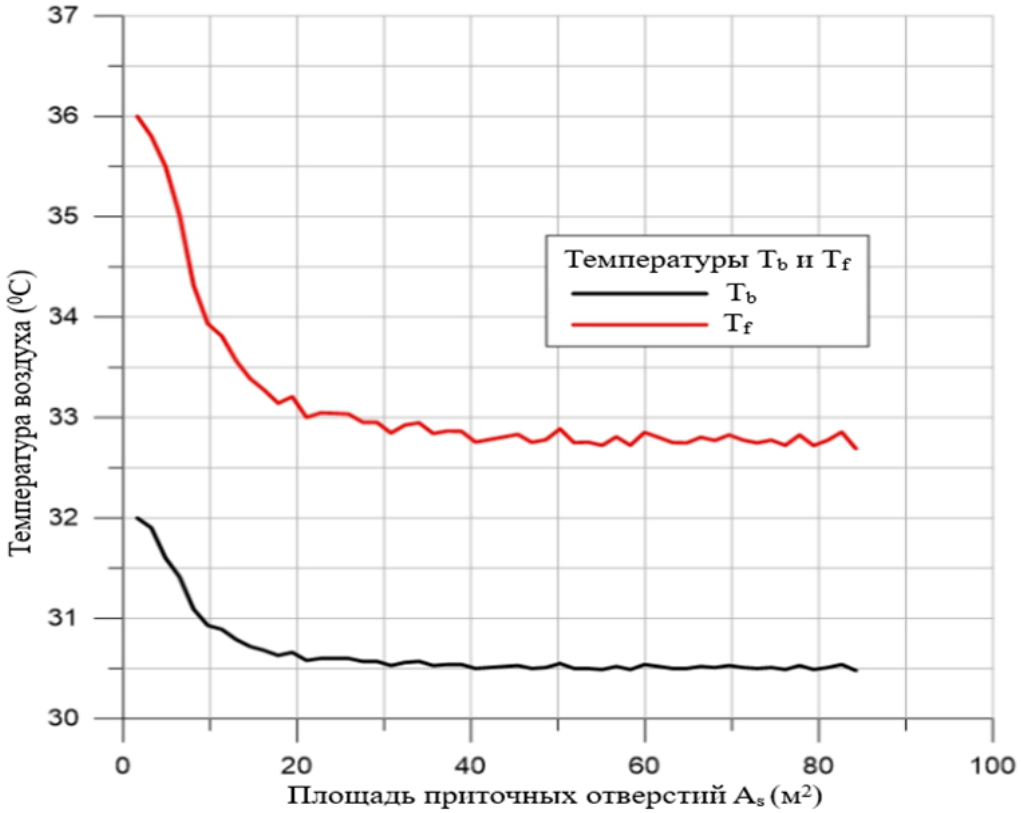


Рисунок 4.9 – Зависимость температуры поверхности пола и температуры пограничного слоя от площади приточных проемов

Вытяжные отверстия в остеклении (открывающиеся фрамуги) предназначены для дымоудаления в случае пожара. В обычной ситуации они закрыты. Их закрытие и открывание производиться автоматически. Роль вытяжных отверстий выполняет вытяжная механическая вентиляция через вентиляцию камеру, которая расположена на верхнем этаже. Механическая вентиляция производится электрическими мощными вентиляторами. На это затрачивается большое количество электроэнергия. В жаркий летний период целесообразно совмещать дымоудаление с вытяжной естественной вентиляцией. Это позволит экономить электроэнергию. Это наглядно показано на рисунке 4.9, где показаны графики измерения температуры поверхности пола атриума и температуры

воздуха в пограничном слое на 1-м этаже в зависимости от площади приточных проемов.

На рисунке 4.10 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. Она определена по формуле из формулы (4.33).

$$\gamma = d(T - T_s) / dH \tag{4.33}$$

Это означает, что разница температур приточных и вытяжных отверстий постепенно уменьшается. Это можно объяснить следующим образом: когда приточное отверстие маленькое, объем воздухообмена с внешней средой невелик. На рисунке 4.10 это выражается через небольшой расход при малом открытии приточных отверстий. Обычно при закрытых дверях здание представляет собой почти закрытую коробку. Теплота, поглощаемое зданием в результате излучения, нагревает воздух в здании, что приводит к повышенному градиенту температур при увеличения приточных отверстий. Маленькая площадь приточных отверстий приводит к более высокой температуре пограничного слоя. По мере постепенного увеличения площади приточных отверстий, большее количество воздуха внутри здания обменивается с наружным воздухом, что приводит к разнице температур на разных высотах здания по сравнению с уменьшающейся температурой воздуха у приточных проемов, 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.

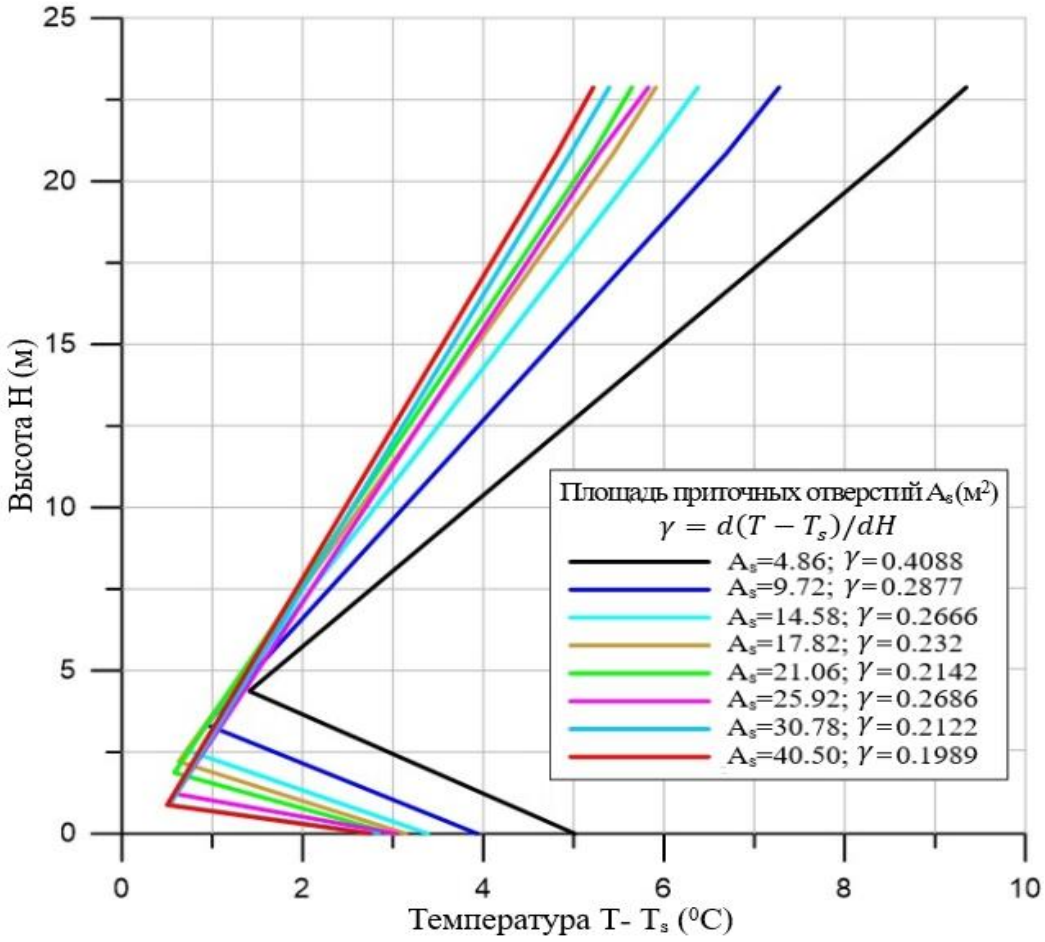


Рисунок 4.10 – Зависимость температурной стратификации от высоты над уровнем пола при различных площадях приточных проемов: температура воздуха на любой высоте – T, температура воздуха у приточных – T_s

На рисунке 4.10 показано, что температура воздуха на полу, нагретая за счет солнечной радиации резко уменьшается на первом этаже за счет относительно прохладного приточного воздуха. После этого за счет стратификации температура возрастает. Скорость возрастания зависит от площади приточных проемов.

