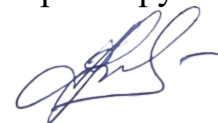


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Кравчук Валерий Юрьевич

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В НАРУЖНЫХ  
ОГРАЖДЕНИЯХ ДЛЯ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ С РЕВЕРСИВНЫМ  
ДВИЖЕНИЕМ ВОЗДУХА

2.1.3 Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и  
освещение

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Доцент, к.т.н.  
Саргсян Самвел Володяевич

Москва

2023

Оглавление	
Введение.....	4
ГЛАВА 1 Состояние вопроса о естественных и гибридных системах вентиляции.....	11
1.1 Развитие теории естественного воздухообмена.....	11
1.2 Некоторые энергосберегающие решения для систем вентиляции.....	15
1.3 Реверсивная вентиляция.....	18
1.4 Приточно-вытяжные устройства.....	24
Выводы по 1 главе.....	27
ГЛАВА 2 Общая постановка задачи расчета и математическая модель системы гибридной реверсивной вентиляции административного здания.....	29
2.1 Алгоритм работы системы гибридной вентиляции с реверсивным движением воздуха в административном здании.....	29
2.2 Воздушный режим здания при работе системы реверсивной вентиляции.....	33
2.3 Аэродинамический режим приточно-вытяжного устройства.....	38
2.4 Тепловой режим помещения при работе системы гибридной реверсивной вентиляции.....	41
2.5 Алгоритм совместной работы воздушного и теплового режимов помещения с системой гибридной реверсивной вентиляции.....	43
Выводы по главе 2.....	44
ГЛАВА 3 Экспериментальное исследование воздухопроницаемости шаровых засыпок.....	45
3.1 Подготовка к проведению эксперимента и средства испытания.....	45
3.2 Проведение испытания и обработка результатов.....	49
3.3 Моделирование фильтрационного массопереноса в пористой среде.....	55
3.4 Статистическая обработка результатов эксперимента.....	61
Выводы по главе 3.....	62
ГЛАВА 4 Физико-математическое моделирование наружного ограждения с пористой вставкой и системы гибридной реверсивной вентиляции .....	63

4.1 Физико-математическое моделирование температурного режима наружного ограждения с пористой вставкой при фильтрации воздуха.....	64
4.2 Физико-математическое моделирование воздушно-теплого режима административного здания, оборудованного гибридной реверсивной вентиляцией.....	72
4.2.1 Общая информация о моделируемом объекте.....	72
4.2.2 Подготовка исходных данных.....	76
4.2.3 Матричные операции при моделировании нестационарного ВТРЗ.....	81
4.2.4 Результаты моделирования нестационарного ВТРЗ.....	87
Выводы по главе 4.....	95
ГЛАВА 5 Рекомендации к проектированию систем реверсивной вентиляции.....	96
5.1 Оценка возможности применения воздухопроницаемых проемов с пористым заполнением с точки зрения современных требований к тепловой защите.....	96
5.2 Определение удельных тепловых потоков через элементы воздухопроницаемого проема.....	99
5.3 Графоаналитический метод подбора заполнения воздухопроницаемого проема.....	106
5.4 Комплексная методика применения воздухопроницаемых проемов с пористым заполнением.....	110
Заключение.....	113
Список сокращений и условных обозначений.....	114
Список литературы.....	117
Приложение А.....	131
Приложение Б.....	132
Приложение В.....	136
Приложение Г.....	138
Приложение Д.....	139
Приложение Е.....	140
Приложение Ж.....	142
Приложение З.....	159

## **Введение**

В настоящее время строительство зданий административного сектора непрерывно происходит в значительных объемах. Вопрос обеспечения требуемых параметров микроклимата в этих условиях, имеет большое значение, так как среда обитания напрямую влияет на здоровье, работоспособность и продолжительность жизни населения. Правительством РФ взят курс на энергосбережение и повышение энергетической эффективности объектов капитального строительства и реконструкции. Требования к инженерному оборудованию зданий высоки и продолжают расти в ближайшей перспективе, что делает актуальным разработку альтернативных способов вентиляции, потребляющих меньше энергии.

### **Актуальность темы исследования**

Существующие системы механической вентиляции в административных зданиях являются сложными и дорогостоящими решениями. Причём их стоимость велика как по капитальным вложениям, так и по эксплуатационным затратам, ведь помимо проектирования, закупки оборудования, монтажа и пусконаладочных работ, существует также техническое обслуживание и сервис, для проведения которых нужна группа специалистов с соответствующей квалификацией. При этом системы вентиляции являются одним из основных потребителей тепловой энергии в зданиях. В совокупности все эти факторы делают разработку альтернативных способов вентиляции актуальной задачей. Кроме того, повсеместно применяемое проектировщиками решение – герметизация оболочки здания и обеспечение воздухообмена исключительно вентиляторами. При этом существенный потенциал природных сил игнорируется, несмотря на то, что ряд зарубежных исследований показывает, что в большинстве случаев его может быть достаточно для обеспечения требуемых воздухообменов. Предлагаемая гибридная реверсивная вентиляция совмещает в себе достоинства механических и естественных систем. Она одинаково эффективно работает во все периоды года, обеспечивает воздухообмен даже при глухом остеклении, а также

снижает потребление энергии за счет естественного режима циркуляции, что делает ее полноправной альтернативой существующим решениям в этой области.

### **Степень разработанности темы исследования**

Разработкой устройств для реверсивной вентиляции занимались J. Hermann, В.Н. Богословский, В.П. Титов, Н.А. Парфентьева, Е.В. Медведева, А.А. Мальсагов и компании «Shulte & Lestraden BV», «Viessman». Исследованиями воздухопроницаемости ограждающих конструкций занимались: Ушков Ф.В., Фокин К.Ф., Богословский В.Н., Титов В.П., Шкловер А.М., Васильев Б.Ф., Брилинг Р.Е., Гагарин В.Г., Козлов В.В., Садчиков А.В., Парфентьева Н.А., Валов В.М., Кривошеин А.Д., Цвяк А.Н., Беляев В.С., Калядин Ю.А., Артемов М.Д. и другие ученые. Среди зарубежных исследователей по данной тематике следует упомянуть R. E. Collins, M. Kaviani, G. T. Mei, E. Reich и других ученых, ссылки на работы которых приведены в полном тексте работы.

### **Объект исследования**

Объектом исследования является система гибридной реверсивной вентиляции с воздухопроницаемыми элементами в наружных ограждающих конструкциях.

### **Предмет исследования**

Предметом исследования являются закономерности распределения потоков воздуха и теплоты в здании, а также тепломассообмен в воздухопроницаемых элементах наружных ограждений при организации гибридной реверсивной вентиляции.

### **Цель и задачи исследования**

Цель диссертационной работы – разработать методику подбора воздухопроницаемых элементов наружных ограждающих конструкций в зданиях с системой вентиляции, использующей реверсирование воздушных потоков.

Задачи диссертационной работы:

1. Исследовать температурные режимы наружных ограждающих конструкций с воздухопроницаемыми элементами при фильтрации в них холодного воздуха.
2. Разработать физико-математическую модель воздушно-теплого режима административного здания, оборудованного системой гибридной реверсивной вентиляции. Исследовать режимы работы этой системы.
3. Разработать программу для ЭВМ, позволяющую решать внутреннюю задачу для указанных режимов согласно данной модели, с использованием матричных операций и адаптивного временного шага.
4. Проверить возможность применения уравнений фильтрации для описания течений в зернистых средах.
5. Разработать метод расчета удельных тепловых потоков для случая воздухопроницаемых теплопроводных включений.

#### **Научная новизна:**

1. Разработан и научно обоснован способ организации воздухообмена в административных зданиях, позволяющий обеспечивать требуемые параметры микроклимата при одновременной экономии энергоресурсов.
2. Введены дополнительные блоки в алгоритм решения внутренней задачи нестационарного воздушно-теплого режима здания, в которых выполнена векторизация циклических процессов и введен адаптивный временной шаг. Это позволило в разы ускорить решение указанной задачи в широком диапазоне переменных параметров без потери точности.
3. Разработана физико-математическая модель нестационарного воздушно-теплого режима здания, оборудованного системой гибридной реверсивной вентиляции.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Разработана и апробирована комплексная методика выбора заполнения воздухопроницаемых элементов, включающая графоаналитический и аналитический методы и использующая результаты численных и натурных экспериментов.

2. Разработана инженерная методика учета воздухопроницаемых элементов в наружных ограждающих конструкциях, позволяющая применять такие элементы без нарушения требований к тепловой защите.
3. Разработана методика расчета удельных тепловых потоков через теплотехнические неоднородности в наружных стенах. Рассчитаны удельные тепловые потоки через воздухопроницаемый элемент стены. Определена зависимость величины удельного теплового потока от скорости движения воздуха через поры засыпки.

### **Методология и методы исследования**

Методология диссертационного исследования включает в себя эмпирический и теоретический научные методы.

Экспериментальные исследования, проведенные в лаборатории НИУ МГСУ, основаны на ГОСТ 32493-2013 «Материалы и изделия теплоизоляционные. Метод определения воздухопроницаемости и сопротивления воздухопроницанию» и ГОСТ 12.03.018-79 «Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний». Перепад давлений определялся микроманометром ММН-240. Расход воздуха определялся при помощи анемометра КИМО VT 200. Результаты эксперимента сравнены с результатами моделирования по уравнению фильтрации при экспериментально определенных коэффициентах. Автоматизированная обработка результатов выполнялась в программном пакете Microsoft Excel. Также в расчетной части работы выполнялось физико-математическое моделирование фильтрационного теплообмена, основанного на современных представлениях об этом процессе и алгоритмизованного в пакете ANSYS CFX. Моделирование нестационарного воздушно-теплового режима выполнялось в пакете Matlab.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Результаты расчетов согласно разработанной физико-математической модели воздушно-теплового режима здания с системой гибридной реверсивной вентиляции, использующей матричные операции и адаптивный временной шаг.

2. Экспериментальные и теоретические исследования тепломассообмена, возникающего при фильтрации в зернистых средах.
3. Инженерная методика подбора воздухопроницаемых элементов в наружных ограждающих конструкциях.

### **Степень достоверности полученных результатов**

Степень достоверности результатов оценена с помощью современных математических методов обработки экспериментов и обуславливается удовлетворительной сходимостью результатов расчетов и экспериментальных исследований. Результаты исследования воспроизводимы при многократных измерениях. Теоретические методики основаны на классических законах тепломассообмена; теории расчета приведенного сопротивления теплопередаче и коэффициентов фильтрации.

### **Апробация результатов исследования**

Результаты исследования докладывались на научных конференциях:

1. «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды» XIV Международная научная конференция 18-29 сентября 2016 г. г. Волгоград (Россия) – г. Афины (Греция). Доклад: «Особенности работы воздушных клапанов при естественной системе вентиляции в холодный период».
2. Международный конкурс «Лучший проект в сфере энергосбережения и энергоэффективности среди аспирантов, студентов организаций высшего образования», Номинация: «Лучшее инженерно-техническое решение по повышению энергетической эффективности и по энергосбережению в зданиях, сооружениях и строениях» 25.11.16. г. Москва. Доклад: «Естественная реверсивная вентиляция административных зданий».
3. II всероссийский молодежный научный конгресс «Россия. Экология. Энергосбережение», номинация «Экология и энергосбережение в строительстве и ЖКХ», проект «Система реверсивной вентиляции административных зданий» 13 декабря 2017 г., Сколково, «Гиперкуб».
4. Научная конференция «Технологии в инженерно-экологическом строительстве, механизации и жилищно-коммунальном комплексе» Доклад:



«Применение воздухопроницаемых проемов в наружных ограждениях зданий». 19 декабря 2017 г., НИУ МГСУ.

**Личный вклад автора в получении результатов** состоит в разработке конструктивных решений для гибридной реверсивной системы вентиляции; разработке методов и методик; подготовке и проведении экспериментов по определению коэффициентов фильтрации и обработке их результатов; в написании физико-математических моделей и алгоритмов для их применения; в подготовке публикаций по материалам диссертационной работы.

**Область исследования** соответствует требованиям паспорта научной специальности 2.1.3 - Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение, а именно: п.1 «Совершенствование, оптимизация и повышение надежности систем теплогасоснабжения, отопления, вентиляции и кондиционирования, методов их расчета и проектирования. Использование нетрадиционных источников энергии»; п. 2 «Технологические вопросы теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха»; п. 5 «Тепловой, воздушный и влажностный режимы зданий различного назначения, тепломассообмен в ограждениях и разработка методов расчета энергосбережения в зданиях».

**Результаты работы внедрены** при проектировании объектов строительства, что подтверждается справкой о внедрении (приложение Г диссертации).

### **Публикации по результатам исследований**

Материалы диссертации достаточно полно изложены в 11 научных публикациях, из которых 8 работ опубликованы в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, и 2 работы опубликованы в журнале, индексируемом в международных реферативных базах Scopus и Web of Science. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (Приложение Д диссертации).

В диссертации использованы результаты научных работ, выполненных автором-соискателем ученой степени кандидата технических наук – лично и в соавторстве. Список опубликованных научных работ В. Ю. Кравчука (лично и в соавторстве) приведен в Приложении Е.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация включает в себя: введение, пять глав, заключение, список литературы (наименований всего - 131, в том числе 36 на иностранных языках), 61 рисунок, 8 приложений, 3 таблицы, 112 формул. Общий объем диссертации 159 страниц.

## Глава 1

### Состояние вопроса о естественных и гибридных системах вентиляции

#### 1.1 Развитие теории естественного воздухообмена

Проблема обеспечения зданий свежим приточным воздухом имеет давнюю историю. Еще за три тысячелетия до н.э. в Иране для вентиляции применялись куполообразные кровли с отверстиями. В то же время в Египте (*malqaf*), Персидском заливе (*badgir*) и Пакистане (*windscoops*) использовались ветровые башни, совмещенные с подземными туннелями или фонтанами, увлажнявшими сухой воздух [77, 87]. Уровень развития технического знания, на тот момент, позволял использовать только те системы вентиляции, которые напрямую зависели от погодных условий. В настоящее время в промышленном и гражданском строительстве активно используются системы с механическим побуждением тяги. И, тем не менее, весь существующий и строящийся жилой фонд, за исключением комплексов премиум-класса, оборудован естественной вентиляцией.

Естественная вентиляция организуется следующим образом: приточный воздух поступает в помещения через неплотности оконных проемов или открытые форточки, а также частично перетекает с лестничной клетки через щели входных дверей [59, 60]. Удаление воздуха производится через вытяжные каналы системы вентиляции. При этом движение воздуха происходит под действием разности давлений, создаваемой температурным перепадом между наружным воздухом и воздухом помещений, а также за счет ветрового давления на фасады и эжекционного воздействия ветра на оголовки вентиляционного канала. В холодный период такая схема воздухообмена работает стабильно ввиду большой разности температур, но в теплый период разности давлений, создаваемой природными силами, зачастую не хватает для достижения требуемого объема вытяжки. Не редки случаи, когда определенное сочетание погодных условий ведет к "опрокидыванию" вентиляции [61]. При этом воздух поступает из вытяжного канала в помещения, перенося запахи и влагу из одних помещений в

другие. Ввиду присущей метеорологическим параметрам стохастичности, точно спрогнозировать работу таких систем затруднительно.

Наряду с этими недостатками, системы с естественным побуждением имеют ряд важных преимуществ, таких как:

- малые капитальные затраты,
- отсутствие необходимости обслуживания,
- нулевое энергопотребление,
- бесшумность.

Эти обстоятельства обусловили широкое распространение таких систем.

В исследовании вентиляции основную роль играет воздушный и тепловой режимы здания, то есть воздухо- и теплообмен внутри отдельных помещений здания, возникающий под действием естественных и искусственных факторов. На воздушный режим здания оказывают влияние:

- степень воздухопроницаемости материалов конструкций и ограждений,
- метеорологические условия (температура наружного воздуха, скорость и направление ветра),
- геометрические характеристики здания (объемно-планировочные решения, ориентация фасадов по сторонам света),
- конструктивные особенности систем вентиляции.

Тепловой режим обуславливается тепловыми потоками от отопительных приборов, людей и оборудования, а также теплообменными процессами через стены и ограждения. Температуры отдельных конструктивных элементов и процессы тепломассопереноса влияют на температуру воздуха в объеме здания. Таким образом, исследование воздушного режима необходимо проводить совместно с тепловым режимом, ввиду их тесной взаимосвязи.

Очевидно, что вопрос организации требуемого воздухообмена не может быть решен без детального изучения воздушного и теплового режимов здания, оборудованного системой гибридной реверсивной вентиляции, исследованию которых и посвящена данная работа.