На рисунке 4.11 представлен пример зависимости расхода воздуха от площади вытяжных отверстий при изменении площади вытяжных проемов от проемов от A_{H_1} = [1,4 х 1,2 х (1 отв.) → 1,4 х 1,2 х (18 отв.)] (м^2) и постоянной площади вытяжных проемов A_{H_2} = 1,4 х 1,2 х (1 отв.) = 1,68 (м^2), соответствующий условиям проведения натурного эксперимента и расчетной программы, учитывающей площадь приточного проема 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. Это происходит потому, что площадь открытия вытяжных проемов A_1 недостаточно велика, чтобы вызвать значительное изменение расхода воздуха.

По прошествии достаточно длительного времени тепловые параметры в здании достигают стабильного состояния. Мы измеряем температуру на приточных отверстиях $T_s = 29^oC$; температура на вытяжных отверстиях на высоте H_1 равна: $T_{e1} = 37{,}8^oC$; температура на вытяжных отверстиях на высоте H_2 равна: $T_{e2} = 36{,}9^oC$. 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 х 1,2 х (1 отв.) = 1,68 до 1,4 х 1,2 х (18 отв.) = 30,24] (м^2) и мы получаем следующий графики: по рисунку 4.11 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 ^{o}C. Таким образом, площадь приточных проемов является более важной.

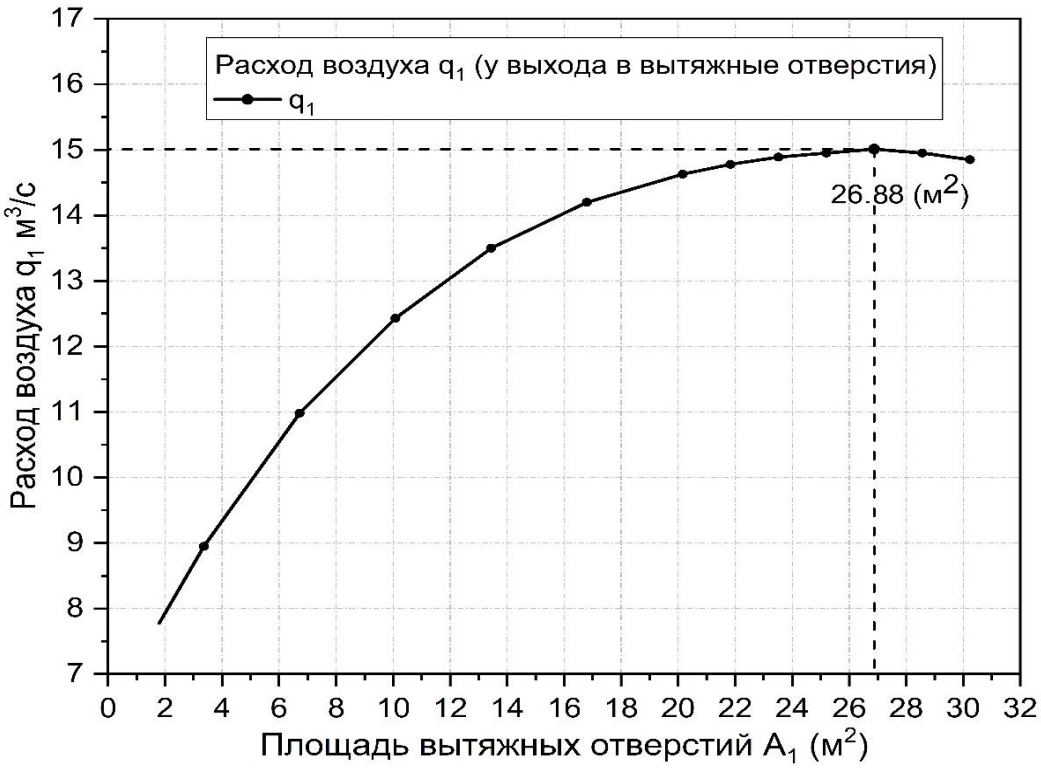


Рисунок 4.11 – Зависимость расхода воздуха от площади вытяжных отверстий при изменении площади вытяжных отверстий от A_{H_1} = [1,4 х 1,2 х (1 отв.) = 1,68 до 1,4 х 1,2 х (18 отв.) = 30,24] (м^2) и постоянной площади вытяжных отверстий A_{H_2} = 1,4 х 1,2 х (1 отв.) = 1,68 (м^2)

4.5 Выводы по главе 4

Результаты исследования позволят архитекторам и инженерам принимать обоснованное решение относительно предполагаемой тепловой среды и условий воздушного потока. Следовательно, они смогут выбрать оптимальные места расположения проемов, их размеры и количество этажей. Кроме того, эти результаты помогут им сэкономить время на оценку новых случаев прогнозирования комфорта в помещении, помогут проектировщикам оценить производительность вентиляции, выбрать оптимальную площадь проемов в здании и их соотношения в связи с высотой атриума для снижения энергопотребления механических систем вентиляции.

Разработано выражение для определения расхода воздуха в зависимости от высоты, размеров, геометрии и формы атриума.

Составлена блок-схема алгоритма расчета оптимальной площади приточных отверстий и максимального расхода воздуха.

Составлена программа для расчета расхода воздуха на языке C++.

Проверена сходимость результатов численных расчетов и натурных экспериментов, которая составляет от 2 до 6%

Расход воздуха и площади приточных и вытяжных проемов необходимо продолжить изучать в будущих исследованиях, чтобы повысить энергоэффективность таких зданий.

В рамках исследования было установлено, что влияние проемов на тепловые характеристики при повышении эффективности естественного охлаждения здания с атриумом достаточно велико.

В рамках данной работы были получены решения для воздушного потока и тепловой стратификации в атриуме здании с естественной и принудительной вентиляцией, учитывающие влияние теплового излучения между поверхностями. С помощью разработанной программы для ЭВМ можно расчитать следующие параметры: расход вентиляционного воздуха, характер температуры воздуха в помещении и нейтральный уровень давления. Существуют и другие конструктивные параметры, такие как требуемые площади вентиляционных проемов, оптимальное соотношение площадей проемов и так далее. Они могут быть получены по формулам, для каждой существующей или вновь разработанной модели, причем для рассмотренной модели площать вытяжных проемов свыше 26 $м^2$ не влияет на расход воздуха.

Использование предложенной методики расчета оптимизации вытяжных и приточных отверстий в атриумных зданиях является важным мероприятием по повышению эффективности систем вентиляции зданий. Созданная методика позволяет оптимизировать размеры вытяжных и приточных отверстий с учетом особенностей конкретного атриума и требований к вентиляции.

Применение предложенной методики приближения по методу хорд для расчета оптимизации вытяжных и приточных проемов атриумных зданий – это важный шаг в повышении эффективности систем вентиляции зданий. Разработанная методика позволяет оптимизировать размеры вытяжных и приточных отверстий с учетом особенностей конкретного атриума и требований к вентиляции.

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 отверстий 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 м² и 26,88 м²) 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 отверстий) 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 ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперимент показал, что площадь открытых приточных проемов имеет гораздо больше значение, чем площадь вытяжных проемов в остеклении атриума.

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.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ 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. 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.

5. 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.