Одной из первых систематизированных работ в области вентиляции зданий была книга В. И. Соболяцкого [67]. Эта книга, большей частью, посвящена устройству отопительных печей, однако и вопросу вентиляции уделено много внимания. В ней автор рассматривает свойства воздуха (влажность, удельный вес, химический состав), описывает изменения воздушной среды помещения в связи с пребыванием в нем людей. Также приводится утверждение, что в большинстве случаев сырость в домах объясняется не явлением капиллярности влаги из земли через стены, а внутренним влаговыделением от людей и их деятельности. Здесь же указывается первая рекомендуемая норма приточного воздуха на одного человека ( $30 \text{ м}^3/\text{ч}$ ).

Решения квартирной вентиляции обсуждались и оформлялись официальными документами еще до наступления периода интенсивного строительства 1925-1935 годов. Наиболее интересными, с точки зрения технической лаконичности были решения С. Б. Лукашевича [38]. Так он предлагал: транспортировать вытяжной воздух в подвал к тепловому побудителю и осуществлять дальнейший выброс вертикальным сборным каналом; нагревать вытяжной воздух у вытяжной камеры и перед выпуском его в вытяжную шахту. Однако эти решения не получили распространения из-за перерасхода теплоты.

Первым нормативным документом, устанавливающим порядок проектирования вентиляции, был ОСТ/ВСКХ-8231/66 «Основные строительные нормы. Выбор систем вентиляции, вентиляционные обмены» (1935). Среди прочего, в нем указывались ограничения по протяженности горизонтальных участков систем, рекомендуемые кратности воздухообмена, расчетная температура наружного воздуха; допускалась возможность установки дефлекторов на оголовках вентиляционных каналов.

Начало развития теории естественного воздухообмена было положено необходимостью решения задач вентиляции промышленных зданий. В этом направлении активно трудились такие известные ученые, как П.Н. Каменев [24], В.В. Батулин и другие.

Для расчета аэрации П.Н. Каменев предложил использовать метод «внутренних избыточных давлений», В.В. Батулин разработал метод «фиктивных давлений», имеющий аналогичную расчетную схему и позволяющий определять воздухообмен как однопролетных, так и многопролетных цехов. В числе первых трудов, посвященных анализу естественного воздухообмена жилых зданий, возникающему под действием гравитационных сил и ветра, следует назвать работу д.т.н. И.Ф. Ливчака [37]. В ней сделана попытка качественного учета инфильтрации воздуха в многоэтажных жилых зданиях на основе предлагаемого метода расчета воздухообмена через неплотности строительных ограждений вследствие разности температур, ветра и вентиляции.

Несмотря на высокую потребность в развитии систем вентиляции жилых зданий, за последние 50 лет XX века существенных изменений в практике их проектирования и эксплуатации не произошло. Отличительной особенностью развития вентиляции во второй половине XX века является получение возможности построения более точной картины процессов теплообмена. Такой прогресс был достигнут благодаря широкому распространению и развитию программных пакетов, численно решающих задачи теплопереноса при помощи ЭВМ. Ввиду того, что моделирование воздушно-теплого режима является нелинейной сетевой задачей, работа с которой неосуществима вручную, развитие компьютерных технологий позволило эффективно ее решать, что имело большое прикладное значение. Стоит отметить, что моделирование вентиляционных процессов, безусловно, проводилось и ранее. Одна из первых попыток применения физико-математического моделирования в России была предпринята в 1959-1964 гг. В.Е. Константиновой [27]. Ею был использован метод гидравлической аналогии, ранее предложенный В.С. Лукьяновым для решения широкого круга физических задач. До этого моделирование производилось при помощи электрической аналогии. Начиная с 1960 г. ЭЦВМ уже активно используются для расчета воздухообмена здания. В этом направлении трудились такие ученые, как К.С. Светлов [66], А.П. Меренков, В.Я.

Хасилев [42], В. П. Титов [68], Рымаров А.Г. [52-54], В.Н. Варапаев, Е.Х. Китайцева [13-15], Латышенков М.А.[31], Бирюков С.В. и другие.

## **1.2 Некоторые энергосберегающие решения для систем вентиляции**

Процесс непрерывного технического развития заметно меняет окружающую среду человека. Исследования, описанные в [86, 93, 97] предсказывают резкий скачок спроса на искусственное охлаждение зданий к концу XXI века, вызванный процессами глобального изменения климата. Такой прогноз, совместно с растущими требованиями к энергосбережению зданий, подтолкнул ученых и инженеров к поискам эффективных конструкций систем вентиляции и кондиционирования. Как показывают исследования [8,81] естественная и частично механизированная (гибридная) вентиляция имеют большой потенциал в этом направлении. Помимо снижения капитальных и эксплуатационных расходов, также доказано, что воздухообмен за счет естественной вентиляции более благоприятно влияет на организм человека. Подача необработанного приточного воздуха через открытые форточки позволяет снизить урбанистическую нагрузку на психику, создает максимально приближенный к естественному микроклимат.

Эти же исследования показывают, что в зданиях с системами естественной и гибридной вентиляции, выполненной на должном уровне, процент посетителей, удовлетворенных качеством воздушной среды выше, чем в зданиях с механической вентиляцией. Следует отметить, что во многих зданиях, обслуживаемых механическими системами кондиционирования воздуха, проблема обеспечения комфортных параметров микроклимата остается нерешенной. Применение в массовом строительстве светопрозрачных конструкций с малой воздухопроницаемостью обусловило ухудшение качества среды в помещениях, повышение относительной влажности, образование плесени на отдельных конструкциях, повреждение отделки. Как отмечается в [8, 25, 55, 127, 112, 114, 37], эти проблемы характерны не только для нашей страны. Появился специальный термин, характеризующий состояние параметров внутренней среды подобных зданий, – «синдром больных зданий». В

большинстве европейских стран повышение герметичности оконных блоков и, соответственно, снижение воздухообмена помещений, компенсировалось мероприятиями по обеспечению дополнительного притока воздуха (клапаны, системы приточно-вытяжной механической вентиляции и др). В нашей стране переход на применение герметичных светопрозрачных конструкций не сопровождается должным учётом их влияния на микроклимат помещений и работу системы вентиляции.

Существует большое разнообразие схем организации воздухообмена при гибридной вентиляции. Это затрудняет унификацию проектных решений, принимаемых при устройстве гибридных систем. Приток и вытяжка могут быть централизованными или местными. Помимо конкретного выбора вида системы можно по-разному использовать природные силы, такие как эффект теплого и ветрового напоров и солнечное излучение. В [115, 62] приведено несколько примеров, показывающих, что применение гибридных систем вентиляции заметно снижает потребление энергии зданием. Можно выделить следующие типы организации гибридной вентиляции:

- местный приток и централизованная вытяжка,
- централизованный приток и местная вытяжка,
- централизованный приток и централизованная вытяжка.

Здесь применимы различные комбинации с системами механической вентиляции и охлаждения. Кроме того, организация локальной вентиляции также может быть перемешивающей или вытесняющей. Независимо от конкретной модификации технического приема все они более или менее эффективно используют определенные силы для создания воздухообмена.

Располагаемое давление – это наиболее важная побуждающая сила естественной вентиляции, и, в целом, этого давления достаточно для вентиляции здания. Интересен эффект саморегулирования: чем выше тепловая нагрузка вентилируемого помещения, тем больше будет расход воздуха и, соответственно, охлаждающий эффект наружного воздуха. В жарком и умеренном климатах в определенные периоды года иногда дополнительно подогревают воздух в



приточных и вытяжных каналах, с целью увеличения расхода воздуха. В умеренном климате со средними внутренними и внешними тепловыми нагрузками, может потребоваться использование других естественных сил, таких как энергия солнца и ветра. Они используются для создания более высоких перепадов давления, необходимых, в частности, в теплый период при жаркой погоде, когда температура внутреннего воздуха будет ниже, чем наружная, и работа системы исключительно за счет разности гравитационного давления будет невозможна.

Естественный напор можно повысить за счет увеличения высоты воздушного тракта, увеличения температуры внутри вентиляционных каналов или за счет разрежения, создаваемого ветром над дефлектором [104]. Отдельного внимания заслуживает схема воздухообмена, в которой обратная тяга представляет собой еще один способ вентиляции.

Полный штиль, как погодное явление, возникает довольно редко. В прибрежных зонах сила и интенсивность ветров обычно выше, чем на участках суши в отсутствие воды. Скорость ветра растет по высоте, а также в значительной степени зависит от места расположения здания. В городской застройке этот эффект менее значителен. Величина ветрового разрежения обычно ниже всего над крышей здания. Ветровой напор можно увеличить за счет формы здания и оголовков вентиляционных шахт. Для этого могут использоваться вытяжные отверстия в форме трубки Вентури [82].

Высокие температуры наружного воздуха всегда сопутствуют значительной солнечной радиации. Энергия солнца может использоваться для нагрева вытяжных каналов или передаваться на вентилятор посредством фотоэлектрической схемы, тем самым, нормализуя работу вентиляции.

Известна также схема использования двойных фасадов [111]. В этом случае объем воздуха между слоями фасада работает как солнечный коллектор. Нагреваясь, этот воздух стремится вверх, создавая в помещениях здания разрежение, что вызывает циркуляцию воздуха по зданию в теплый период. По

схожему механизму работает система, в которой на наиболее нагруженный солнечной радиацией фасад выводят вытяжной воздуховод системы вентиляции.

Высокую популярность при реконструкции зданий с целью повышения их энергетической эффективности имеет такое инженерное решение, как «ночная вентиляция» [81]. Суть его в следующем: в ночные часы теплого периода система вентиляции отключается, открываются окна и двери помещений для беспрепятственного проветривания холодным наружным воздухом, при этом понижается температура внутренних поверхностей помещений. К утру строительные конструкции здания аккумулируют достаточное количество холода, чтобы обеспечить более комфортный тепловой режим работникам и посетителям здания.

Несмотря на то, что количество различных приемов, позволяющих улучшить качество воздуха и снизить энергопотребление, велико, большинство из них направлено на стабилизацию работы вентиляции в холодный период и организацию привычного направления тяги в теплый период. Предложение автора заключается в разработке системы вентиляции, которая не противодействовала бы естественной тяге в теплый период, а помогала ей. Иными словами, предлагается исследовать возможность осуществления вентиляции зданий при помощи системы с переменным направлением движения воздуха.

### **1.3 Реверсивная вентиляция**

Принцип реверсирования приточно-вытяжных потоков уже некоторое время известен в инженерной практике. Во всех случаях применения этой концепции исследование сводилось к разработке устройства или комплекса устройств, которые могли бы создавать и поддерживать требуемый воздушно-тепловой режим отдельных помещений или их небольших групп. Одним из первых упоминаний о реверсивной вентиляции можно считать 1975 год, когда Джонс Херман разработал систему, применимую к закрытым помещениям с двумя вентиляционными отверстиями [116]. В одном из них располагается вентилятор, приводимый в движение реверсивным электроприводом. В систему также входит

указатель направления ветра, температурный датчик, датчик подвижности наружного воздуха и контроллер. Параметры наружного воздуха определяются соответствующими индикаторами и обрабатываются контроллером, который дает импульс на электродвигатель. Это изобретение позволило создать воздухообмен в помещении, максимально используя энергию ветрового потока.

В 1981 году компания «SCHULTE & LESTRADEN BV» представила способ вентиляции помещений большого объема. Идея заключалась в размещении двух вентиляторов на противоположных торцах помещения, сообщающихся с наружным воздухом. Один вентилятор работал как приточный, другой – как вытяжной. Частота вращения рабочих колес автоматически подстраивалась под постоянно меняющийся перепад давлений, чем обеспечивался стабильный воздухообмен.

14 декабря 2004 года Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения РАН и Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН получили патент на способ регулирования теплообмена в системе вентиляции офисных и жилых помещений и устройство для реализации этого способа [117]. В патенте описан способ регулирования теплообмена в системе вентиляции офисных и жилых помещений, согласно которому воздух периодически подают из помещения на улицу и с улицы в помещение через приточно-вытяжное устройство. Корпус устройства представляет собой трубу круглого, прямоугольного, или другого сечения, один конец которой выходит в помещение, а другой – на улицу (рисунок 1.1). Внутри размещен реверсивный вентилятор или два приточных вентилятора, теплоаккумулирующая насадка, перед которой со стороны помещения расположен слой сорбента паров воды. Технический результат – повышение степени утилизации теплоты вытяжного воздуха, предотвращение замерзания конденсата при низких температурах наружного воздуха и повышение термического комфорта в офисных и жилых помещениях.

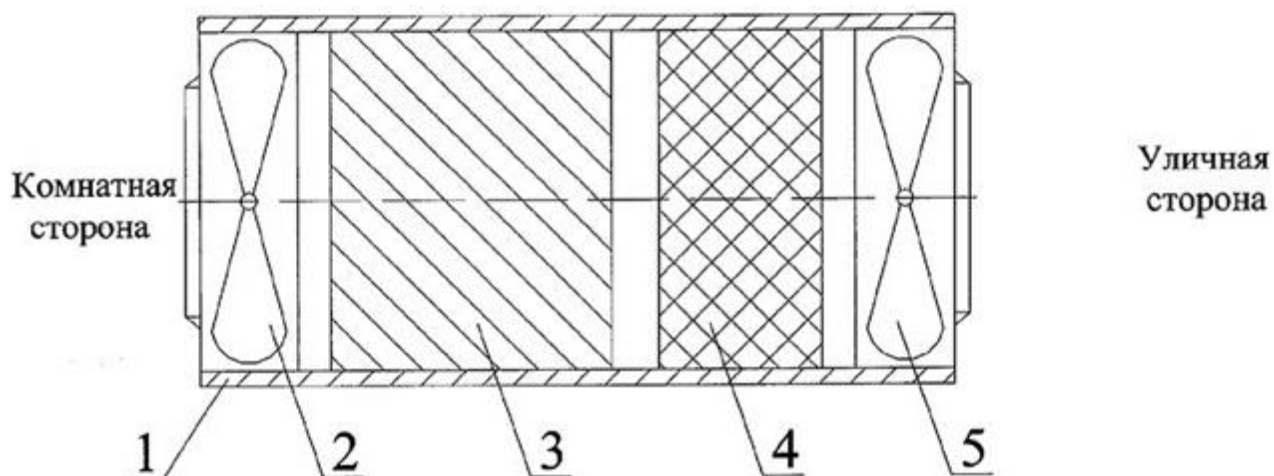
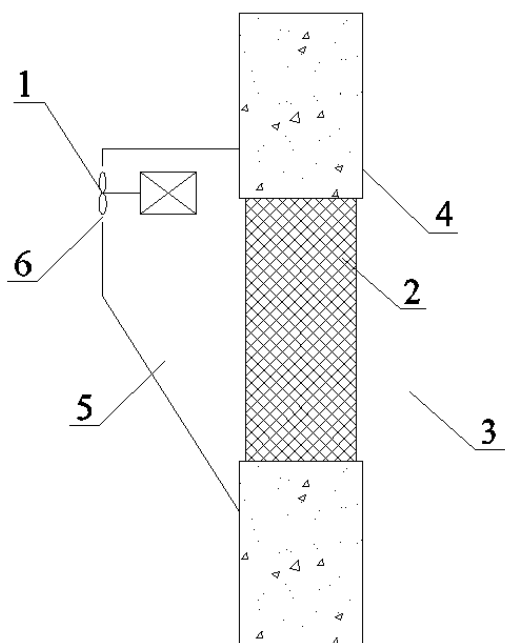


Рисунок 1.1 – Приточно-вытяжное устройство. 1 – корпус устройства, 2 – вытяжной вентилятор, 3 – сорбент, 4 – теплоаккумулирующий слой, 5 – приточный вентилятор

Довольно современным изобретением, относящимся к данному направлению, является устройство климатической системы помещений [118]. В 2007 году А.А. Мальсагов разработал устройство, предназначенное для вентиляции (и одновременного охлаждения или нагрева воздуха) помещений. Устройство размещено в одном корпусе, который жестко устанавливают в проеме рамы окна с возможностью симметричного расположения внутри и за окном. При этом устройство состоит из внешнего и внутреннего теплообменников и двух реверсивных вентиляторов, установленных в противоположных сторонах корпуса. Корпус снабжен продольными решетками – отверстиями для воздухообмена и аккумулятором с подзарядным устройством. По сути, это устройство представляет собой два канала, в каждом из которых установлен теплообменник. Теплообменники объединены между собой контуром с промежуточным теплоносителем. В случае работы на охлаждение, приточный воздух поступает через охлаждающий теплообменник, а вытяжной выводится через нагревающий. При работе на нагревание вентиляторы меняют направление тяги. Как следствие – приточный воздух нагревается, а вытяжной охлаждается.

Коллектив ученых в составе Богословского В.Н., Титова В.П., Парфентьевой Н.А. и Медведевой Е.В. разработали и запатентовали две установки для вентиляции помещений [123, 124]. Исследование работы устройства с реверсивным движением воздуха опубликованы в [69]. Суть изобретения в следующем: в специальный проем в стене устанавливается пористая вставка; сторона вставки, обращенная на улицу, укрывается кожухом, в котором монтируется реверсивный вентилятор (рисунок 1.2). В прямоточном режиме работы устройство удаляет воздух из помещения через пористую вставку, вследствие чего она прогревается. В определенные моменты устройство переходит в реверсивный режим работы и подает наружный холодный воздух в помещение. При этом, проходя через вставку, приточный воздух нагревается, благодаря чему достигается экономия теплоты. По окончании цикл повторяется. Устройство



может работать совместно с другим таким же устройством, расположенным на противоположном фасаде здания, при этом необходима синхронизация режимов их работы.

Рисунок 1.2 – Установка для вентиляции помещений.

1 – реверсивный вентилятор, 2 – регенеративный теплообменник, 3 – внутренний объем помещения, 4 – наружное ограждение, 5 – диффузор, 6 – приточное окно

Второй патент описывает вентиляционное устройство, применимое для работы в общественных, административных и промышленных зданиях. Вентиляционное устройство содержит установленный в проеме стены секционный теплообменник, каждая секция 1 и 2 (рисунок 1.3) теплообменника заключена в кожух 3 с образованием кольцевого канала 4, а к ее верхней и нижней частям с противоположных сторон подключены приточный и вытяжной

воздуховоды 5 и 6 с клапанами 7 и 8, причем секции 1 и 2 установлены последовательно, а в верхней части канала 4 каждой секции 1 и 2 расположены отбойные пластины 9.

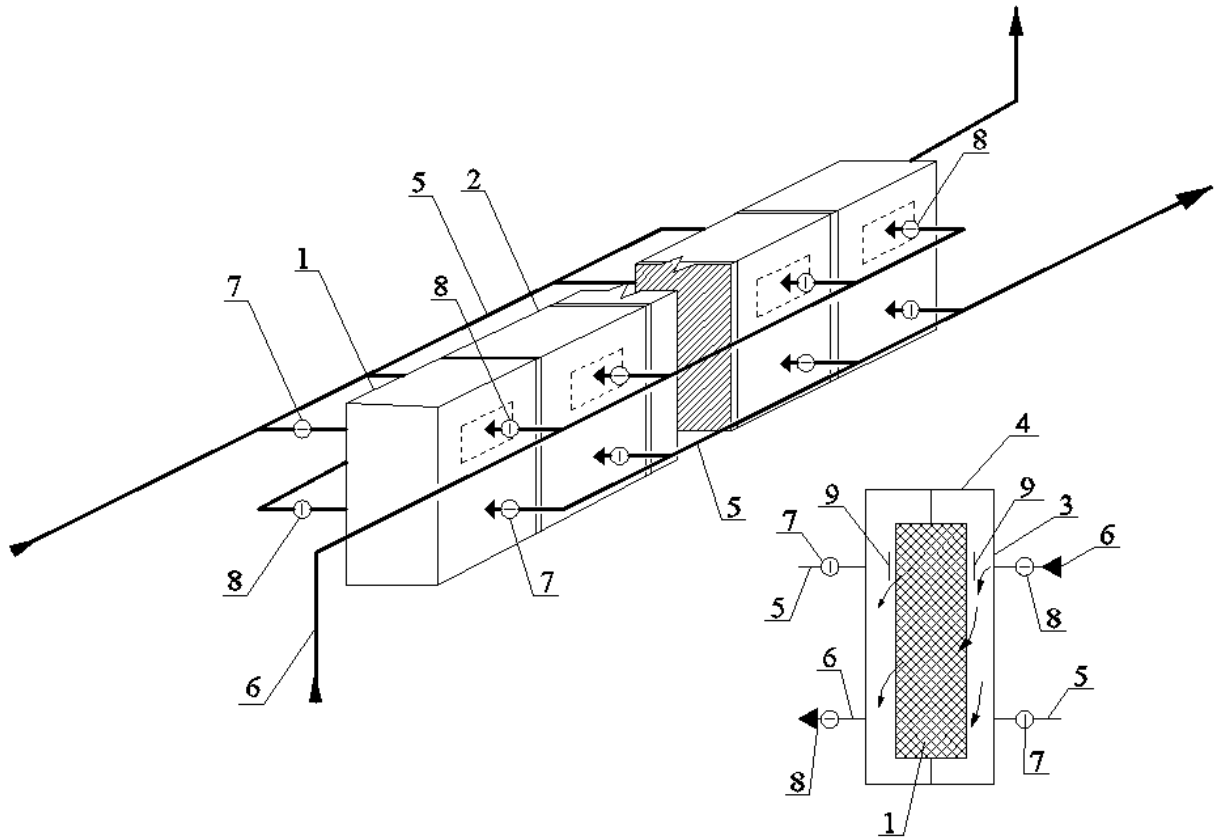


Рисунок 1.3 – Вентиляционное устройство.

1,2 – нечетная и четная секции теплообменника, 3 – кожух, 4 – кольцевой канал, 5,6 – приточный и вытяжной воздуховоды, 7,8 – клапаны, 9 – отбойные пластины

Вентиляционное устройство работает следующим образом. Вытяжной воздух из воздуховода 6 прокачивается через открытые клапаны 8, управляемые из одного центра, например, с помощью пневматического привода, через четные секции 2 регенеративного теплообменника, нагревая ее. В тот же отрезок времени через клапаны 7 нечетных секций 1 из приточного воздуховода 5 проходит наружный воздух, нагреваясь за счет теплоты, аккумулированной в предшествующем цикле, когда четные секции 2 работали на приток, а нечетные – на вытяжку. При этом, отражаясь от отбойных пластин 9, воздушный поток устремляется в нижнюю часть секций 1 и 2, равномерно распределяясь по

теплообменнику. По истечении периода, когда прогреются четные секции 2 теплообменника, регулировочные клапаны 7 и 8 переключаются таким образом, чтобы четные секции 2 работали на приток, а нечетные 1 – на вытяжку.

Принцип реверсирования приточно-вытяжных потоков при вентиляции описан также в [90]. Здесь он применяется для вентилирования подземных автостоянок. Автор обосновывает снижение требуемого расхода приточного воздуха с сохранением допустимой концентрации  $\text{CO}_2$  при использовании данной концепции. Указывается, что по сравнению с традиционными схемами организации вентиляции, реверсирование потоков позволяет снизить воздухообмен на 30%. Также заявляется, что данная технология может применяться и для других зданий, которые выбрасывают в атмосферу вредные вещества.

Концепция реверсивной вентиляции в зданиях различного назначения актуальна и в данный момент. Так компания VISSMAN предлагает своим клиентам установку системы вентиляции с реверсивным движением воздуха [120]. Это устройство является современным аналогом патентов российских ученых и принципиально от них не отличается. Работа устройства основана на периодическом изменении режимов работы реверсивного вентилятора, в зависимости от степени прогрева теплоаккумулирующей вставки (рисунок 1.4). В квартире или доме может устанавливаться несколько таких устройств, которые синхронно меняют свои эксплуатационные режимы. При такой системе вентиляции теплоутилизация может достигать 90%.



Рисунок 1.4 – Вентиляционное реверсивное устройство Vitovent 100-D.

1 – внутренняя крышка, 2 – реверсивный вентилятор, 3 – аккумулятор теплоты, 4 – наружная крышка

Существуют также решения для естественной вентиляции в виде приточных клапанов АэрЭко или КИВ. Эти устройства создают некоторый воздухообмен в помещениях, однако вследствие малых площадей для прохода приточной струи ее скорость оказывается чрезмерно высокой. Одновременно с этим искусственное ограничение скорости избыточно сокращает расход воздуха, что делает эти устройства неэффективными. Также клапаны КИВ обладают достаточно высоким сопротивлением движению воздуха даже в полностью открытом состоянии, что не позволяет обеспечивать требуемый расход воздуха одним устройством.

#### 1.4 Приточно-вытяжные устройства

Как можно заметить, большинство устройств, обеспечивающих реверсивный режим работы, имеют в своей конструкции пористый элемент. Такое решение принято вследствие определенных теплотехнических и гидравлических свойств пористых материалов. В частности, такие материалы способны хорошо аккумулировать и отдавать теплоту, а при их производстве достаточно легко, с



технологической точки зрения, менять характеристики, определяющие воздухопроницаемость. По мнению автора, применение пористого материала в приточно-вытяжном устройстве централизованной реверсивной системы вентиляции также уместно в связи с еще одной особенностью: в указанной системе вентиляции приточно-вытяжные устройства подают приточный воздух в рабочую зону, вследствие чего необходимо соблюдать ограничение по скорости в приточной струе. Использование пористого материала позволяет сгладить поле скоростей по сечению и создать равномерный поток приточного воздуха. Ввиду того, что при математическом моделировании внутренней задачи воздушного режима нельзя не учитывать зависимость расхода фильтруемого воздуха от перепада давления, то необходимо обратить внимание на законы, по которым происходит движение воздуха в пористых средах и, в соответствии с ними, разработать конструкцию приточно-вытяжного устройства.

Первым упоминанием о течении флюидов в пористых средах можно считать 1750 год, когда М. В. Ломоносов в работе «О слоях земли» отмечал связь подземных вод с вмещающими их горными породами. В 1856 году французский ученый Анри Дарси провел ряд экспериментов и предположил, что расход фильтрата прямо пропорционален напору и обратно пропорционален толщине фильтрующего слоя [21, 88].

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{k} G. \quad (1.1)$$

В 1899 году Н. Е. Жуковский в своей обобщающей работе «Теоретические исследования движения подпочвенных вод» впервые ввел понятия «напорная функция» и «сила сопротивления» при фильтрации грунтовых вод. Первое время изучение фильтрации проводилось исключительно в рамках подземной гидромеханики. В 1909 году Кнудсен поставил опыт с течением разреженного газа через пористый материал, в котором наблюдал эффект проскальзывания. Обоснование этого эффекта принадлежит Клинкаенбергу и носит его имя [96]. И хотя этот эксперимент больше относится к области диффузии, эффект проскальзывания также наблюдается и в ходе фильтрации газов при низком

перепаде давления. Карман (1937) и Козени (1927) предложили уравнение проницаемости, основанное на удельной площади поверхности пор [84]. В 30-х и 50-х годах XX века проводятся исследования течений двухфазных потоков и температурного режима пористых материалов при фильтрации [83, 89, 102]. В 1949 году Бринкманн модифицировал закон Дарси, добавив туда новое слагаемое

$$\beta \nabla^2 G + G = -\frac{k}{\mu} \nabla p, \quad (1.2)$$

где  $\beta$  – эффективная вязкость.

Аналогичное уравнение предложил Форхгеймер в [85]

$$\frac{\Delta p}{L} = \left( \frac{G}{\varepsilon A} \right) a + \left( \frac{G}{\varepsilon A} \right)^2 b. \quad (1.3)$$

Эргун (1952) описал инерционные эффекты, возникающие при течении флюида в порах, и вывел уравнение для фильтрации в шаровых и цилиндрических засыпках

$$\frac{\Delta p}{x} = \frac{150 \mu (1 - \varepsilon)^2}{d^2 \varepsilon^3} w + \frac{1,75 \rho (1 - \varepsilon)}{d \varepsilon^3} w^2. \quad (1.4)$$

В настоящий момент данное уравнение может применяться для моделирования течений в пористых средах в программном пакете ANSYS Fluent. Первым же, кто упомянул о том, что закон движения флюида должен содержать два слагаемых: первый – линейный, учитывающий вязкое течение и второй – квадратичный, учитывающий инерциальное течение, был Рейнольдс (1900). Перечисленные выше уравнения основаны на постулатах теории гидравлического радиуса, предложенной Козени. Существуют альтернативные теории, описывающие отклонения от закона Дарси при высокоскоростных течениях. К таким теориям относятся «тормозная теория» (Немени (1934), Бизель (1950), Шоуматов (1952)) и статистическая теория [108]. Справедливо заметить, что статистическая теория описывает макроскопическое течение с большой

погрешностью, а статистический метод определения пористости (при достаточном количестве замеров) является одним из наиболее точных [85].

Одними из первых в СССР систематических исследований движения воздуха через пористые насадки были исследования Р.Е. Брилинга, проведенные в ЦНИИПСе [7]. В рамках этого исследования он систематизировал имеющиеся и предложил новые теоретические закономерности и опытно их обосновал, а также описал методики проведения экспериментов по определению воздухопроницаемости материалов. Наряду с этими исследованиями инфильтрацию изучали и другие научно-исследовательские организации, в числе которых можно отметить Институт им. Эрисмана (д-р Ф. Г. Эпштейн), Институт коммунальной гигиены (проф. С.И. Ветошкин), и др. С середины XX века и до настоящего времени в области исследований движения флюидов в пористых средах трудились: А. В. Лыков [39], Н. Е. Леонтьев [35, 36], М. Э. Эглит [80], В. И. Аравин, С. Н. Нумеров [1], Л. С. Лейбензон [32-34], А. М. Пирвердян [45, 46], П. Я. Полубаринова-Кочина [47, 48], Г. Б. Пыхачев [50], В. Н. Щелкачев [78, 79], В. К. Шелег [76], А. Г. Косторнов [29], и другие. В СССР и России исследованиями воздухопроницаемости ограждающих конструкций занимались: Ф. В. Ушков [71-73], К. Ф. Фокин [74], В. Н. Богословский [5], В. П. Титов [70], А. М. Шкловер [77], Б. Ф. Васильев, Р. Е. Брилинг [7], В. Г. Гагарин [17, 18], В. В. Козлов, А. В. Садчиков [56], А. Г. Рымаров [57], Н. А. Парфентьева [44], В. М. Валов [9-12], А. Д. Кривошеин [30], А. Н. Цвяк [75], В. С. Беляев [3], Ю. А. Калядин [22, 23], М. Д. Артемов [2] и другие. Среди зарубежных работ по данным темам следует упомянуть Р. Е. Коллинса, М. Кавиани, Г. Т. Мей, Е. Рейха и других [87, 95, 98-103, 106-110].

### **Выводы по 1 главе**

1. Существующие системы естественной вентиляции не могут обеспечивать требуемые расходы воздуха во все периоды года, вследствие зависимости от погодных условий и в связи с повсеместной установкой окон из ПВХ, обладающих малой воздухопроницаемостью. Они также создают сквозняки и

практически не регулируются. Механические системы вентиляции являются затратным решением и, в целях экономии, часто находятся в выключенном состоянии.

2. Альтернативные способы вентиляции не получают широкого распространения в российской инженерной практике вследствие низкой эффективности таких решений и отсутствия отлаженных механизмов внедрения.
3. Для соблюдения требований к энергетической эффективности объектов строительства, а также для создания комфортной воздушной среды необходимо заниматься разработкой систем вентиляции, сочетающих в себе достоинства естественных и механических систем.

## Глава 2

### **Общая постановка задачи расчета и математическая модель реверсивной системы гибридной вентиляции административного здания**

В рамках диссертации рассмотрена физико-математическая модель формирования воздушного и теплового режимов в административном здании, в результате их взаимовлияния в процессе работы системы гибридной реверсивной вентиляции.

Системой гибридной реверсивной вентиляции предлагается называть систему вентиляции, использующую в качестве побудителя тяги как естественные, так и искусственные силы для создания движения воздуха с изменяющимся направлением. При этом режимы работы системы в обоих направлениях должны быть проектными.

Задача расчета воздушно-теплового режима административного здания решается с целью валидации графоаналитического метода определения заполнения воздухопроницаемого проема, а также для установления достаточности конструктивно-планировочных мер и режима воздухообмена для поддержания комфортных параметров микроклимата в помещениях.