6. 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

7. Q.Y.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, No. 1, pp. 158–164, 2021. DOI:10.18517/ijaseit.11.1.12666.

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

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

Результаты интеллектуальной деятельности: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ:

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023668219. «Программа расчета расхода и температур воздуха на разных этажах зданий с атриумами с различными геометрическими параметрами на ранних стадиях проектирования». Правообладатели (авторы): Фам Тхи Хонг Тхам, Зыонг Де Тай, Соловьев Алексей Кириллович. Заявка № 2023667232. Дата поступления: 17 августа 2023 г. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 24 августа 2023 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баушева М. Д. Эволюция атриумных пространств: от элемента древней жилищной архитектуры до ключевого элемента в композиции современных гостиниц / М. Д. Баушева // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. –2011. – Т. 3, № 18. – С. 163–22.

2. Белова Е. М. Здание биоклиматической архитектуры– «Городские ворота Дюссельдорфа» / Е. М. Белова // Журнал «АВОК. –2006. –№ 2. – С. 3–3.

3. Блази В. Справочник проектировщика. Строительная физика. – 2004.

4. Галерея Виктора Эммануила II [Электронный ресурс] / Викизнание - свободная бесплатная энциклопедия, использующая wiki-технологию – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Галерея_Виктора_Эммануила_II

5. Гладких Е. Н. Конструкции атриумов, их освещенность и воздухообмен / Е. Н. Гладких, А. Н. Селиванова, А. Е Грошев // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. –2016. –№ 9. – С. 97–103.

6. Горгоц С. Е. Расчет естественного освещения в помещениях, выходящих окнами в атриум / С. Е. Горгоц, А. К. Соловьев // Светотехника. . –2006. –№ 2. – С. 51–52.

7. ГОСТ 30494-2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях», Москва: Госстрой России, ГУП ЦПП , 2011.

8. ГОСТ Р 54964-2023 Оценка соответствия. Экологические требования к объектам недвижимости, Москва: Стандартинформ, 2016.

9. ГОСТ Р 7730-2009 Эргономика термальной среды. Аналитическое определение и интерпретация комфортности теплового режима с использованием расчета показателей PMV и PPD и критериев локального теплового комфорта, Москва: Стандартинформ, 2011.

10. ГОСТ Р ИСО 13731-2016 Эргономика термальной среды. Термины, определения и обозначения, Москва: Стандартинформ, 2016.

11. Земов Д. В. Формирование архитектурной среды атриумных пространств общественно-торговых и деловых центров средствами мобильных компонентов. Дисс. … канд. архитектуры. – Екатеринбург, УрГАХУ, 2006.

12. Земов Д. В. Эволюция и тенденции формирования современных атриумных пространств / Д. В. Земов // Архитектон: известия вузов. –2004. – Т. 3, № 8. – С. 1–5.

13. Кологривова Л. Б. Энергосберегающие решения энергоэффективных зданий / Л. Б. Кологривова, О. В. Ковтун // Промышленное и гражданское строительство. – 2004, – № 6. – С. 22–24.

14. Коноплева Е. В. Атриум как средство адаптации исторической застройки к современным условиям / Е. В Коноплева // Коммунальное хозяйство городов. –2009. –№ 90. – С. 120–124.

15. Крашенинникова Т. С. Анализ параметров микроклимата в здании с атриумом в заданных климатических условиях с использованием программы ANSYS FLUENT / Т. С Крашенинникова, А. В Гришкова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2016, – Т. 24, № 4. – С. 46–61.

16. Крашенинникова Т. С. Исследование влияния высоты атриума на микроклимат здания с помощью математического моделирования / Т. С Крашенинникова, А. В Гришкова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2018, – № 1. – С. 86–99.

17. Крестинина Н. В. Исследование влияния озеленения на параметры внутренней среды помещений / Н.В. Крестинина, В.Н. Сорокопудов, О. А. Сорокопудова // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 1. – С. 1–6.

18. Куприянов В. Н. История развития и классификация атриумов / В. Н. Куприянов, Д. В Сметанин // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. –2010. – Т. 14, № 2. – С. 32–39.

19. Магай А. А. Принципы формообразования атриумных высотных зданий / А. А. Магай, Е. Ж. Гордина // Архитектон: известия вузов. –2007. –№ 4. – С. 3–3.

20. Маклакова Т. Г. Высотные здания. Градостроительные и архитектурно-конструктивные проблемы проектирования / Т. Г Маклакова. – Москва: Издательство АСВ, 2008. –160 с.

21. Нагорная А.Н. CFD-моделирование теплового и воздушного режима кинотеатра / А.Н. Нагорная, Е.В. Денисюк // Вестник ЮУрГУ. Серия. «Строительство и архитектура». – 2013. – Т. 13, № 2. – С. 61–63.

22. Реттер Э. И. Архитектурно-строительная аэродинамика / Э. И. Реттер. – Москва: Стройиздат, 1984. – 294 с.

23. Саксон Р. Атриумные здания / пер. с англ. А.Г. Раппапорта; под ред. В.Л.Хайта. – Москва: Стройиздат, 1987. – 138с.

24. СП 2.4.3648-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к организациям воспитания и обучения, отдыха и оздоровления детей и молодежи».

25. СП 131.13330.2020 «Строительная климатология», Моска: НИИ строительной физики РААСН, 2006.

26. СП 50.13330.2024 «Тепловая защита зданий». Госстрой России. М. 2024

27. СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение», Москва: Стандартинформ, 2016.

28. Соловьев А. К. Пассивные дома и энергетическая эффективность их отдельных элементов / А. К. Соловьев // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – № 4. – С. 46–53

29. СП 118.13330.2022 «Общественные здания и сооружения».

30. СП 118.13330.2022 «Общественные здания и сооружения». Госстрой России. М. 2012.

31. СП 160.1325800.2014 «Здания и комплексы многофункциональные. Правила проектирования».

32. СП 23-101-2004. «Проектирование тепловой защиты зданий». Госстрой России. М. 2004.

33. СП 7.13130.2013 «Отопление, вентиляция и кондиционирование. Требования пожарной безопасности».

34. Табунщиков Ю.А. Энергоэффективное высотное здание / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач, Н.В. Шилкин. – Москва: АВОК-ПРЕСС, 2003. – 200 с.

35. Цацура Е. И. Атриумные пространства как направление энергосбережения в зданиях / Е. И. Цацура, Л. А. Голованова // In Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ. – 2015. – № 3. – С. 323–330.

36. Цыбуля Н. В. Методическое обеспечение курса «Экологические основы фитодизайна» / Н. В. Цыбуля, Т. Д. Фершалова, Л. К. Трубина // Сибирский педагогический журнал. – 2013. – № 4. – С. 173–179.

37. Цыбуля Н. В. Фитодизайн как метод улучшения среды обитания человека в закрытых помещениях / Н. В. Цыбуля, Н. В. Казаринова // Растительные ресурсы. – 1998. – Т. 34, № 3. – С. 112–129.

38. Цыбуля Н. В. Фитонцидные растения в интерьере. / Н. В. Цыбуля, Т. Д. Фершалова // Оздоравливание воздуха с помощью растений. Новосибирск. – 2000. – С. 112.

39. Черкасов А. В. Биологические особенности растений, улучшающих среду обитания и здоровье человека. Дисс. … канд. биологических наук. – М., ВИЛАР, 2009.

40. Швалева О. В. Атриум в многоэтажном жилом доме / О. В. Швалева // Архитектон: известия вузов. – 2011. – № 34. –С. 34–39.

41. Швалева О. В. Атриумные пространства в структуре жилых зданий / О. В Швалева // [Электронный ресурс] Международная конференция молодых ученых и студентов «Актуальные проблемы архитектуры и дизайна. – 2010.

42. Швалева О. В. Атриумные пространства в структуре жилых зданий / О. В. Швалева // Международная конференция молодых ученых «Актуальные проблемы архитектуры и дизайна». – 2010. – № 30. – С. 1-7.

43. Шуази О. Всеобщая история архитектуры. От доисторической эпохи до Ренессанса / пер. с фр. яз. Н. С. Курдюкова. – Москва: Издательство АСТ, 2022. – 1136 с.