#### **2.1 Алгоритм работы системы гибридной вентиляции с реверсивным движением воздуха в административном здании**

Система гибридной реверсивной вентиляции это такая система, которая в зависимости от метеорологических параметров изменяет направление движения воздуха (с привычного при естественной циркуляции в ХП на обратный) и тип побудителя тяги (с естественного на механический). При этом перемещение воздуха происходит по одним и тем же каналам, а направление его движения изменяется. В современной практике помещения административных зданий охлаждаются с применением местных систем охлаждения (сплит-систем) в особо жаркие часы теплого периода года. При этом, в целях экономии выделяемого системой холода, закрываются окна. В этих условиях температура воздуха в

помещении становится ниже температуры наружного воздуха, и система естественной вентиляции «опрокидывается». При этом наличие окон с малой воздухопроницаемостью приводит к блокировке воздухообмена, что формирует неблагоприятный газовый режим в помещениях, характеризующийся повышенной запыленностью и загазованностью воздуха. Применение гибридной реверсивной вентиляции улучшает газовый режим помещений, благодаря стабильной подаче свежего очищенного воздуха.

Система имеет два режима работы:

1. естественный,
2. реверсивный.

В естественном режиме (рисунок 2.1) свежий воздух поступает через индивидуальные приточно-вытяжные устройства, расположенные в заприборных областях наружного ограждения, в помещения, ассимилирует избытки теплоты и влаги и удаляется из них по вытяжным каналам. Нагрев холодного воздуха обеспечивается при его прохождении через приточно-вытяжное устройство, а также вблизи секций отопительного прибора. Этот режим работы имеет место в течение холодного периода года, так как он существует при условно положительном располагаемом давлении. В теплый период года располагаемое давление меняет знак, и система вентиляции начинает работать в реверсивном режиме. В этом случае приточный воздух забирается приточной установкой, расположенной на техническом этаже, охлаждается до температуры  $t_{охл}$  и попадает в помещения по индивидуальным вентиляционным каналам. После ассимиляции вредных веществ в рабочей зоне помещений загрязненный воздух выбрасывается на улицу через приточно-вытяжные устройства. Разумеется, что создаваемое в теплый период года положительное располагаемое давление очень мало для обеспечения нормативного воздухообмена, поэтому весь теплый и переходный период система будет работать в реверсивном режиме. Таким образом, смена режимов работы приходится на температуру  $+8^{\circ}\text{C}$  и для этого есть еще одна важная причина, которая заключается в следующем: в ХП наружный воздух не обрабатывается в приточной установке, а его подогрев выполняется

отопительным прибором, при этом мощность прибора и конструкция приточно-вытяжного устройства подбираются так, чтобы исключить замерзание воды в системе отопления. При достижении наружным воздухом температуры  $+8^{\circ}\text{C}$  отопительные приборы отключатся, а воздух начнет поступать в помещения достаточно холодным, что недопустимо.

Особая схема циркуляции воздушных масс накладывает определенные ограничения на применение реверсивных систем. В частности, реверсивная вентиляция неприменима в жилых зданиях, так как при обращении направления движения, приточный воздух поступает в чистые помещения квартир, проходя через помещения санузлов и кухни. Система также неприменима в случае, если вредности, удаляемые системой вентиляции в естественном режиме работы, могут оседать на стенках канала и впоследствии заноситься в помещения потоком приточного воздуха в реверсивном режиме работы. Решения централизованной реверсивной вентиляции предлагались в работах автора [56-58].

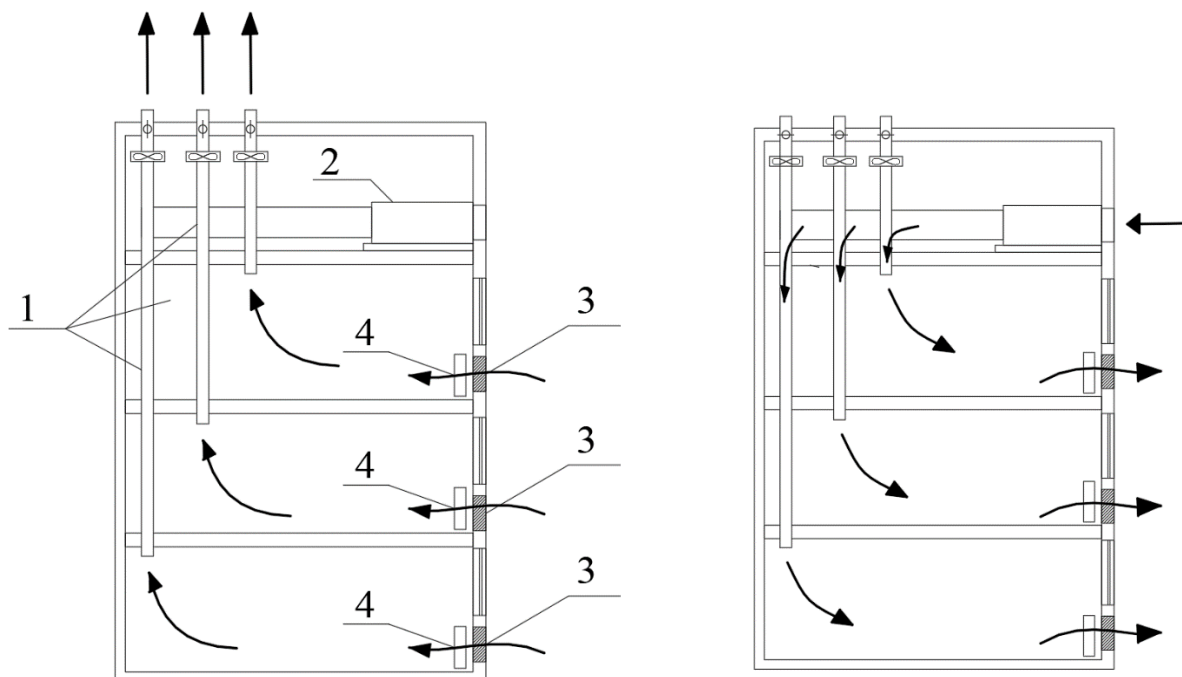


Рисунок 2.1 – Слева – естественный режим работы, справа – реверсивный. 1 – индивидуальные вытяжные каналы, 2 – приточная установка, 3 – индивидуальные приточно-вытяжные устройства, 4 – отопительные приборы

В теплый период приточный воздух необходимо очищать от возможных загрязнений и охлаждать перед подачей в помещения. Эти процессы выполняются приточной установкой с охладителем и фильтром. Обработанный воздух должен быть распределен между помещениями, что происходит благодаря системе каналов изображенной на рисунке 2.2.

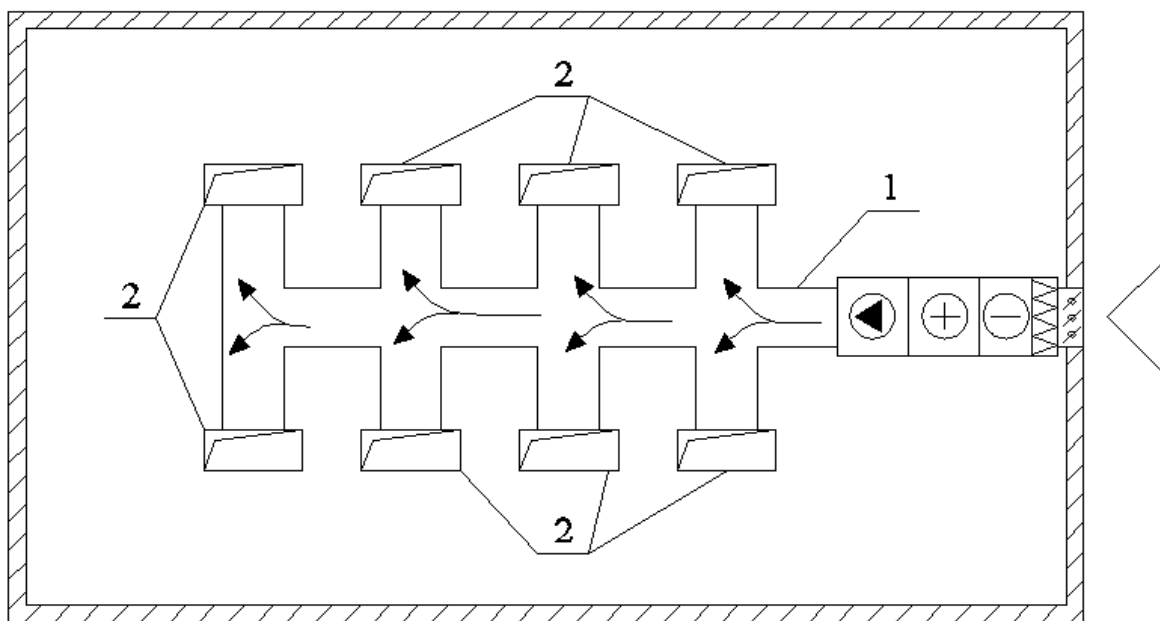


Рисунок 2.2 – Схема плана чердачного помещения. 1 – магистральный канал, 2 – индивидуальные каналы системы вентиляции

В холодный период приточная установка не работает, а выброс воздуха на улицу осуществляется через автоматически открываемые клапаны, расположенные в вентиляционных каналах. В теплый и переходный период эти клапаны закрываются, и приточная установка подает воздух в помещения без утечек на улицу. В целях экономии холода, выделяемого приточной установкой в теплый период, все воздуховоды должны быть утеплены.



## 2.2 Воздушный режим здания при работе системы реверсивной вентиляции

Воздушный режим помещения с системой гибридной реверсивной вентиляции определяется формирующимся воздухообменом и полем скоростей воздуха в объеме помещения. Эти параметры связаны с сопротивлением проницаемых элементов, через которые проходит приточный и вытяжной воздух и располагаемым естественным давлением.

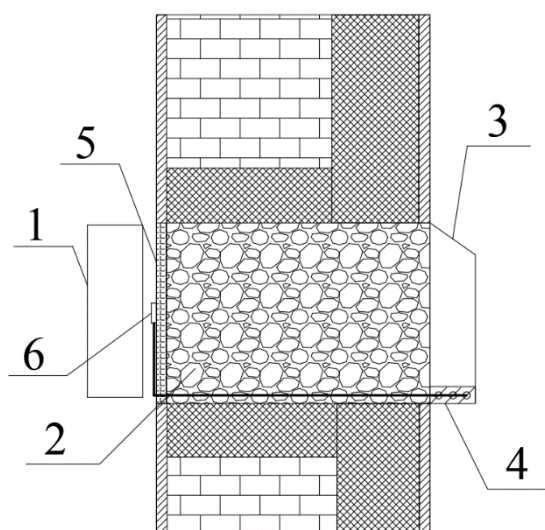
Изменение величины естественного давления во времени возникает вследствие изменения разности плотностей наружного и внутреннего воздуха и изменения скорости и направления ветра. Разность плотностей обусловлена разностью температур наружного и внутреннего воздуха, при этом изменение температуры наружного воздуха моделируется по гармоническому закону. Коэффициенты в уравнении колебания наружной температуры зависят от географических координат исследуемого объекта. Температура внутреннего воздуха зависит от воздушно-теплого режима здания и внешних метеорологических условий.

Одним из элементов, представляющих сопротивление на пути приточного и вытяжного воздуха, является индивидуальное приточно-вытяжное устройство. Существует ряд требований, предъявляемых санитарными нормами к подобным устройствам. Эти требования сводятся к трем пунктам:

1. температура воздуха, поступающего через устройство не должна быть ниже минимально допустимой температуры в холодный период года более чем на 2 °С,
2. скорость поступления приточного воздуха в рабочую зона не должна превышать 0,3 м/с,
3. устройство не должно нарушать требований к тепловой защите здания.

Можно заметить, что между 1 и 2 пунктом есть связь, которая заключается в том, что обеспечение малой скорости поступления воздуха в помещение позволяет ему достаточно прогреться, при движении в устройстве и вблизи отопительного прибора. Малые скорости поступления воздуха нужно сочетать с

достаточным расходом. Осуществить это можно благодаря такой конструкции устройства, в которой воздух будет поступать микроструями через достаточно большую площадь. При этом необходимо располагать устройство в подоконном пространстве сразу за отопительным прибором. Для более равномерного прогрева притока необходимо, чтобы во фронтальной проекции отопительный прибор полностью перекрывал собой это устройство. Выполнить требование к подвижности в приточной струе, а также осуществить очистку фильтруемого воздуха и снизить уровень шума предлагается при помощи приточно-вытяжного устройства в виде пористой вставки с заслонкой. Предлагаемая конструкция устройства представлена на рисунке 2.3. Причём отопительный прибор должен



располагаться на некотором расстоянии от стены (3-7 см) чтобы воздух, выходящий в верхней части образовавшейся щели, двигался не слишком быстро.

Рисунок 2.3– Конструкция приточно-вытяжного устройства. 1 – отопительный прибор, 2 – воздухопроницаемый элемент, 3 – ветроотбойный щиток, 4 – заслонка

Однако для лучшего прогрева воздуха при фильтрации требуется разрабатывать отопительные приборы специальной конструкции, которая позволила бы формировать высокую температуру на поверхности вставки, обращённой в помещение. Разработка такого прибора не является приоритетной задачей данного исследования.

Заслонка должна оборудоваться регулятором прямого действия, который будет закрывать её при достижении температуры  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  в прослойке между прибором и вставкой. Если направить воздух вверх по щели (например прикрыв остальные выходы из неё), то точкой с наименьшей температурой будет нижняя точка вставки. Если не делать никаких ограничений, то это будет точка на оси вставки. В этих местах и необходимо устанавливать элемент регулятора,

воспринимающий температуру. Вставка должна оборудоваться фильтром класса не ниже G4, который можно реализовать в виде рамки с фильтрующим материалом, установленной вплотную к стене на внутренней стороне вставки. В этом случае можно будет периодически менять этот фильтр, не снимая отопительный прибор, а очистку пористого заполнения выполнять обратной продувкой. Возможно, что эффекта самоочистки при реверсивном режиме будет достаточно. В общем это зависит от диаметра пор и скорости воздуха, но у автора нет задачи рассматривать этот вопрос более подробно на данном этапе. Воздухопроницаемость пористых материалов, на данный момент, изучена не полностью, однако в общем случае она характеризуется коэффициентом воздухопроницаемости  $\mu$ , определяемым опытным путем. Коэффициент воздухопроницаемости зависит от открытой пористости материала: чем больше пористость, тем выше воздухопроницаемость. С увеличением влажности материала коэффициент воздухопроницаемости снижается. В рассматриваемом случае, вследствие непосредственного контакта поверхности материала с окружающей средой, коэффициент воздухопроницаемости может снижаться за счет засорения поверхности и массива материала частицами пыли, содержащимися в наружном и внутреннем воздухе [40]. Кроме того, введение теплотехнической неоднородности значительного размера сильно влияет на температурный режим стены. Чтобы исключить появление конденсата в проеме за отопительным прибором необходимо выполнить моделирование температурного режима указанной краевой зоны наружного ограждения и предусмотреть предупреждающие меры. Тепломассообменные процессы в пористой вставке будут более подробно рассмотрены в 3 и 4 главах настоящей работы.

Теперь обратим внимание на вопрос целесообразности применения этой технологии. Рассмотрим здание, приведённое в главе 4 настоящей работы. Это офис, с площадями (по внутреннему обмеру) 30-60 м<sup>2</sup>. Принимая во внимание, что на каждого сотрудника должно приходиться по 4,5 м<sup>2</sup> (СанПин 2.2.2/2.4. 1340-03) площади и 60 м<sup>3</sup>/ч воздухообмена получаем 360 м<sup>3</sup>/ч на помещение 30 м<sup>2</sup>. В таком помещении может быть от 2 до 4 окон и соответствующее количество

вставок. Рассмотрим наиболее неблагоприятный случай с двумя вставками. Воздухопроизводительность каждой составит  $180 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Для нагревания такого количества воздуха от  $-25^\circ\text{C}$  до  $+20^\circ\text{C}$  понадобится  $2,26 \text{ кВт}$  теплового потока. Также учитывая, что тепловые затраты на вентиляцию обычно занимают около 55% теплового баланса, а трансмиссионные тепловые потери 10%, то суммарная мощность отопительного прибора вырастет до  $2,67 \text{ кВт}$ . Это достаточно большое значение для отопительных приборов в среднем, однако если считать, что температурный напор в случае подачи воздуха к прибору при температуре  $+5^\circ\text{C}$  будет заметно больше, то, возможно, оно станет вполне приемлемым. Для уточнения выполним тепловой расчёт отопительного прибора. В качестве предпочтительной марки прибора рассмотрим биметаллический радиатор Rifar base высотой 570 мм, с шириной одной секции 80 мм и номинальным тепловым потоком 197 Вт на одну секцию. При температуре воздуха около прибора  $5^\circ\text{C}$  коэффициент приведения составляет 1,06, а общее количество секций – 13 шт. Площадь подходящей под этот прибор вставки составляет примерно  $0,6 \text{ м}^2$ . Таким образом скорость воздуха в порах (с учётом пористости) составит  $0,22 \text{ м/с}$ , а в среднем по сечению (без учёта пористости)  $0,083 \text{ м/с}$ . Также можно заметить, что увеличение количества секций увеличивает также допустимый размер вставки и мощность дополнительной секции превышает теплотраты на нагрев воздуха через добавленную площадь вставки, поэтому увеличение количества секций позволяет снизить скорость воздуха, либо повысить воздухообмен. На основании приведённого расчёта можно говорить о том, что подача нужного количества теплоты даже существующими отопительными приборами не является ограничением для применения предлагаемой технологии.

Достаточно важным явлением, влияющим на работу реверсивной вентиляции, является экономайзерный эффект во вставке. Пользуясь данными о требуемом сопротивлении теплопередаче ограждений в разных регионах можно определить тепловые потери через заприборный участок стены ( $0,6 \text{ м}^2$ ) и, в данном случае, считать, что эта теплота ассимилируется приточным воздухом. В зависимости от климатических параметров эта теплота будет составлять разную

долю от теплотрат на нагрев вентиляционного воздуха. Если рассмотреть этот вопрос в конкретных числах и определить процент, на который воздух будет нагреваться за счёт ассимиляции (аналог безразмерной температуры), в зависимости от ГСОП и  $t_5^{0,92}$ , то получим зависимости, представленные на рисунке 2.4.

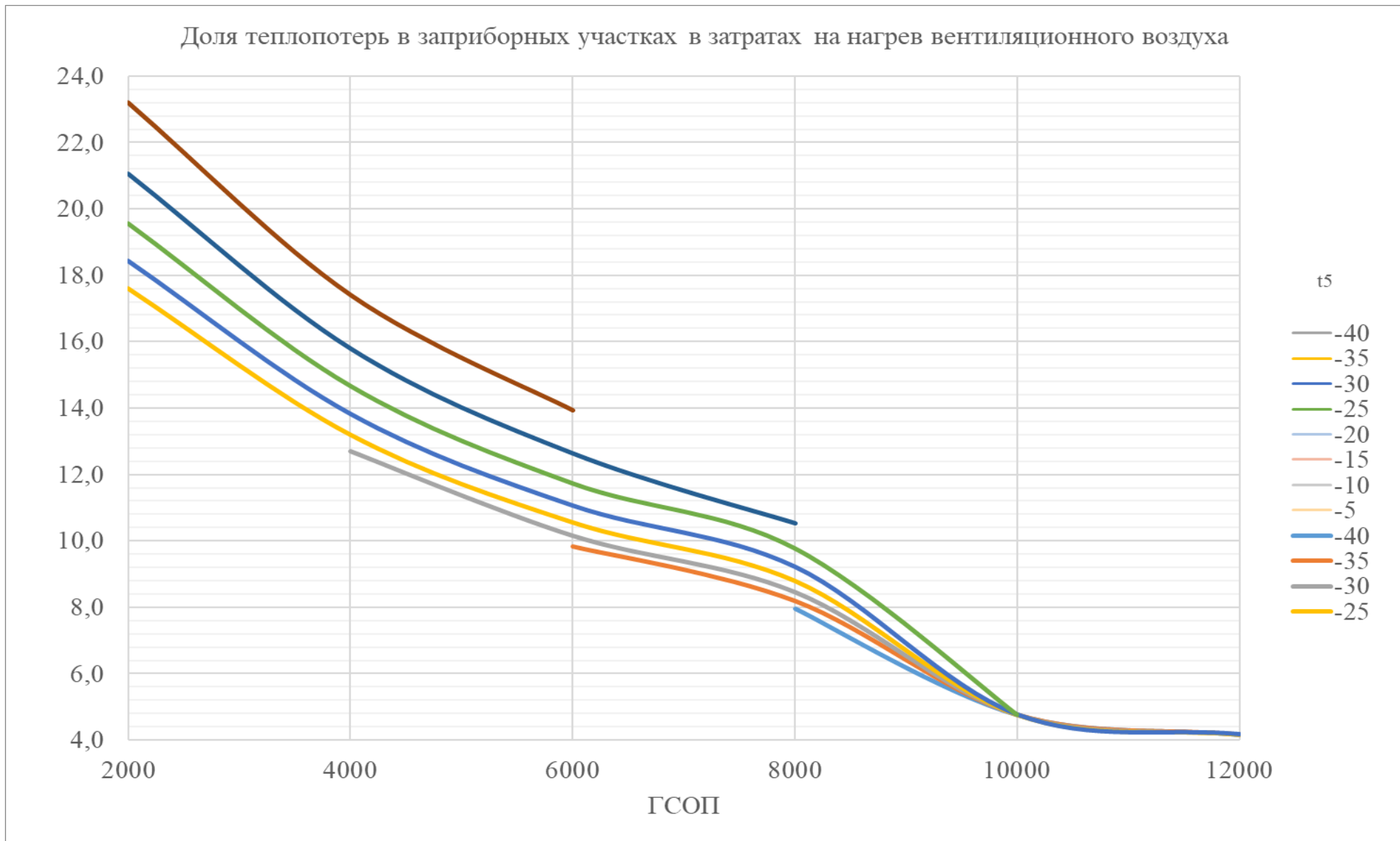


Рисунок 2.4 – Доля тепловпотерь в заприборных участках в затратах на нагрев вентиляционного воздуха в зависимости от ГСОП и температуры наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0, 92

Расчёт показывает, что применение предлагаемой технологии в тёплых регионах более целесообразно, чем в северных.

Теперь в рамках выявления целесообразности применения реверсивной вентиляции рассмотрим вынужденную конвекцию, наблюдаемую в щели за отопительным прибором при попадании за неё воздуха. Будем считать, что со всех сторон, кроме верхней щель закрыта, то есть воздух поступает через вставку горизонтально и выходит вверх, обмениваясь теплотой с радиатором. Разобьём щель на 100 небольших отрезков, высотой 0,006 м и составим балансовое уравнение по потокам энтальпии воздуха. Конечно-элементная сетка с граничными условиями приведена на рисунке 2.5.

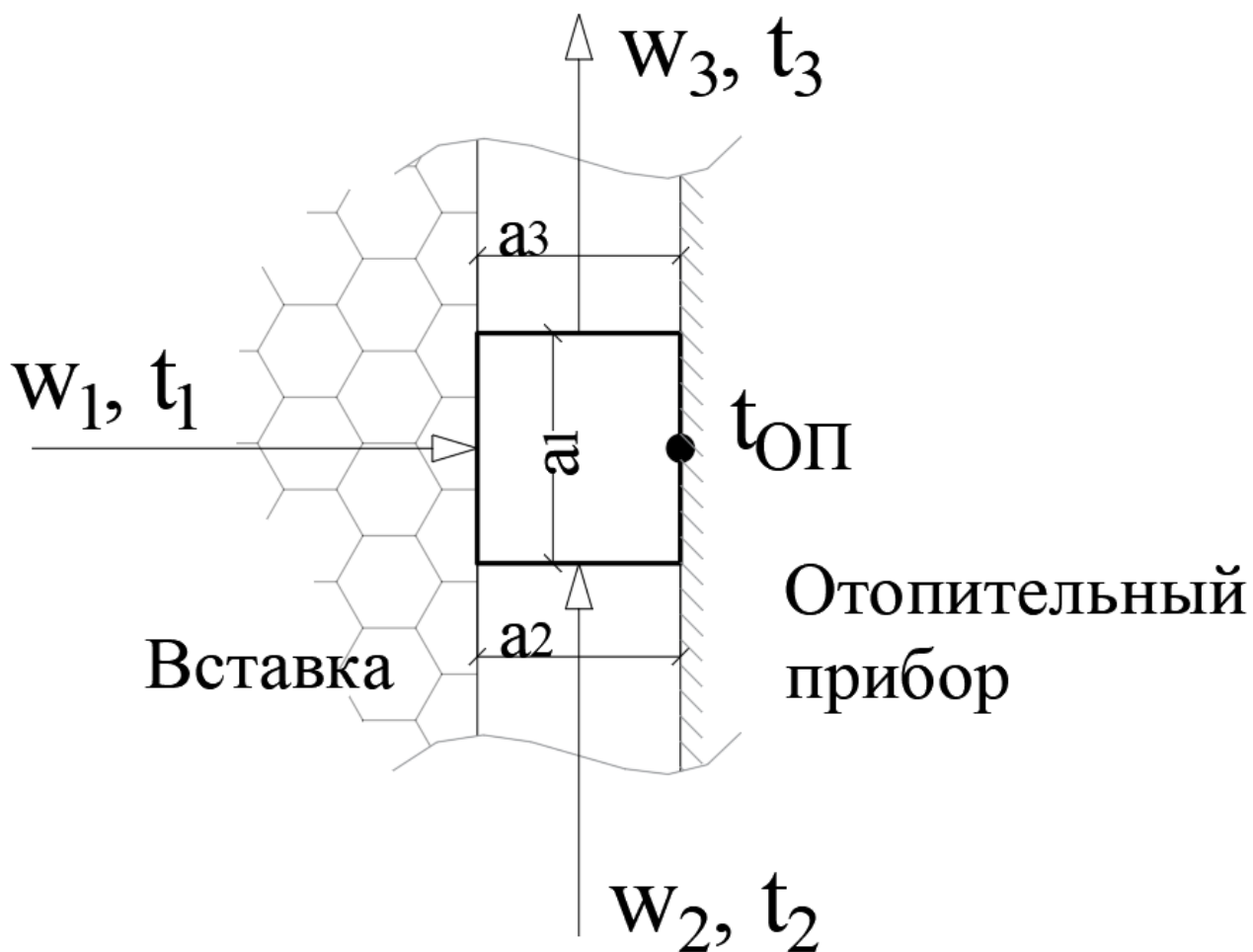


Рисунок 2.5 – Конечно-элементная сетка между отопительным прибором и вставкой и схема потоков энтальпии для составления балансового уравнения

В нижней ячейке воздух, заходящий через вставку, подогревается, проходя вблизи отопительного прибора, и заходит в следующую ячейку. В ней он смешивается с воздухом, подведённым слева, а интенсивность конвекции

рассчитывается по осреднённой скорости. Под средней температурой подразумевается температура потока, наблюдаемая в результате смешивания, но до прохождения нагревания от прибора (это может быть полезно при изучении файла с расчётами). Теплообмен на поверхности прибора рассматривается как вынужденная конвекция на вертикальной пластине. Используется критериальное уравнение

$$Nu = 0,037 Re^{0,8} Pr_{ж}^{0,43} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} .$$

Предлагаемая модель учитывает зависимость параметров воздуха от температуры. Температура поверхности прибора считалась постоянной по высоте и принималась 50, 60 или 70°C. Расчётом вычислялась температура на выходе из каждой ячейки и на последней из них, таким образом, вычислялась температура приточного воздуха. Результаты представлены в таблице 2.1 и на рисунке 2.6.

Таблица 2.1

Приращение температуры воздуха от нижней точки щели до выхода в помещение

t поверхности прибора		70	60	50
t1	5	4,98	4,21	3,45
	7	4,81	4,05	3,28
	10	4,56	3,80	3,04
	12	4,39	3,63	2,87
	12,5	4,35	3,59	2,83

Затемнены ячейки, в которых результаты удовлетворяют требованию к температуре притока (16°C). Рисунок 2.6 показывает качественное распределение температуры по высоте, тогда как таблица 2.1 даёт только связь между перепадом температуры на входе и выходе от температуры поверхности прибора и температуры выхода воздуха из вставки в щель (она также считается неизменной по высоте).



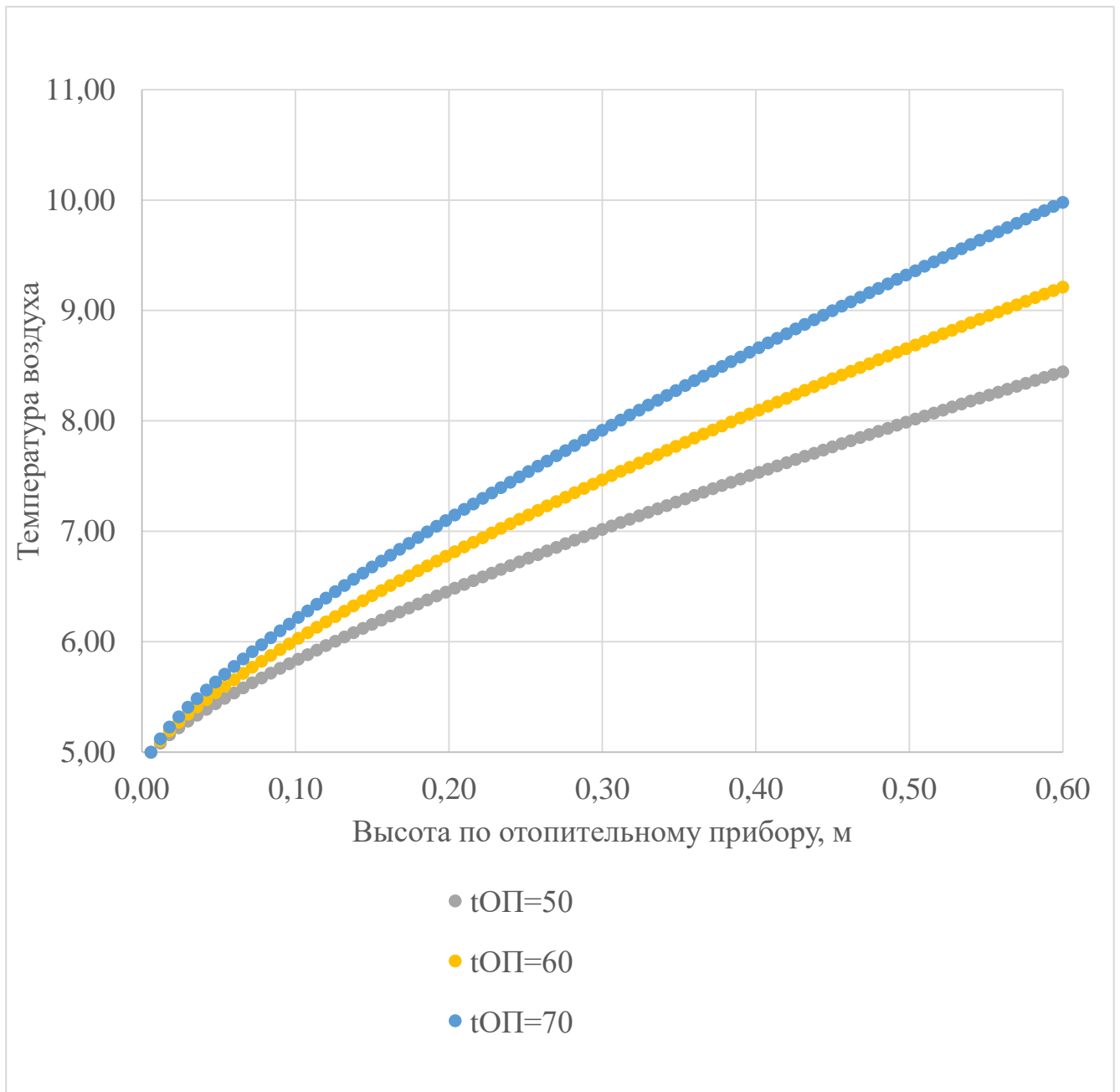


Рисунок 2.6 – Распределение температуры воздуха в щели за отопительным прибором в зависимости от высоты

Этот расчёт показывает, что температура воздуха, выходящего из вставки должна быть не менее 12 градусов. Это температурой и надо задаваться при выборе параметров вставки. В случае, когда используются другие отопительные приборы, можно повторить расчёт для них. Также можно более достоверно замоделировать саму задачу вынужденной конвекции, учитывая, например, пульсации скорости, подмешивание воздуха помещения в поток приточного воздуха и другие нюансы.

Исследование воздушного режима невозможно без использования расчетных моделей. Общие положения, принимаемые при моделировании приведены ниже.