44. Abdullah A. H. A study on thermal environmental performance in atria in the tropics with special reference to Malaysia. PhD Thesis. Heriot-Watt University, 2007.

45. Abdullah A. H. Field study on indoor thermal environment in an atrium in tropical climates / A. H. Abdullah, Q. Meng, L. Zhao, F. Wang // Building and environment. – 2009. – Vol. 44. – № 2. – P. 431–436. DOI: 10.1016/j.buildenv.2008.02.011

46. Abdullah A. H. Field study on indoor thermal environment in an atrium in tropical climates / A. H. Abdullah, Q. Meng, L. Zhao, F. Wang // Building and environment. – 2009. – Vol. 44, № 2. –P. 431–436. DOI: 10.1016/j.buildenv.2008.02.011

47. Abdullah A. H. Field study on indoor thermal environment in an atrium in tropical climates / A. H. Abdullah, Q. Meng, L. Zhao, F. Wang // Building and environment. – 2009. – Vol. 44. № 2. – P. 431–436. DOI: 10.1016/j.buildenv.2008.02.011

48. Abdullah A. H. Modelling thermal stratification in atrium using TAS program and verification of prediction results / A. H. Abdullah, F. Wang // International Journal of Integrated Engineering. – 2011. – Vol. 1, № 2. – P. 79–93. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.12.019

49. Aldawoud A. The influence of the atrium geometry on the building energy performance / A. Aldawoud // Energy and Buildings. – 2013. – Vol. 57. – P. 1–5.

50. Aram R. Thermal comfort and energy performance of atrium in Mediterranean climate / R. Aram, H. Z. Alibaba // Sustainability. – 2019. –Vol. 11, № 4. – P. 1213. DOI: 10.3390/su11041213

51. Atmosphere of Earth [Электронный ресурс] - Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere_of_Earth

52. Baharvand M. Thermal performance of tropical atrium / M. Baharvand, M. H. B. Ahmad, T. Safikhan, S. M. M. Mirmomtaz // Environmental and Climate Technologies. – 2013. – Vol. 12, № 1. – P. 34–40. DOI: 10.2478/rtuect-2013-0014

53. Bajracharya S. Challenges and Opportunities in Atrium Buildings: A Review / S. Bajracharya // Journal of Institute of Engineering. – 2013. –Vol. 9, № 1. –P. 65–68.

54. Bajracharya S. Challenges and Opportunities in Atrium Buildings: A Review / S. Bajracharya // Journal of the Institute of Engineering. – 2013. –Vol. 9, № 1. – P. 65–68. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.01.013

55. Bednar M.J. The New Atrium / M.J Bednar. – New York: Mc Graw-Hill, 1986. – P. 5–7.

56. Blazek J. Computational fluid dynamics: principles and applications / J. Blazek // – Germany: Butterworth-Heinemann, 2005. – 496 p.

57. Bruce J. M. Natural convection through openings and its application to cattle building ventilation / J. M. Bruce // Journal of Agricultural Engineering Research. – 1978. –Vol. 23, № 2. – P. 151–167. DOI: /10.1016/0021-8634(78)90046-X

58. D'Agostino D. Improving Energy Efficiency in Buildings: Challenges and Opportunities in the European Context / D. D'Agostino // Sustainability through Energy-Efficient Buildings. – 2018. – P. 181–208.

59. Etheridge D. Building ventilation: theory and measurement / D. Etheridge, M. Sandberg. – England: John Wiley & Sons Ltd., 1996. – 754 p

60. Favarolo P. A. Temperature-driven single-sided ventilation through a large rectangular opening / P. A. Favarolo, H. Manz // Building and Environment. – 2005. – Vol. 40, № 5. – P. 689–699. DOI: 10.1016/j.buildenv.2004.08.003

61. Galal K. S. The impact of atriums on thermal and daylighting performance / K. S. Galal // Architecture and Planning Journal (APJ). – 2018. – Vol. 24, № 1. – P. 1–14.

62. Gan G. Interaction between wind and buoyancy effects in natural ventilation of buildings / G. Gan // The Open Construction & Building Technology Journal. – 2010. –Vol. 4, № 1. – P. 34–45.

63. Harriman L. G., Lstiburek J. The ASHRAE Guide for Buildings in Hot and Humid Climates, American Society of Heating. Refrigeration and Air-conditioning Engineers (ASHRAE), Atlanta, GA, 2008.

64. Holford J. M. Fundamental atrium design for natural ventilation / J. M. Holford, G. R. Hunt // Building and environment. – 2003. –Vol. 38, № 3. – P. 409–426. DOI: 10.1016/S0360-1323(02)00019-7

65. Humphreys M. Field studies of thermal comfort compared and applied / M. Humphreys // Building services engineer. – 1976. –Vol. 44. – P. 5–27.

66. Hung W. Y. A review on architectural aspects of atrium buildings / W. Y. Hung, W. K. Chow // Architectural Science Review. – 2001. –Vol. 44, № 3. – P. 285–295. DOI: 10.1080/00038628.2001.9697484

67. Hung W. Y. A review on architectural aspects of atrium buildings / W. Y. Hung, W. K. Chow // Architectural Science Review. - 2001. -Vol. 44. № 3. –P. 285-295. DOI: 10.1080/00038628.2001.9697484

68. Hunt G. R. Displacement and mixing ventilation driven by opposing wind and buoyancy / G. R Hunt, P. F. Linden // Journal of Fluid Mechanics. – 2005. –Vol. 527. – P. 27–55. DOI: 10.1017/S0022112004002575

69. Hussain S. Numerical investigations of buoyancy-driven natural ventilation in a simple atrium building and its effect on the thermal comfort conditions / S. Hussain, P. H. Oosthuizen // Applied Thermal Engineering. – 2012. –Vol. 40. – P. 358–372. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.02.025

70. Hussain S. Numerical investigations of buoyancy-driven natural ventilation in a simple atrium building and its effect on the thermal comfort conditions / S. Hussain, P. H. Oosthuizen // Applied Thermal Engineering. – 2012. –Vol. 40. – P. 358–372. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.02.025

71. Hussain S. Numerical investigations of buoyancy-driven natural ventilation in a simple atrium building and its effect on the thermal comfort conditions / S. Hussain, P. H. Oosthuizen // Applied Thermal Engineering. – 2012. – Vol. 40. – P. 358–372. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.02.025

72. Hussain S. Numerical investigations of buoyancy-driven natural ventilation in a simple three-storey atrium building and thermal comfort evaluation / S. Hussain, P. H. Oosthuizen // Applied Thermal Engineering. – 2013. –Vol. 57. – P. 133–146. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.03.033

73. Izard J. L. Thermal comfort in atria: thermal stratification and architectural design / J. L. Izard, F. Frusta // Environmentally Friendly Cities: Proceedings of Plea 1998, Passive and Low Energy Architecture, June 1998, Lisbon, Portugal. – P. 353.

74. Jaberansari M. The effect of atrium configurations on energy usage in high-rise office buildings in semi-arid climate of Tehran. PhD Thesis. University of Salford (United Kingdom), 2018.

75. Ji Y. CFD modelling of natural displacement ventilation in an enclosure connected to an atrium / Y. Ji, M. J. Cook, V. Hanby // Building and Environment. – 2007. –Vol. 42, № 3. – P. 1158–1172. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.11.002

76. Karava P. Experimental study of the thermal performance of a large institutional building with mixed-mode cooling and hybrid ventilation / P. Karava, A. K. Athienitis, T. Stathopoulos, E. Mouriki // Building and Environment. – 2012. –Vol. 57. – P. 313–326. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.06.003

77. Khan N. A review on wind driven ventilation techniques / N. Khan, Y. Su, S. B. Riffat // Energy and buildings. – 2008. –Vol. 40, № 8. – P. 1586–1604. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.02.015

78. Lau J. Measurement and CFD simulation of the temperature stratification in an atrium using a floor level air supply method / J. Lau, J. L. Niu // Indoor and Built Environment. – 2003. – Vol. 12, № 4. – P. 265–280. DOI: 10.1177/1420326X0303591

79. Li C. The temperature stratification measurement and simulation in atrium of Wuhan Station / C. Li, Z. Zhang, J. Zhang, Q. Ji // Proceedings of the 2011 IEEE international conference on multimedia technology (ICMT). Hangzhou, China. – 2011. – P. 4240–4243.

80. Li R. Thermal comfort and environmental modelling in atrium buildings / R. Li, A. Pitts // Proceedings PLEA2006—the 23rd conference on passive and low energy architecture. Geneva, Switzerland. - 2006. –P. 6-8.

81. Lin Y. Buoyancy-driven ventilation between two chambers / Y. Lin, P. Linden // Journal of Fluid Mechanics. – 2002. –Vol. 463, № 1. – P. 293–312. DOI: 10.1017/S0022112002008832

82. Liu P. C. Evaluation of buoyancy-driven ventilation in atrium buildings using computational fluid dynamics and reduced-scale air model / P. C. Liu, H. T. Lin, J. H. Chou // Building and Environment. – 2009. –Vol. 44, № 9. – P. 1970–1979. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.01.013

83. Liu P. C. Evaluation of buoyancy-driven ventilation in atrium buildings using computational fluid dynamics and reduced-scale air model / P. C. Liu, H. T. Lin, J. H. Chou // Building and Environment. – 2009. –Vol. 44, № 9. – P. 1970–1979. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.01.013

84. Liu P. C. Evaluation of buoyancy-driven ventilation in atrium buildings using computational fluid dynamics and reduced-scale air model / P. C. Liu, H. T. Lin, J. H. Chou // Building and Environment. – 2009. –Vol. 44, № 9. –P. 1970–1979. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.01.013

85. Luo Q. Modeling of opening characteristics of an atrium in natural ventilation. PhD Thesis. Massachusetts Institute of Technology, 2018.

86. Moghaddam E. H. New approach to natural ventilation in public buildings inspired by Iranian's traditional windcatcher / E. H Moghaddam, S. Amindeldar, A. Besharatizadeh // Procedia Engineering. – 2011. – Vol. 21. – P. 42–52. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.1985

87. Mohammad S. Performance evaluation of modern building thermal envelope designs in the semi-arid continental climate of Tehran / S. Mohammad, A. Shea // Buildings. – 2013. –Vol. 3, № 4. – P. 674–688. DOI: 10.3390/buildings3040674

88. Moosavi L. Investigation of thermal performance for atria: A method overview / L. Moosavi, N. Ghafar, N. Mahyuddin // MATEC Web of Conferences: EDP Sciences.- 2016. -Vol. 66. – P. 00029.

89. Moosavi L. Thermal performance of atria: An overview of natural ventilation effective designs / L. Moosavi, N. Mahyuddin, N. Ab Ghafar, M. A. Ismail // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. –Vol. 34. – P. 654–670. DOI: 10.1016/j.rser.2014.02.035

90. Najafabadi F. A. Effect of Atrium on Thermal Comfort. Master's thesis, Eastern Mediterranean University (EMU)-Doğu Akdeniz Üniversitesi (DAÜ)), 2013.

91. Olsen E. L. Energy consumption and comfort analysis for different low-energy cooling systems in a mild climate / E. L. Olsen, Q. Y. Chen // Energy and buildings. – 2003. –Vol. 35, № 6. – P. 560–571. DOI: 10.1016/S0378-7788(02)00164-0

92. Palma Rojas D. Atrium building design: key aspects to improve their thermal performance on the Mediterranean climate of Santiago de Chile / D. Palma Rojas // International Journal of Low-Carbon Technologies International Journal of Low-Carbon Technologies. – 2014. –Vol. 9, № 4. –P. 327–330. DOI: 10.1093/ijlct/ctt009

93. Pan Y. Study on simulation methods of atrium building cooling load in hot and humid regions / Y. Pan, Y. Li, Z. Huang, G. Wu // Energy and Buildings. – 2010. –Vol. 42, № 10. – P. 1654–1660. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.04.008

94. Pfafferott J. Design, monitoring and evaluation of a low energy office building with passive cooling by night ventilation / J. Pfafferott, S. Herkel, M Wambsganß // Energy and buildings. – 2004. – Vol. 36, № 5. – P. 455–465. DOI: 10.1016/j.enbuild.2004.01.041

95. Ray S. D. Experimental characterization of full-scale naturally ventilated atrium and validation of CFD simulations / S. D Ray, N. W. Gong, L. R Glicksman, J. A Paradiso // Energy and Buildings. – 2014. – Vol. 69. – P. 285–291. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.11.018

96. Rundle C. A. Validation of computational fluid dynamics simulations for atria geometries / C. A Rundle, M. F. Lightstone, P. Oosthuizen, P. Karava, E. Mouriki // Building and Environment. – 2011. – Vol. 46, № 7. – P. 1343–1353. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.12.019

97. Samant S. R. A parametric investigation of the influence of atrium facades on the daylight performance of atrium buildings. PhD Thesis. University of Nottingham, 2011.

98. Shi L. Interaction effect of room opening and air inlet on solar chimney performance / L. Shi, X. Cheng, L. Zhang, Z. Li, G. Zhang, D. Huang, J. Tu // Applied Thermal Engineering. – 2019. – Vol. 159. – P. 113877. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.113877

99. Stefanutti L. Климатизация атриумов / L. Stefanutti // ABOK – Некоммерческое партнерство инженеров. – 2001. – № 4. – С. 27–30.

100. Stephen D. R Modeling buoyancy-driven airflow in ventilation shafts. PhD thesis. Massachusetts Institute of Technology, 2012.

101. Szokolay S. Introduction to Architectural Science-The Basis of Sustainable Design (3rd ed.) / S. Szokolay. – London, United Kingdom: Taylor & Francis Ltd, 2014. – 352 p. DOI: 10.4324/9780080473130

102. Tabesh T. Focus on Atrium Spaces Aspects on the Energy Performance / T. Tabesh, B. Sertyesilisik // International Conference on Chemical, Civil and Environmental Engineering (CCEE-2015), June 2015. – P. 5–14.

103. Taleghani M. Energy performance and thermal comfort of courtyard/atrium dwellings in the Netherlands in the light of climate change / M. Taleghani, M. Tenpierik, A. van den Dobbelsteen // Renewable Energy. – 2014. – Vol. 63. – P. 486–497. DOI: 10.1016/j.renene.2013.09.028

104. Taleghani M. The effect of different transitional spaces on thermal comfort and energy consumption of residential buildings / M. Taleghani, M. Tenpierik, A. Dobbelsteen // In 7th Windsor Conference: The changing context of comfort in an unpredictable world Cumberland Lodge. Network for Comfort and Energy Use in Buildings, 2012.

105. Wang F. Investigating thermal conditions in a tropic atrium employing CFD and DTM techniques / F. Wang, A. H. Abdullah // International Journal of Low-Carbon Technologies. – 2011. – Vol. 6, № 3. – P. 171–186. DOI: 10.1093/ijlct/ctr005

106. Wang L. Role of atrium geometry in building energy consumption: The case of a fully air-conditioned enclosed atrium in cold climates, China / L. Wang, Q. Huang, Q. Zhang, H. Xu, R. K. Yuen // Energy and Buildings. – 2017. – Vol. 151. – P. 228–241.