Формирование воздушных балансов по притоку и удалению воздуха определяется решением следующих уравнений [31]:

1. Уравнения, определяющего количество входящих или выходящих воздушных потоков для любого  $i$ -го участка рассматриваемого узла

$$G_{ix} = \operatorname{sgn}(p_i - p_x) \sqrt{\frac{|p_i - p_x|}{S_{ix}}}, \quad (2.1)$$

2. Уравнения узловых расходов для рассматриваемого узла схемы, составленного по закону сохранения массы

$$\sum_{i=1}^n G_i = 0. \quad (2.2)$$

Воздушный режим здания (ВРЗ) рассматривается как совокупность краевой и внутренней частей ВРЗ. При расчете ВРЗ определяются давления в каждом помещении и расходы инфильтрующегося, эксфильтрующегося и перетекающего между помещениями здания воздуха с учетом действия гибридной реверсивной вентиляции. Внутренняя часть воздушного режима здания рассматривается для помещений с пребыванием людей по однозонной модели. Значения параметров микроклимата берутся осредненными по объему и принимаются как исходные данные при расчете работы системы гибридной реверсивной вентиляции. Тепловой режим здания определяется температурным режимом в помещениях и зависит от параметров наружного воздуха, теплотехнических характеристик ограждений и наличия источников теплоты внутри здания, что связано с ВРЗ и работой системы вентиляции.

При моделировании воздушного режима здания принято составлять его аэродинамическую схему [27]. В схему включаются все элементы воздушного тракта здания: помещения, каналы систем вентиляции, дверные и оконные проемы и др. В отдельных случаях к таким элементам могут быть отнесены места стыка наружных ограждений и перегородок, а также сами стеновые конструкции.

Аэродинамическая схема здания представляется в виде графа и состоит из участков и узлов. К участкам относят элементы, представляющие сопротивление движущемуся воздушному потоку. Узловыми точками обозначаются воздушные объемы, в которых сходятся несколько участков сети. Принимается, что потери давления, при движении воздуха в узлах сети отсутствуют. Множество  $N$  узлов схемы содержит множество  $A$  граничных узлов и множество  $B$  внутренних узлов. При решении краевой и внутренней частей ВРЗ величины давления у граничных узлов являются заданными ( $P$ ), а у внутренних – неизвестными ( $X$ ). При нумерации узлов сначала перечисляются внутренние узлы, а затем граничные. Множество  $L$  ветвей (участков) схемы задаются координатами  $(i;j)$ , где  $i$  и  $j$  – номера узлов, которые ветвь соединяет. После составления аэродинамической схемы необходимо ее эквивалентировать. Для этого следует объединить соответственно последовательно и параллельно соединенные участки. Данная операция заметно снижает порядок системы уравнений (2.11). При составлении аэродинамической схемы необходимо учитывать, что значения расходов воздуха, проходящих через стыки стен значительно меньше расходов через приточные устройства и каналы системы вентиляции, поэтому в данной работе они игнорируются. Законы движения воздуха через строительные материалы и элементы строительных конструкций на сегодняшний день изучены не полностью. Доступные экспериментальные данные позволяют предполагать, что при движении воздуха в пористых материалах, трещинах и стыках, размеры проходных каналов которых малы, наблюдается ламинарная фильтрация

$$\Delta p = S_l G . \quad (2.3)$$

При относительно большом размере каналов имеет место турбулентный режим фильтрации и квадратичный закон сопротивлений

$$\Delta p = S_m G^2 . \quad (2.4)$$

В связи с тем, что в стенах реального здания одновременно присутствуют щели, поры и проемы разных размеров, то в них будет наблюдаться смешанный режим течения [24]

$$\Delta p = S_{cm} G^n, \quad (2.5)$$

или

$$\Delta p = S_l G + S_m G^2. \quad (2.6)$$

где  $S_l$  и  $S_m$  – характеристики участков (сопротивление участка по воздуху при перемещении единицы расхода). Характеристики различных типов сопротивлений определяются по справочникам. При параллельном соединении элементов с квадратичной зависимостью типа  $\Delta p = S_{cm} G^2$ , сначала определяется характеристика сопротивления  $S_m$  каждого отдельного элемента и затем рассчитывается эквивалентная характеристика  $S_{эkv}$

$$S_{эkv} = \frac{1}{\left( \sum \frac{1}{\sqrt{S_i}} \right)^2}. \quad (2.7)$$

При параллельном соединении элементов с двучленной зависимостью типа  $\Delta p = S_l G + S_m G^2$  или элементов, имеющих двучленную зависимость, с элементами, имеющими квадратичную зависимость, эквивалентные характеристики определяются графоаналитическим методом [51].

После определения характеристик сопротивления отдельных элементов можно записать уравнение расхода для участков вентиляционной системы [31]

$$G_{ij} = \operatorname{sgn}(p_i - x_j) \sqrt{\frac{|p_i - x_j|}{S_{ij}}} \text{ если } i \in A, j \in B, \quad (2.8)$$

$$G_{ij} = \operatorname{sgn}(x_i - x_j) \sqrt{\frac{|x_i - x_j|}{S_{ij}}} \text{ если } i \in B, j \in B, \quad (2.9)$$

$$G_{ij} = 0 \text{ если } (i, j) \notin L. \quad (2.10)$$

На основании первого закона Кирхгофа можно записать систему уравнений движения воздуха в здании [31]

$$\sum_{i \in A} \operatorname{sgn}(p_i - x_j) \sqrt{\frac{|p_i - x_j|}{S_{ij}}} + \sum_{i \in B} \operatorname{sgn}(x_i - x_j) \sqrt{\frac{|x_i - x_j|}{S_{ij}}} = 0, \quad (2.11)$$

$$j = 1, 2, \dots, n.$$

В соответствии с составленной аэродинамической схемой в данную систему добавляются уравнения, учитывающие ламинарную и смешанную фильтрацию в пористых вставках. Эти уравнения составляются аналогично приведенным выше и отличаются от них только степенью радикала. Более подробно данная задача описана в [28, 25].

### 2.3 Аэродинамический режим приточно-вытяжного устройства

Одним из элементов воздушной сети здания является приточно-вытяжная вставка из пористого материала. Полная постановка и решение задачи фильтрации воздуха через пористый материал проводится в 3 и 4 главах диссертации. Здесь приведен сокращенный расчет, с целью обоснования применения пористого материала, как наполнителя, который позволит обеспечить нормативный расход воздуха. В качестве расчетного инструмента, в данном случае, уместно использовать теорию фильтрации. В рамках механики сплошной среды фильтрация – это движение жидкости или газа по системе разветвленных каналов сложной геометрии. При таком подходе неважно под действием каких конкретно сил фильтрация происходит. В общем случае течение в пористых средах может быть вызвано перепадом давлений, действием внешних сил (сила тяжести, электромагнитные силы, силы инерции), капиллярными силами на межфазных границах и другими силами. Одной из трудностей при описании фильтрации является сложность структуры пористого массива. В большинстве практических примеров (в том числе при исследовании строительных материалов)

характерные размеры рассматриваемых задач значительно превышают характерный размер пор, что позволяет использовать осредненные характеристики течения. Модель пористой структуры выбирается в зависимости от типа материала. В случае капиллярного материала используется модель течения по круглым каналам, для волокнистого материала – модель обтекания пучка цилиндров, для зернистой среды – модель регулярной или случайной засыпки и другие. Движение флюида в порах подчиняется законам сохранения.

Закон сохранения массы для сжимаемой среды

$$\operatorname{div} \rho w = 0 \quad (2.12)$$

и называется также уравнением неразрывности сжимаемой среды.

Уравнение баланса импульса или закон Дарси для случая медленного стационарного течения в поле силы тяжести при несжимаемом флюиде и неподвижной изотропной пористой среде [36]

$$0 = -\operatorname{grad}(p) + \rho g - \frac{\mu}{k} w, \quad (2.13)$$

где  $k$  – коэффициент проницаемости пористой среды

В связи с тем, что разность давления по обе стороны вставки вносит в процесс фильтрации значительно больший вклад, чем сила земного притяжения, то уравнение баланса импульса может быть приведено к виду

$$w = -\frac{k}{\mu} \operatorname{grad}(p). \quad (2.14)$$

Это выражение – также частный случай уравнения Навье – Стокса при допущении, что инерционные силы много меньше вязких сил, то есть числа Рейнольдса малы ( $Re \ll 1$ ).

Коэффициент проницаемости  $k$ , входящий в уравнение баланса импульса, зависит исключительно от свойств пористого массива и имеет размерность

площади. Для этого коэффициента предложено несколько приближенных формул, основанных на разных моделях внутриворонного пространства [101, 87]. Часто для оценки этого коэффициента используется формула Козени-Кармана:

$$k \sim \frac{d^2 \varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2}. \quad (2.15)$$

Стоит отметить, что коэффициент проницаемости может меняться при деформации или засорении пористого скелета.

Закон Дарси имеет ограниченную область применения, поэтому при нестационарном расчете течения в пористых средах необходимо следить за изменением величины  $Re$ . На основании экспериментальных данных, полученных в [6], отклонения от закона Дарси начинаются при  $Re > 1$ . В этом случае инерцией движущихся частиц газа пренебрегать нельзя и следует использовать выражение с квадратичной зависимостью сопротивления от скорости [36]

$$0 = -grad(p) - \frac{\mu}{k} w - \beta \frac{\rho w^2}{\sqrt{k}}. \quad (2.16)$$

В литературе это выражение встречается под названием «закон фильтрации Форхгеймера» или просто «двучленный закон фильтрации».

Для того чтобы оценить возможность применения пористых материалов в качестве наполнения для приточно-вытяжных устройств, линеаризуем уравнение (2.14) и приведем его к виду

$$L = \frac{\Delta p A k}{l \mu}, \quad (2.17)$$

где  $L$  – объемный расход воздуха ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) через вставку площадью  $A(\text{м}^2)$  и толщиной  $l$  ( $\text{м}$ ). На основании экспериментальных данных, полученных в [26] принят коэффициент проницаемости  $k = 2 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ . Остальные значения выбраны следующими:  $\Delta p = 10,27 \text{ Па}$ ,  $A = 0,6 \text{ м}^2$ ,  $l = 0,1 \text{ м}$ ,  $\mu = 1,71 \cdot 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ . При данных значениях величина  $L$  составляет  $25 \text{ м}^3/\text{ч}$ , что соответствует порядку величины нормативного притока через приточно-вытяжное устройство, и подтверждает

возможность применения пористого материала (в данном случае минеральной ваты) в качестве наполнителя. С другой стороны, материалы, подобные минеральной вате по характеристикам пористости имеют значительные недостатки. Их проницаемость сильно зависит от влажности что затрудняет, а иногда и блокирует движение воздуха. Также материалы с относительно мелкими порами подвержены разрушению при выпадении конденсата с его последующим замерзанием. Основной причиной такой уязвимости является малая величина пор. Рассматривая материалы с более крупными порами можно заметить, что их проницаемость значительно выше. При достаточно больших расходах воздуха через материал его увлажнения можно избежать благодаря осушающему действию фильтрации, а значит, увеличение диаметра пор способствует снижению риска выпадения конденсата. При изучении гидравлических режимов современных строительных материалов автором было замечено, что в рассматриваемом контексте подходящими, по перечисленным характеристикам, являются зернистые среды. Однако достаточной информации в опубликованной литературе не нашлось, поэтому определить пригодность засыпок для заполнения воздухопроницаемого элемента предстоит определить дальнейшими экспериментальными и теоретическими исследованиями.

## **2.4 Тепловой режим помещения при работе системы гибридной реверсивной вентиляции**

Тепловой режим помещения с системой реверсивной гибридной вентиляции определяется балансом теплоступлений и тепловых потерь помещения, изменяющихся в течение года. Слагаемые уравнения теплового баланса для различных периодов года неодинаковы. Для теплого периода балансовое уравнение будет иметь вид [28]

$$\sum Q = Q_R + Q_{\text{б}} - Q_{\text{вент}}, \quad (2.18)$$

где  $Q_R$  – теплоступления в результате действия солнечной радиации, Вт  
 $Q_{\text{б}}$  – бытовые теплоступления, Вт



$Q_{\text{вент}}$  – теплопритоки (теплопотери) в результате действия системы вентиляции, Вт.

Под теплопоступлениями от солнечной радиации подразумевается сумма тепловых потоков, вызванных действием прямой и рассеянной солнечной радиации на светопрозрачные конструкции, а также лучистым теплообменом на внутренних поверхностях помещения и лучисто-конвективным потоком от нагретой поверхности окон. Теплопоступления от солнечной радиации считаются равномерно распределенными по всем поверхностям помещения. Радиационные теплопоступления могут моделироваться по общепринятой методике. К бытовым теплопоступлениям относятся тепловые потоки, вызванные повышенной температурой офисного оборудования, а также тепловыделения от людей, работающих в помещении. Теплопоступления от искусственного освещения учитываются только в холодный период. Перечисленные величины всегда положительны для административных зданий, но ввиду необходимости ассимиляции теплоизбытков, приточный воздух непрерывно охлаждается ниже температуры воздуха помещения, вследствие этого последнее слагаемое имеет отрицательное значение.

В холодный период уравнение теплового баланса выглядит иначе [28]:

$$\sum Q = Q_{co} + Q_{\sigma} - Q_{\text{вент}} - Q_{mn} + Q_{осв}, \quad (2.19)$$

$Q_{mn}$  – трансмиссионный тепловой поток, Вт

$Q_{co}$  – мощность системы отопления, Вт

$Q_{осв}$  – теплопоступления от искусственного освещения, Вт.

В холодный период помещение дополнительно обогревается системой отопления, что добавляет в уравнение новое положительное слагаемое. Приточный воздух нуждается в подогреве, поэтому вентиляционная составляющая отрицательна. Мощность системы отопления зависит от температуры наружного воздуха и определяется по графику качественного

регулирования отпуска теплоты. Теплопоступления от людей, оборудования и освещения рассчитываются по общепринятой методике. Количество людей и светильников рассчитывается исходя из нормы площади помещения на одного человека и нормы освещенности. Тепловыделения оргтехники принимаются по удельной площади помещения. Модель теплового режима подробно описана в главе 4 настоящей работы.

## **2.5 Алгоритм совместной работы воздушного и теплового режимов помещения с системой гибридной реверсивной вентиляции**

Для определения параметров воздушной среды каждого помещения необходимо совместно решить задачи воздушного и теплового режимов. После задания краевых и начальных условий рассчитываются все тепловые и воздушные потоки в каждом помещении. Далее по уравнениям (2.18) или (2.19) определяется величина теплового баланса в начальный момент времени. Здесь же выбирается временной шаг, который можно изменять при необходимости. Считается, что балансовое значение теплоты полностью расходуется на нагревание или охлаждение воздуха помещения, в связи с чем изменяется его температура. Изменение температуры определяется по уравнению теплового баланса воздуха с использованием значений объема помещения и теплоемкости воздуха. Изменение величины внутренней температуры влечет изменение располагаемого давления, которые пересчитываются в конце каждого шага цикла прогонки программы. Используя характеристики сопротивления, аэродинамическую схему и вычисленную величину располагаемого давления, рассчитывается расход воздуха в следующий момент времени во всех элементах сети. Рассчитанные теплопоступления и воздухообмены проверяются на наличие избытка, чем исключается перегрев, переохлаждение или недостаточный (избыточный) воздухообмен в помещениях. Начальное время расчета предпочтительно установить в тот момент, когда система находится в устойчивом квазистационарном состоянии. Для административных зданий это время начала рабочего дня после выходных. Этому моменту соответствуют установившиеся

тепловые и воздушные потоки. Временной шаг программы необходимо выбирать так, чтобы рассчитываемые значения сходились в допустимой погрешности в конце каждого расчетного цикла.

### **Выводы по главе 2:**

1. Выполнена постановка задачи исследования. Описаны режимы работы системы гибридной реверсивной вентиляции и условия их смены.
2. Изучены теоретические предпосылки к формированию фильтрационных течений в пористом засыпном материале. Выполнен расчет воздухообмена, формирующегося при среднем значении располагаемого давления, чем подтверждена возможность использования пористого материала в качестве заполнения воздухопроницаемых элементов.
3. Приведена математическая формулировка ВТРЗ при работе системы гибридной реверсивной вентиляции, а также порядок определения неизвестных при решении нестационарной задачи.

### Глава 3

#### Экспериментальное исследование воздухопроницаемости шаровых засыпок

Экспериментальное исследование проводится с целью определения коэффициентов фильтрации, которые будут применяться далее при решении сопряженной задачи тепломассообмена в засыпках, а также для валидации математической модели фильтрации, предлагаемой комплексом ANSYS CFX.