107. Wang X. Mathematical modeling and experimental study on vertical temperature distribution of hybrid ventilation in an atrium building / X. Wang, C. Huang, W. Cao // Energy and buildings. – 2009. – Vol. 41, № 9. – P. 907–914. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.03.002

108. White F. M. Fluid mechanics / F. M. White. – New York: McGraw-Hill Education, 2016. 864 p.

109. Woods A. W. A comparison of winter pre-heating requirements for natural displacement and natural mixing ventilation / A. W. Woods, S. Fitzgerald, S. Livermore // Energy and Buildings. – 2009. – Vol. 41, № 12. – P. 1306–1312. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.07.030

110. Xu C. Study on winter thermal environmental characteristics of the atrium space of teaching building in China's cold region / C. Xu, Y. Wang, J. Hui, L. Wang, W. Yao, L. Sun // Journal of Building Engineering. – 2023. – Vol. 67. – P. 105978. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.105978

111. Yakhot V. Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory / V. Yakhot, S. A. Orszag // Journal of scientific computing. – 1986. –Vol. 1, № 1. – P. 3–51.

112. Yang T. O. N. G. Natural ventilation in built environment / T. O. N. G. Yang, D. J. Clements-Croome // Sustainable Built Environments. – 2020. – P. 431–464. DOI: 10.1007/978-1-4939-2493-6 488-3

113. Zhang A. Sustainable Atrium Landscape Design. PhD Thesis. University of Sheffield, School of Architecture, 2018.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

УТВЕРЖДАЮ
Проректор НИУ МГСУ
Т.Б. Кайтуков
«11» 12 2023 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ
результатов диссертационной работы
Фам Тхи Хонг Тхам
«Повышение энергетической эффективности архитектурно-строительных решений атриумов зданий с учетом комфорта их температурно-воздушного режима»
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Место внедрения:

г. Москва, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» («НИУ МГСУ»)

Предмет внедрения:

Методика расчета конструкций атриума для получения максимального расхода воздуха и определения оптимальной площади вытяжных и приточных отверстий в атриуме и их энергетической оценки.

Результат внедрения:

Автором разработаны основные теоретические и практические принципы проектирования и строительства зданий с атриумами, пригодными для жарких погодных условий. Разработанные методы аналитического расчета температуры и расхода воздуха на разных уровнях атриума, а также нужного соотношения приточных и вытяжных проемов внедрены в учебный процесс в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» («НИУ МГСУ») на кафедре «Архитектурно-строительного проектирования и физики среды» («АСПиФС») при изучении дисциплины «Проектирование зданий и сооружений» направления подготовки 08.04.01 Строительство, профиль

«Промышленное и гражданское строительство», при разработке рабочей программы соответствующей дисциплины и дипломном проектировании обучающихся соответствующего профиля.

Внедрено:
д.т.н. профессор кафедры «АСПиФС» А.К. Соловьев

Согласовано:
директор ИАГ
доктор искусствоведения,
академик РААСН А.Ю. Казарян

Заведующий кафедрой «АСПиФС»,
к.т.н., доцент. Т.Н. Щелокова

МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
(МИНСТРОЙ РОССИИ)

федеральное государственное бюджетное учреждение
«Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук»
(НИИСФ РААСН)

Исх. от 12.12.2023 № 1496/22

Ректору МГСУ,
академику РААСН, д.т.н.
П.А.Акимову

129337, г. Москва,
Ярославское шоссе, д. 26

Акт внедрения

При разработке Изменения №2 к СП 370.1325800.2017 «Устройства солнцезащитные зданий. Правила проектирования» в методике определения требуемых параметров солнцезащитных свойств стеклопакетов в зависимости от региона в таблице «Значения коэффициента поправки на румб светопроема» были использованы экспериментальные данные, полученные в ходе проведения исследований по теме диссертации Фам Тхи Хонг Тхам «Повышение энергетической эффективности архитектурно-строительных решений атриумов зданий с учетом комфорта их температурно-воздушного режима».

Директор института И.Л.Шубин

Исполнитель:
Умнякова Н.П.
8(495)482-39-67
n.umniakova@mail.ru

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023668219

Программа расчета расхода и температур воздуха на разных этажах зданий с атриумами с различными геометрическими параметрами на ранних стадиях проектирования

Правообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет" (НИУ МГСУ) (RU)***

Авторы: ***Фам Тхи Хонг Тхам (RU), Зыонг Де Тай (RU), Соловьев Алексей Кириллович (RU)***

Заявка № **2023667232**

Дата поступления **17 августа 2023 г.**

Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ ***24 августа 2023 г.***

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ В. КОДЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ПРИКЛАДНОЙ ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА РАСХОДА И ТЕМПЕРАТУРА ВОЗДУХА С++

Program C++:

File 1:

```
TEMPLATE = app
CONFIG += console c++11
CONFIG -= app_bundle
CONFIG -= qt

SOURCES += \
    main.cpp
```