#### 3.1 Подготовка к проведению эксперимента и средства испытания

Экспериментальное исследование коэффициентов воздухопроницаемости и сопротивления воздухопроницанию проводится в соответствии с [129, 130]. Сущность метода заключается в измерении расхода воздуха  $G$  через образец материала, при последовательном создании заданных стационарных перепадов давления воздуха. По результатам измерений вычисляется коэффициент воздухопроницаемости материала  $i$  и сопротивление воздухопроницанию образца материала  $R_u$ , входящие в уравнения фильтрации воздуха (3.1) и (3.2) соответственно

$$G = i \frac{(\Delta p)^n}{\delta}, \quad (3.1)$$

$$G = i \frac{(\Delta p)^n}{R_u}, \quad (3.2)$$

где  $G$  – плотность потока воздуха, кг/(м<sup>2</sup>·ч)

$i$  – коэффициент воздухопроницаемости материала, кг/[м<sup>2</sup>·ч·(Па)]

$\Delta p$  – перепад давления, Па

$\delta$  – толщина образца, м

$R_u$  – сопротивление воздухопроницанию, [м<sup>2</sup>·ч·(Па)]/кг.

Измерения выполняются для образцов с минимальной толщиной  $\delta_{min}=100$  мм, максимальной толщиной  $\delta_{max}=400$  мм и шагом толщины 50 мм. Размеры лицевых сторон образцов 210x210 мм. Температура и относительная влажность воздуха в помещении, в котором проводились испытания составили 23 °С и 55 %

соответственно. Испытательная установка собиралась автором по схеме, предложенной Р. Е. Брилингом в [7]. Схема испытательной установки приведена на рисунке 3.1.

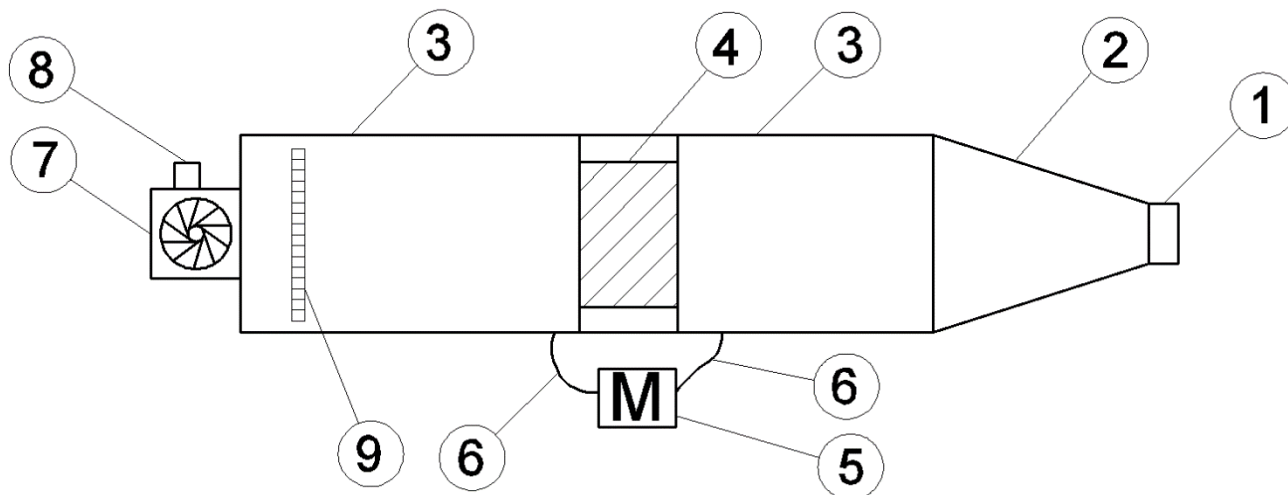


Рисунок 3.1– Схема испытательной установки для определения воздухопроницаемости материалов. 1– измерительный патрубок, 2 – диффузор, 3 – камеры статического давления, 4 – испытуемый образец, 5 – манометр, 6 – силиконовые шланги, 7 – вентилятор, 8 – блок регулировки вентилятора, 9 – регулировочное окно

Основное отличие данной установки в том, что она собрана не на «приток», а на «вытяжку». Фильтрация воздуха вызывается перепадом давлений, создающимся на образце, как и в «классической» схеме. Отличие лишь в том, что источник тяги искусственно создает разрежение за образцом, вместо нагнетания воздуха перед ним. Такая схема работы не вызывает ярко выраженных вихрей в первой (по ходу движения воздуха) статической камере, что способствует созданию более равномерного поля скоростей перед образцом. Для создания перепада давлений используется радиальный вентилятор (батарея параллельно работающих вентиляторов) с блоком регулировки. Для создания малых перепадов давления диапазона регулировочного блока может не хватать, поэтому в установку было добавлено регулировочное окно. Перепад давлений определяется микроманометром ММН-240. Расход воздуха вычисляется по скорости движения

воздуха в приточном патрубке установки при помощи анемометра КИМО VT 200 (рисунок 3.3). Особая конструкция кассеты с образцом позволяет выполнять измерения расходов воздуха через засыпки с любым шагом толщины. Схема кассеты приведена на рисунке 3.2. Сама установка представляет собой воздуховод с размерами сечения 250x250 мм. Одна сторона воздуховода закрывается сеткой и остается статичной весь эксперимент, а через открытую сторону выполняется засыпка исследуемого материала. После засыпания материала проводится измерение толщины сформировавшегося слоя. Получившийся образец фиксируется в воздуховоде подвижной прижимной решеткой, а стыки соединений герметизируются. Размеры живого сечения сеток составляют 210x210 мм. Периметр засыпки прокладывается изнутри жестким материалом толщиной 20 мм, благодаря чему площадь засыпки совпадает с площадью ограничивающих ее сеток и исключается расширение области фильтрации. Фотография испытательной установки приведена на рисунке 3.4.

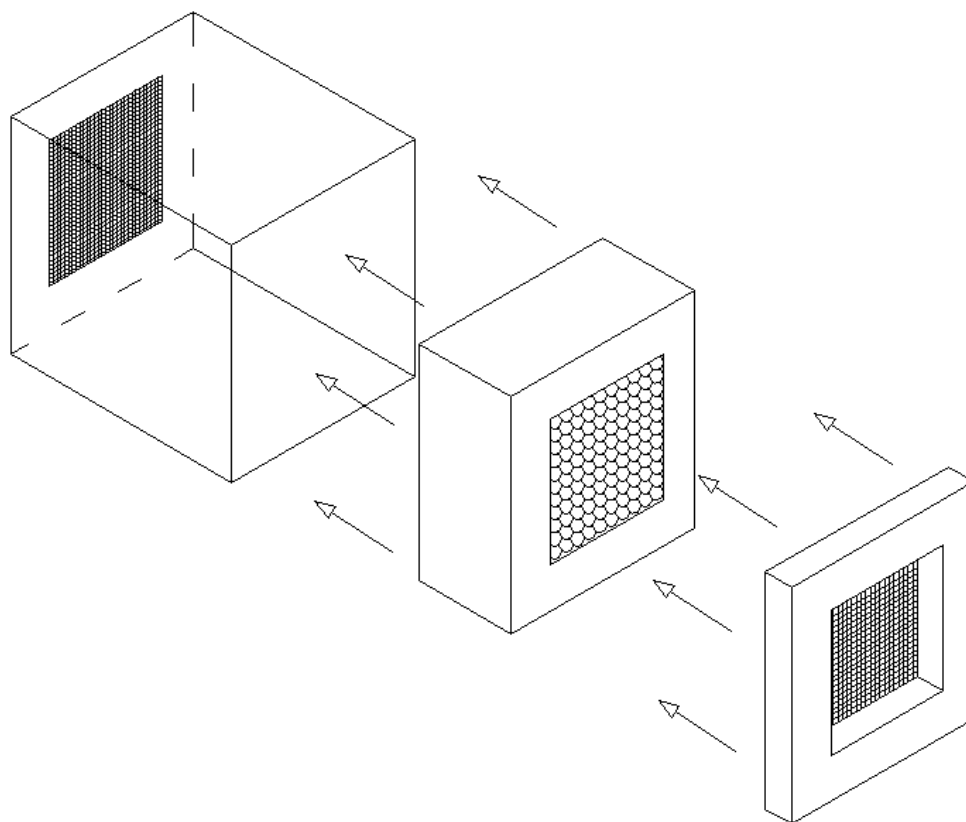


Рисунок 3.2 – Схема сборки кассеты с образцом



Рисунок 3.3 – Анемометр, использованный при проведении эксперимента

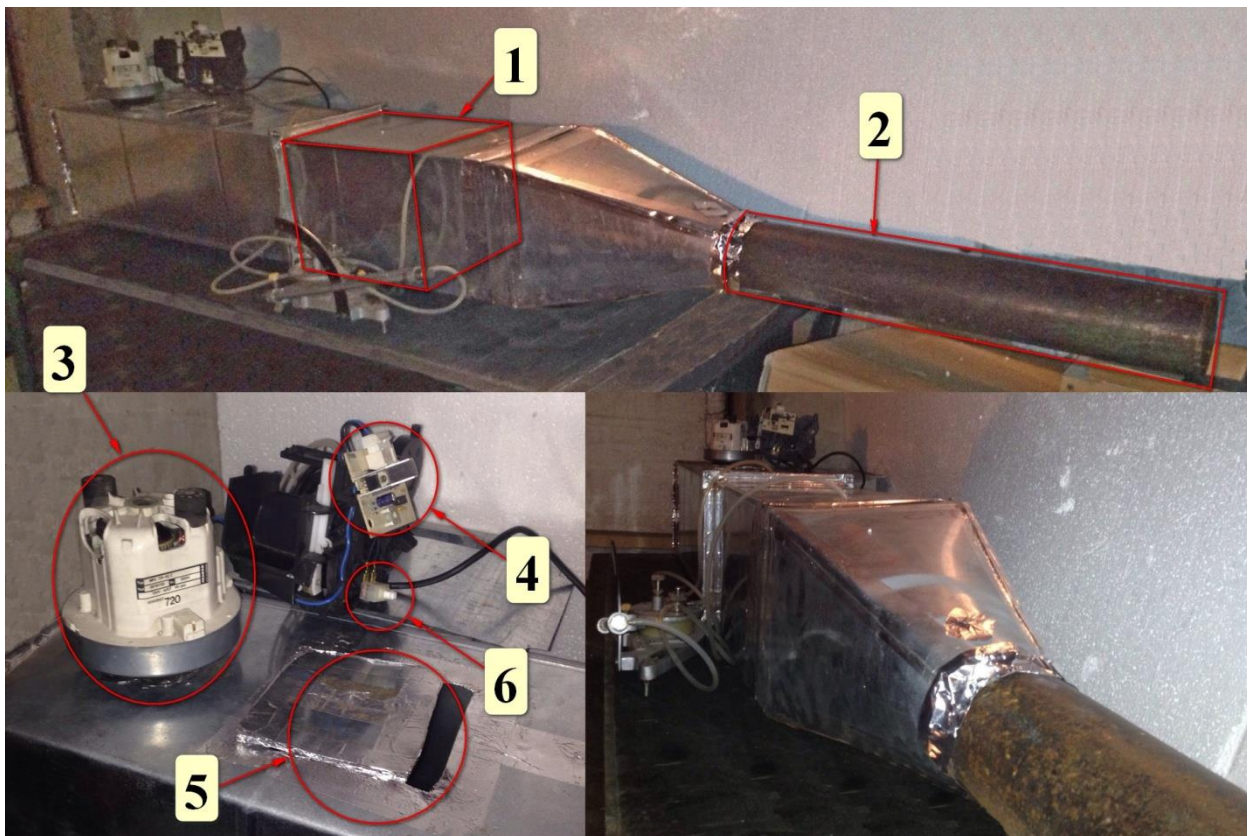


Рисунок 3.4 – Испытательная установка. 1 – место расположения образца, 2 – измерительный патрубок, 3 – вентилятор, 4 – блок регулировки, 5 – регулировочное окно, 6 – кнопка включения/выключения

В качестве фильтруемой среды выбран керамзит. Исходный материал был разделен на фракции по средним размерам зерна. Первый этап эксперимента проводился для засыпки со средним размером зерна 17 мм. На втором этапе средний размер зерна принимался равным 26 мм. На третьем этапе засыпка формировалась смешением 1 первого и второго образцов в равных пропорциях по объемам. Средний размер зерна составил 21,5 мм. Ввиду отклонений формы гранул керамзита от сферической, средний диаметр определялся выбором среднего по объему зерна с дальнейшим его вычислением и расчетом диаметра эквивалентной сферы, который впоследствии и принимался за средний диаметр гранул засыпки.

### **3.2 Проведение испытания и обработка результатов**

После сортировки и засыпки исследуемого материала установка приводится в рабочее положение. Выполняется сборка всех частей в соответствии со схемой экспериментальной установки. Проводится настройка измерительных приборов, выполняется проверка установки. При этом исключается деформация образца и возникновение зазоров между стенками статической камеры и засыпкой, а также проникновение воздуха через неплотности между прижимной рамкой, образцом и камерой. При необходимости проводится герметизация торцевых граней образца и стыковых соединений шлангов. Концы шлангов микроманометра располагаются в измерительных отверстиях на одном уровне по горизонтали по обе стороны испытуемого образца. После запуска воздушного насоса создаются (согласно программе испытаний) перепады давления по обе стороны образца. После регулировки перепада давления до необходимого значения выдерживается некоторое время (не менее 60 секунд), которое необходимо для стабилизации потока воздуха. При отсутствии возможности достаточно стабилизировать поток, оцениваются отклонения значения перепада давления от запланированного. Полученное значение указывается в таблице результатов испытаний. Далее в измерительном патрубке проводится замер скорости и расхода воздуха. Данные о перепаде давления и соответствующего ему объемного расхода воздуха заносятся в таблицу результатов испытания.



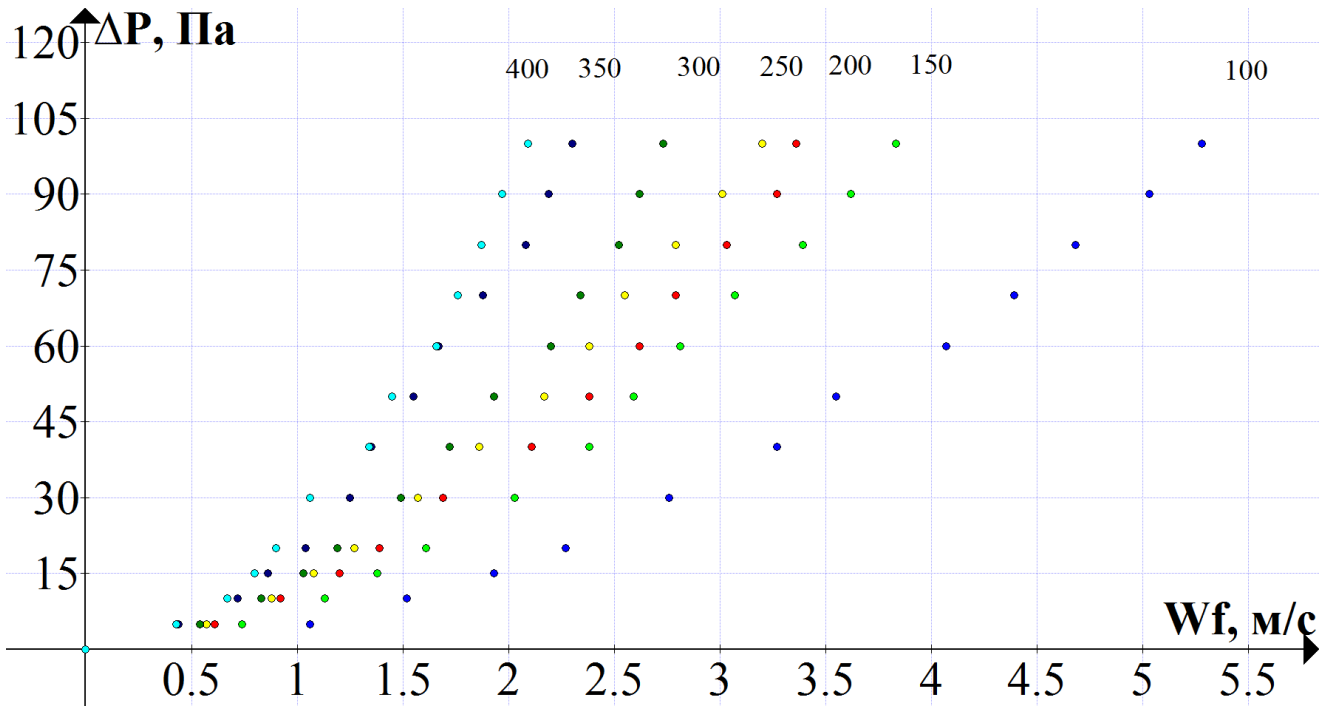


Рисунок 3.5 – Результаты эксперимента для образцов со средним диаметром зерна  
17 мм