File 2:

```
#include <iostream>
#include <math.h>
#include <fstream>
#include <string>

using namespace std;

double alfa_r = 15;    //[W/m2]
double alfa_c = 15;    //[W/m2]
double Cds = 0.75;
double Cd1 = 0.75;
double Cd2 = 0.75;

double Cp = 1000;
double g = 9.81;      //[m/s2]
double rho = 1.2;     //[kg/m3]
double eps = 1.0e-6;

//Data from experiment
double L = 18.54;     //[m]
double A = L*L;       //[m2]
double H = 5.0;       //[m]
double H0 = 19.6;     //[m]
double angle = 28*3.14/180;
double As = 1.8*0.9*1;      //[m2]
double A1 = 1.2*1.4*5;      //[m2]
double A2 = 1.2*1.4*3;      //[m2]
double H1 = 22.88;       //[m]
double H2 = 20.84;       //[m]
double Hs = 0.9;
//double Hb = 0.0;

double Ts  = 29.0 + 273;       //[C]
double Te1 = 37.8 + 273;      //[C] -- 37.8
double Te2 = 37.2 + 273;      //[C] -- 36.6

double E = 118108;    //E = 118108 -->
//As*1: None;
//As*2:                    rms_q = 2.89353e-05; res_Hb = 0.417; res_Tb = 30.7;
res_qs = 3.07966; res_q1 = 2.99364; res_q2 = 0.0859899; E1 = 6291.44; E2 = 171.244;
E = 118108; rms_E = 111645
//As*3: res_gamma = 0.381; rms_q = 1.6119e-06; res_Hb = 1.543; res_Tb = 31.77;
res_qs = 9.75503; res_q1 = 7.85456; res_q2 = 1.90047; E1 = 96538.5; E2 = 21585.7; E
= 118108; rms_E = 16.132
//As*4: res_gamma = 0.369; rms_q = 9.3151e-05; res_Hb = 3.156; res_Tb = 31.37;
```

```
res_qs = 11.208; res_q1 = 8.29118; res_q2 = 2.91694; E1 = 89348.3; E2 = 28799; E =
118108; rms_E = 39.2836
      //As*5: res_gamma = 0.339; rms_q = 3.39148e-05; res_Hb = 3.255; res_Tb = 31.12;
res_qs = 12.5264; res_q1 = 8.84368; res_q2 = 3.68264; E1 = 85726.8; E2 = 32641.8; E
= 118108; rms_E = 260.636
      //As*5: res_gamma = 0.269; rms_q = 5.84494e-06; res_Hb = 0.517; res_Tb = 30.91;
res_qs = 14.0932; res_q1 = 9.60141; res_q2 = 4.49184; E1 = 82584.6; E2 = 35677.7; E
= 118108; rms_E = 154.327
      //As*6:

      double eval_Qout(double dP, double Cd, double A)
      {
          double vel = sqrt(-2*dP/rho);
          return Cd*A*vel;
      }

      double eval_Qin(double dP, double Cd, double A)
      {
          double vel = sqrt(-2*dP/rho);
          return Cd*A*vel;
      }

      double eval_dP(double deltaPs, double h, double gamma, double Tb, double Hb)
      {
          double var1 = (Tb-Ts+gamma*(Hs-Hb))*h + 0.5*gamma*h*h;
          double beta = 1.0 / Ts;
          double var2 = rho*g*beta*var1;
          double res = var2 + deltaPs;
          return res;
      }

      double f1(double q1, double q2, double q)
      {
          return (q1+q2-q);
      }

      double f2(double q1, double q2, double Tb, double gamma, double E, double Hb)
      {
          double E1 = rho*Cp*q1*(Tb+gamma*(H1+Hs-Hb) - Ts);
          double E2 = rho*Cp*q2*(Tb+gamma*(H2+Hs-Hb) - Ts);
          //cout << "E = " << E << "; E1 = " << E1 << "; E2 = " << E2 << endl;
          return (E1+E2-E);
      }


      int main()
      {
          if(E < 0) {
              cout << "As = " << As << "; A1 = " << A1 << "; A2 = " << A2 << endl;
              //First stage
              ofstream fo_s1("data_stage1.dat");
              fo_s1 << "index rms_q Qs Q1 Q2 Tb Hb gamma Tf\n";
              int index = 0;
              double Tb, Hb, gamma;
              //Find gamma from Te1, Te2, which get from experiment
              gamma = (Te1 - Te2)/(H1 - H2);
              //Condition: Tb > Ts
              double Hb_min = H1+Hs-(Te1-Ts)/gamma;
              cout << "Hb_min = " << Hb_min << endl;
              //Loop for find Hb;
              double res_Hb, res_Tb, res_Tf, res_qs, res_q1, res_q2, res_gamma;
              double rms_q = 1e9;
              double rms_E = 1e9;
              for(Hb = 0; Hb <= H; Hb=Hb+0.001) {
```

```
                    Tb = Te1 - gamma*(H1+Hs-Hb);
                    double  qs_temp  =  2*alfa_r*L*H*gamma*(H0-Hb+H/3.0)/(rho*Cp*(Tb-
Ts)*(sin(angle)+2*alfa_r*L*H/(alfa_c*A)));
                    double dPs_temp = -qs_temp*qs_temp*rho/(2*Cds*Cds*As*As);
                    double C1 = (Tb-Ts+gamma*(Hs-Hb))*H1+0.5*gamma*H1*H1;
                    double dP1_temp = dPs_temp+rho*g*1.0/Ts*C1;
                    if(dP1_temp < 0) continue;
                    double q1_temp = Cd1*A1*sqrt(2*dP1_temp/rho);
                    if(q1_temp > qs_temp) continue;
                    double C2 = (Tb-Ts+gamma*(Hs-Hb))*H2+0.5*gamma*H2*H2;
                    double dP2_temp = dPs_temp+rho*g*1.0/Ts*C2;
                    if(dP2_temp < 0) continue;
                    double q2_temp = Cd2*A2*sqrt(2*dP2_temp/rho);
                    if(q2_temp > qs_temp) continue;
                    //cout << "Hb = "<< Hb << "; Tb = "<< Tb<< "; dP1 = " <<
dPs_temp+rho*g*1.0/Ts*C1 << "; dP2 = " << dPs_temp+rho*g*1.0/Ts*C2 << endl;
                    //cout << "Hb = "<< Hb << "; Tb = "<< Tb<< "; qs_temp = " <<
qs_temp << "; q1_temp = " << q1_temp << "; q2_temp = " << q2_temp << endl;
                    double rms_q_temp = abs(qs_temp - q1_temp - q2_temp);
                    double Tf_temp = Tb + rho*Cp*qs_temp*(Tb - Ts)/(alfa_c*A);
                    if((rms_q_temp  <  rms_q)  &&  (q1_temp  <  qs_temp)  &&  (q2_temp  <
qs_temp))
                    {
                        rms_q = rms_q_temp;
                        res_Hb = Hb;
                        res_Tb = Tb;
                        res_Tf = Tf_temp;
                        res_qs = qs_temp;
                        res_q1 = q1_temp;
                        res_q2 = q2_temp;
                        res_gamma = gamma;
                    }

                    if(dP1_temp >= 0 && dP2_temp >= 0 & rms_q < 1.0) {
                        //fo_s1 << "index rms_q Qs Q1 Q2 Tb Hb gamma Tf\n";
                        fo_s1 << index << " " << rms_q_temp << " " << qs_temp << " "
<< q1_temp << " " << q2_temp << " " << Tb-273 << " " << Hb << " " << res_gamma << "
" << Tf_temp-273 << endl;
                        index++;
                    }
                }

                cout << "As = " << As << "; A1 = " << A1 << "; A2 = " << A2 << endl;
                cout << "res_gamma = " << res_gamma << "; Ts = " << Ts - 273 << endl;
                cout << "rms_q = " << rms_q << "; res_Hb = " << res_Hb << "; res_Tb =
" << res_Tb - 273 << "; res_Tf = " << res_Tf - 273 << endl;
                cout << "res_qs = " << res_qs << "; res_q1 = " << res_q1 << "; res_q2
= " << res_q2<< endl;
                double E1 = rho*Cp*res_q1*(res_Tb+res_gamma*(H1+Hs-res_Hb)-Ts);
                double E2 = rho*Cp*res_q2*(res_Tb+res_gamma*(H2+Hs-res_Hb)-Ts);
                double E = E1 + E2;
                cout << "E1 = " << E1 << "; E2 = " << E2 << "; E = " << E << endl;
                fo_s1.close();

                //Stage 2
                ofstream fo_s2("data_stage2.dat");
                fo_s2 << "index rms_E E E1 E2 Qs Q1 Q2 Tb Hb gamma Tf\n";
                index = 0;
                cout << "Stage 2" << endl;
                rms_q = 1e9;
                rms_E = 1e9;
                for(Hb = 0; Hb <= H; Hb=Hb+0.001) {
                    for(Tb = Ts+0.1; Tb < Ts+10; Tb=Tb+0.01) {
                        for(gamma = 0.01; gamma < 1; gamma=gamma+1e-3){
```

```
                            double      qs_temp      =      2*alfa_r*L*H*gamma*(H0-
Hb+H/3.0)/(rho*Cp*(Tb-Ts)*(sin(angle)+2*alfa_r*L*H/(alfa_c*A)));
                            double dPs_temp = -qs_temp*qs_temp*rho/(2*Cds*Cds*As*As);
                            double C1 = (Tb-Ts+gamma*(Hs-Hb))*H1+0.5*gamma*H1*H1;
                            double dP1_temp = dPs_temp+rho*g*1.0/Ts*C1;
                            if(dP1_temp < 0) continue;
                            double q1_temp = Cd1*A1*sqrt(2*dP1_temp/rho);
                            if(q1_temp > qs_temp) continue;
                            double C2 = (Tb-Ts+gamma*(Hs-Hb))*H2+0.5*gamma*H2*H2;
                            double dP2_temp = dPs_temp+rho*g*1.0/Ts*C2;
                            if(dP2_temp < 0) continue;
                            double q2_temp = Cd2*A2*sqrt(2*dP2_temp/rho);
                            if(q2_temp > qs_temp) continue;
                            E1 = rho*Cp*q1_temp*(Tb+gamma*(H1+Hs-Hb)-Ts);
                            if(E1 > E) continue;
                            E2 = rho*Cp*q2_temp*(Tb+gamma*(H2+Hs-Hb)-Ts);
                            if(E2 > E) continue;
                            double rms_E_temp = abs(E - E1 - E2);
                            double rms_q_temp = abs(qs_temp - q1_temp - q2_temp);
                            double Tf_temp = Tb + rho*Cp*qs_temp*(Tb - Ts)/(alfa_c*A);
                            if((rms_q_temp < 1e-4)  && (rms_E_temp < rms_E))
                            {
                                rms_q = rms_q_temp;
                                rms_E = rms_E_temp;
                                res_Hb = Hb;
                                res_Tb = Tb;
                                res_Tf = Tf_temp;
                                res_qs = qs_temp;
                                res_q1 = q1_temp;
                                res_q2 = q2_temp;
                                res_gamma = gamma;
                                cout << "res_gamma = " << res_gamma << "; rms_q = "
<< rms_q << "; res_Hb = " << res_Hb << "; res_Tb = " << res_Tb - 273<< endl;
                                cout << "res_qs = " << res_qs << "; res_q1 = " <<
res_q1 << "; res_q2 = " << res_q2<< endl;
                                cout << "E1 = " << E1 << "; E2 = " << E2 << "; E = "
<< E << "; rms_E = " << rms_E << endl;
                                fo_s2 << index << " " << rms_E << " " << E << " " <<
E1 << " " << E2 << " " << qs_temp << " " << q1_temp << " " << q2_temp << " " << Tb-
273 << " " << Hb << " " << gamma << " " << Tf_temp-273 << endl;
                                index++;
                            }
                        }

                    }
                }

                fo_s2.close();

                cout << "As = " << As << "; A1 = " << A1 << "; A2 = " << A2 << endl;
                cout << "res_gamma = " << res_gamma << "; Ts = " << Ts - 273 << ";
res_Tf = " << res_Tf - 273 << endl;
                cout << "rms_q = " << rms_q << "; res_Hb = " << res_Hb << "; res_Tb =
" << res_Tb - 273<< endl;
                cout << "res_qs = " << res_qs << "; res_q1 = " << res_q1 << "; res_q2
= " << res_q2<< endl;
                E1 = rho*Cp*res_q1*(res_Tb+res_gamma*(H1+Hs-res_Hb)-Ts);
                E2 = rho*Cp*res_q2*(res_Tb+res_gamma*(H2+Hs-res_Hb)-Ts);
                cout << "E1 = " << E1 << "; E2 = " << E2 << "; E = " << E << "; rms_E
= " << rms_E << endl;
            }
            else {
                //Stage 2
                ofstream fout("data1.dat");
```

```
                fout << "index As A1 A2 gamma Ts Tf Tb Hb qs q1 q2 E1 E2 E rms_q rms_E
" << endl;
                for(int i = 25; i < 50; i++) {
                    As = 1.8*0.9*(i+3);
                    string filename = "data_stage2_" + std::to_string(i)+".dat";
                    ofstream fo_s2(filename);
                    fo_s2 << "index rms_E E E1 E2 Qs Q1 Q2 Tb Hb gamma Tf\n";
                    int index = 0;
                    double Tb, Hb, gamma;
                    cout << "Stage 2. Loop = " << i << endl;
                    double res_Hb, res_Tb, res_Tf, res_qs, res_q1, res_q2, res_gamma;
                    double E1, E2;
                    double rms_q = 1e9;
                    double rms_E = 1e9;
                    for(Hb = 0; Hb <= H; Hb=Hb+1.e-2) {
                        for(Tb = Ts+0.1; Tb < Ts+10; Tb=Tb+1.e-2) {
                            for(gamma = 0.01; gamma < 1; gamma=gamma+1.e-4){
                                double      qs_temp      =      2*alfa_r*L*H*gamma*(H0-
Hb+H/3.0)/(rho*Cp*(Tb-Ts)*(sin(angle)+2*alfa_r*L*H/(alfa_c*A)));
                                double            dPs_temp            =            -
qs_temp*qs_temp*rho/(2*Cds*Cds*As*As);
                                double C1 = (Tb-Ts+gamma*(Hs-Hb))*H1+0.5*gamma*H1*H1;
                                double dP1_temp = dPs_temp+rho*g*1.0/Ts*C1;
                                if(dP1_temp < 0) continue;
                                double q1_temp = Cd1*A1*sqrt(2*dP1_temp/rho);
                                if(q1_temp > qs_temp) continue;
                                double C2 = (Tb-Ts+gamma*(Hs-Hb))*H2+0.5*gamma*H2*H2;
                                double dP2_temp = dPs_temp+rho*g*1.0/Ts*C2;
                                if(dP2_temp < 0) continue;
                                double q2_temp = Cd2*A2*sqrt(2*dP2_temp/rho);
                                if(q2_temp > qs_temp) continue;
                                E1 = rho*Cp*q1_temp*(Tb+gamma*(H1+Hs-Hb)-Ts);
                                if(E1 > E) continue;
                                E2 = rho*Cp*q2_temp*(Tb+gamma*(H2+Hs-Hb)-Ts);
                                if(E2 > E) continue;
                                double rms_E_temp = abs(E - E1 - E2);
                                double rms_q_temp = abs(qs_temp - q1_temp - q2_temp);
                                double   Tf_temp   =   Tb   +   rho*Cp*qs_temp*(Tb   -
Ts)/(alfa_c*A);
                                if((rms_q_temp < 1e-4)  && (rms_E_temp < rms_E))
                                {
                                    rms_q = rms_q_temp;
                                    rms_E = rms_E_temp;
                                    res_Hb = Hb;
                                    res_Tb = Tb;
                                    res_Tf = Tf_temp;
                                    res_qs = qs_temp;
                                    res_q1 = q1_temp;
                                    res_q2 = q2_temp;
                                    res_gamma = gamma;
                                    cout << "res_gamma = " << res_gamma << "; rms_q =
" << rms_q << "; res_Hb = " << res_Hb << "; res_Tb = " << res_Tb - 273<< endl;
                                    cout << "res_qs = " << res_qs << "; res_q1 = " <<
res_q1 << "; res_q2 = " << res_q2<< endl;
                                    cout << "E1 = " << E1 << "; E2 = " << E2 << "; E
= " << E << "; rms_E = " << rms_E << endl;
                                    fo_s2 << index << " " << rms_E << " " << E << " "
<< E1 << " " << E2 << " " << qs_temp << " " << q1_temp << " " << q2_temp << " " <<
Tb-273 << " " << Hb << " " << gamma << " " << Tf_temp-273 << endl;
                                    index++;
                                }
                            }
                        }
                    }
```

```
                    fo_s2.close();

                    cout << "As = " << As << "; A1 = " << A1 << "; A2 = " << A2 <<
endl;
                    cout << "res_gamma = " << res_gamma << "; Ts = " << Ts - 273 <<
"; res_Tf = " << res_Tf - 273 << endl;
                    cout << "rms_q = " << rms_q << "; res_Hb = " << res_Hb << "; res_Tb
= " << res_Tb - 273<< endl;
                    cout << "res_qs = " << res_qs << "; res_q1 = " << res_q1 << ";
res_q2 = " << res_q2<< endl;
                    E1 = rho*Cp*res_q1*(res_Tb+res_gamma*(H1+Hs-res_Hb)-Ts);
                    E2 = rho*Cp*res_q2*(res_Tb+res_gamma*(H2+Hs-res_Hb)-Ts);
                    cout << "E1 = " << E1 << "; E2 = " << E2 << "; E = " << E << ";
rms_E = " << rms_E << endl;


                    fout << i << " " << As << " " << A1 << " " << A2 << " " << res_gamma
<< " " << Ts - 273 << " " << res_Tf - 273 << " " << res_Tb - 273 << " " << res_Hb
<< " ";
                    fout << res_qs << " " << res_q1 << " " << res_q2 << " " << E1 <<
" " << E2 << " " << E  << " " << rms_q << " " << rms_E << endl;
                    //fout << "res_gamma = " << res_gamma << "; Ts = " << Ts - 273 <<
"; res_Tf = " << res_Tf - 273 << endl;
                    //fout << "rms_q = " << rms_q << "; res_Hb = " << res_Hb << ";
res_Tb = " << res_Tb - 273<< endl;
                    //fout << "res_qs = " << res_qs << "; res_q1 = " << res_q1 << ";
res_q2 = " << res_q2<< endl;
                    //fout << "E1 = " << E1 << "; E2 = " << E2 << "; E = " << E << ";
rms_E = " << rms_E << endl;
                }
                fout.close();
            }

            return 0;
        }
```