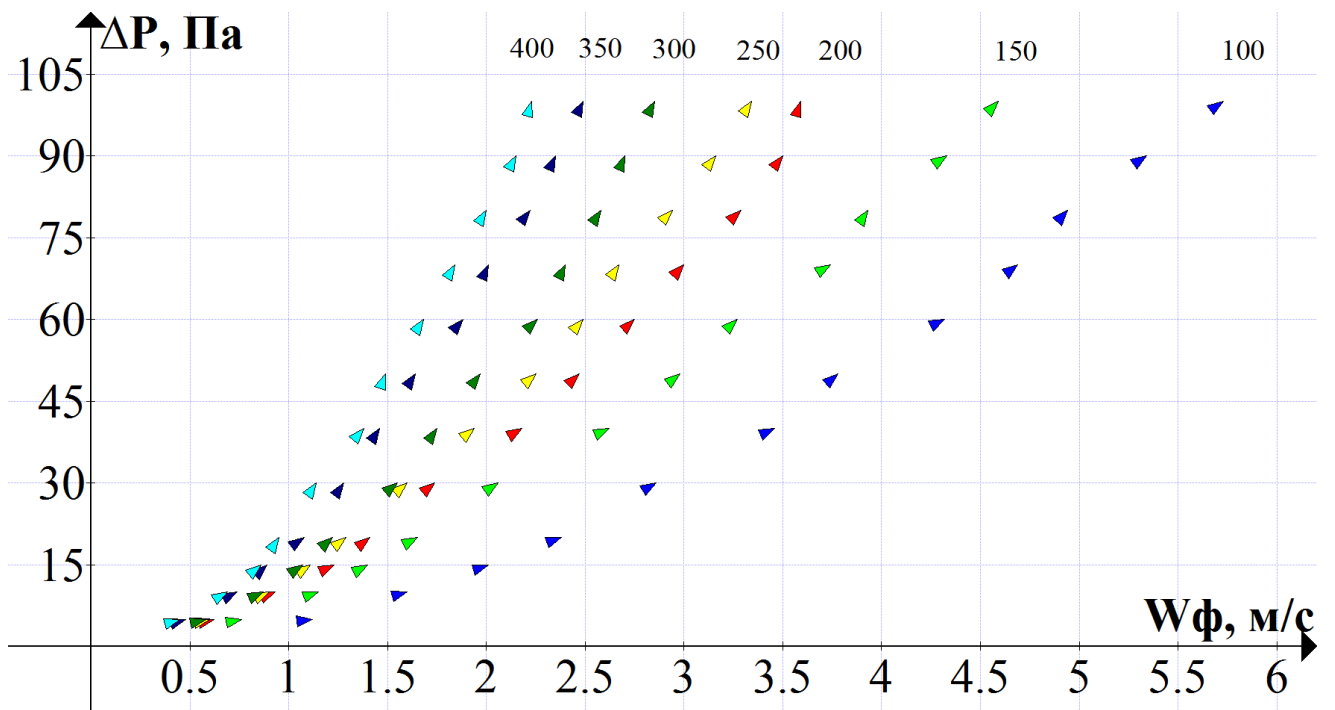


Рисунок 3.6 – Результаты эксперимента для образцов со средним диаметром зерна  
21.5 мм

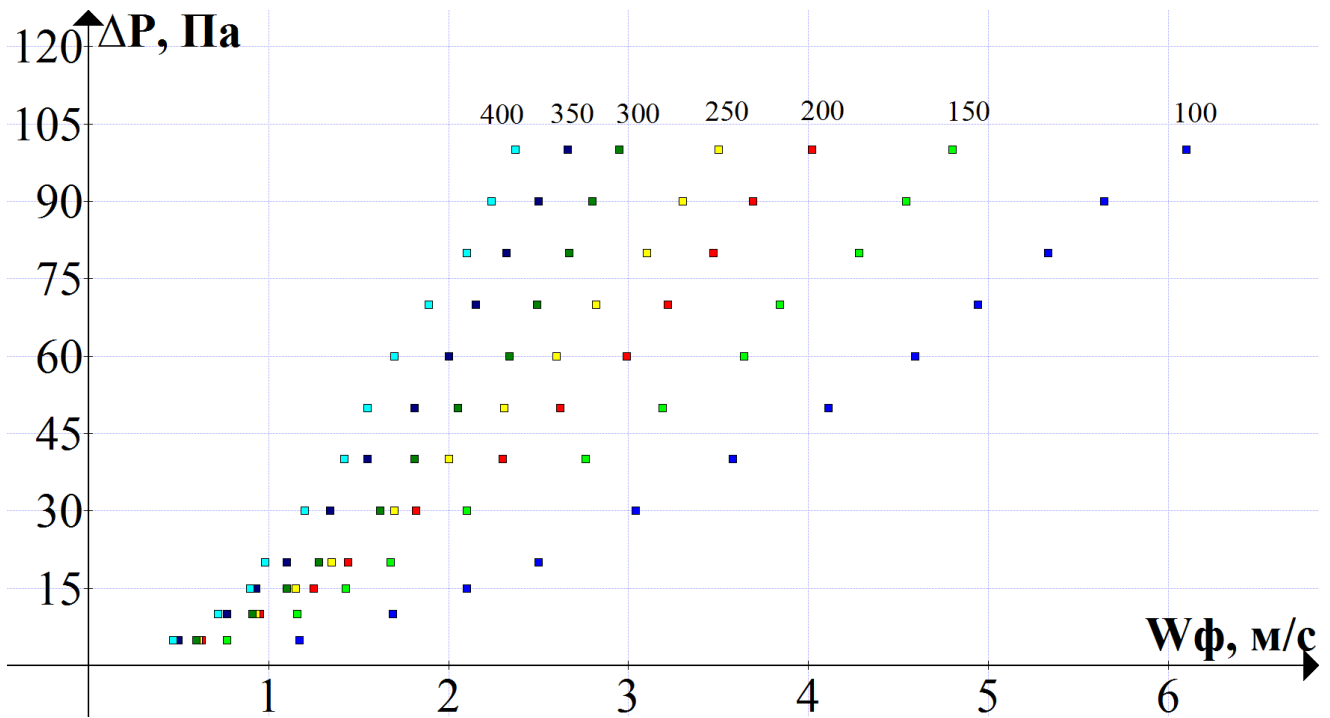


Рисунок 3.7 – Результаты эксперимента для образцов со средним диаметром зерна 26 мм

После достижения заданного программой испытаний значения наибольшего перепада давления эксперимент продолжается с использованием тех же ступеней давления, но в обратном порядке. За результат испытания при каждом перепаде давления принимается наибольшее значение расхода воздуха для каждой ступени независимо от того, было оно получено при нарастании давления или при его убывании. Результаты замеров представлены на рисунках 3.5-3.7.

Графики построены в осях, не совпадающих с измеренными величинами. По оси абсцисс указана скорость движения воздуха в порах засыпки, то есть

$$w_f = \frac{w}{\varepsilon}, \quad (3.3)$$

где  $w$  – скорость без учета пористости, м/с

$\varepsilon$  – пористость или просветность образца.

Полученные точки аппроксимированы зависимостью вида

$$\Delta p = aw_f + bw_f^2. \quad (3.4)$$

В соответствии с графиками для каждой засыпки определялись коэффициенты при слагаемых в уравнении фильтрации, которые впоследствии использовались при физико-математическом моделировании течения воздуха через засыпки. Уравнение движения воздуха через засыпку имеет вид

$$\frac{dp}{dx} = C_{R1}w_f + C_{R2}w_f^2. \quad (3.5)$$

Перейдя к конечным разностям получим данное уравнение в алгебраическом виде

$$\frac{\Delta p}{\Delta x} = C_{R1}w_f + C_{R2}w_f^2. \quad (3.6)$$

Отсюда

$$\Delta p = \Delta x C_{R1}w_f + \Delta x C_{R2}w_f^2. \quad (3.7)$$

Объединяя уравнения 3.4 и 3.7 получим

$$C_{R1} = \frac{a}{\Delta x}; C_{R2} = \frac{b}{\Delta x}. \quad (3.8)$$

Определялось два коэффициента фильтрации: при линейном ( $C_{R1}$ ) и квадратичном ( $C_{R2}$ ) членах. Расчеты проводились для трех засыпок, отличающихся средним диаметром частиц: мелкозернистой ( $\varnothing_{cp}=17$  мм,  $\varnothing_{мин}=15$  мм), крупнозернистой ( $\varnothing_{cp}=26$  мм,  $\varnothing_{мин}=23$  мм), и смеси из двух указанных фракций ( $\varnothing_{cp}=21,5$  мм,  $\varnothing_{мин}=15$  мм). Результаты расчетов представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

$\delta, \text{ м}$	Мелкозернистая		Смесь		Зернистая	
	$C_{R1}$	$C_{R2}$	$C_{R1}$	$C_{R2}$	$C_{R1}$	$C_{R2}$
0,1	1,77	3,24	2,46	2,68	2,50	2,34
0,15	2,81	6,18	6,79	3,30	6,45	2,94
0,2	3,66	7,52	5,60	5,91	7,1	4,53
0,25	5,99	8,03	6,52	7,06	6,64	6,30
0,3	1,43	12,43	1,85	11,51	1,49	10,83
0,35	4,46	17,02	5,49	14,07	5,55	12,26
0,4	1,86	21,86	4,79	17,82	6,42	15,41

Аппроксимированные двумерным кубическим сплайном графики зависимостей между толщиной образца, размером зерна и коэффициентами фильтрации представлены в приложении А. Эти зависимости предварительные, так как для комплексной оценки взаимовлияния перечисленных параметров необходимо проводить экспериментальное исследование со значительно бóльшим количеством образцов.

### 3.3 Моделирование фильтрационного массопереноса в пористой среде

На этом этапе необходимо определить насколько успешно экспериментальные данные, полученные при испытании засыпок на воздухопроницаемость, могут описываться математической моделью фильтрации, предложенной комплексом ANSYS CFX. Уравнение фильтрации можно представить в виде

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{k} w_{fx} + K_{loss} \frac{\rho}{2} w_{fx}^2, \quad (3.9)$$

$k$  – проницаемость пористой среды,  $\text{м}^2$

$K_{loss}$  – коэффициент квадратичных (инерционных) потерь,  $\text{м}^{-1}$

На данный момент не существует аналитических методов для точного определения коэффициентов сопротивления и некоторых величин, входящих в их состав (например проницаемость пористой среды в разных случаях может определяться по разным выражениям). Так как в рамках программного пакета ANSYS CFX версии 14.5 не конкретизируется, что именно подразумевается под

проницаемостью, коэффициентом квадратичных потерь и коэффициентами фильтрации, то можно выражать их по разным известным законам. В частности можно рассмотреть уравнение Эргуна, применимое к засыпкам. Для него

$$C_{R1} = \frac{\mu}{k}, \quad (3.10)$$

$$k = \frac{d^2 \varepsilon^3}{150 \mu (1 - \varepsilon)^2}, \quad (3.11)$$

$$C_{R2} = \frac{1,75 \rho (1 - \varepsilon)}{d \varepsilon^3}. \quad (3.12)$$

Применимо также

$$C_{R2} = \frac{0,55 \rho}{k^{0,5}}. \quad (3.13)$$

Для получения наиболее подходящих значений проницаемости  $k$  пористого материала были рассмотрены эмпирические зависимости, полученные другими учеными

$$k_{Kozeny-Carman} = \frac{\varepsilon^3}{180(1 - \varepsilon)^2} d^2, \quad (3.14)$$

$$k_{Rumpf-Gupte} = \frac{\varepsilon^{5,5}}{5,6} d^2 \text{ (наилучшая сходимость при } 0,35 < \varepsilon < 0,67 \text{)}, \quad (3.15)$$

$$k_{Kaviany-Sahraoui} = 0,0606 \frac{\pi}{4} \frac{\varepsilon^{5,1}}{(1 - \varepsilon)} \text{ (справедливо при } 0,4 < \varepsilon < 0,8 \text{)}. \quad (3.16)$$

При подстановке значений проницаемости, вычисленных по этим зависимостям при экспериментально определенных характеристиках засыпки (пористости, среднего диаметра пор) в уравнение (3.9) сходимость результатов моделирования с экспериментом получена не была. Отсутствие сходимости результатов объясняется следующим образом: ввиду того, что проницаемость – это характеристика пористой среды, которая зависит от набора других ее параметров (пористости, извилистости, среднего и минимального диаметра пор, распределения пор по размерам, площади поверхности пор, кривых капиллярного давления и других), уникальное выражение для аналитического определения этой

величины вывести затруднительно. По этой причине большинство исследователей искали эмпирические закономерности, которые имеют некоторую ограниченную область применения. Выражения 3.14–3.16 получены корреляцией экспериментальных данных, наиболее близких к проводимому эксперименту. Наилучшую сходимость с результатами эксперимента, проведенного в рамках диссертации, показала формула, полученная Кавиани при испытании фильтрации через шаровую засыпку с диаметром зерна до 3 мм [95]. Очевидно, что результаты, полученные в том эксперименте, могут быть малоприспособлены для текущей ситуации. Тем не менее, было замечено, что точки, определенные опытным путем, хорошо аппроксимируются кривой, имеющей вид уравнения фильтрации. Данным расчетом валидируется модель фильтрации, предлагаемая расчетным комплексом ANSYS CFX 14.5 для случая зернистых сред. Результаты моделирования по экспериментально определенным коэффициентам представлены на рисунках 3.8–3.10.

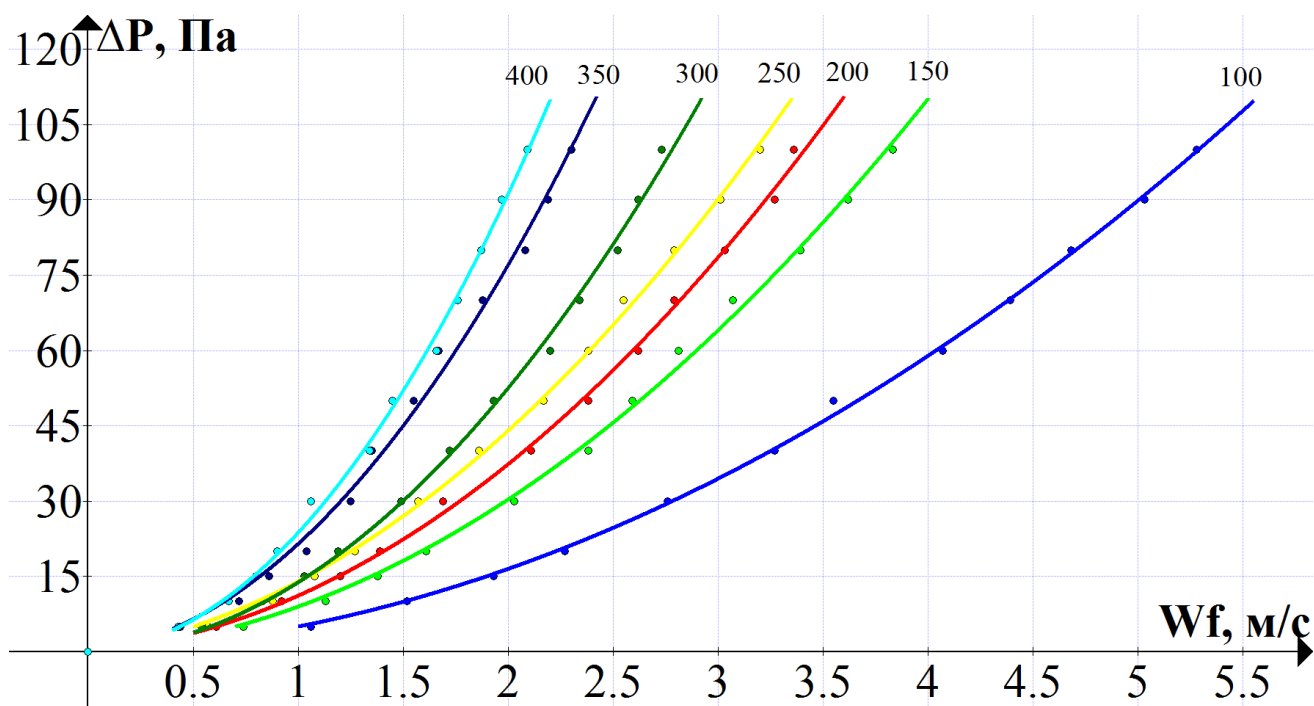


Рисунок 3.8 – Сравнение результатов эксперимента и моделирования для образцов со средним диаметром зерна 17 мкм

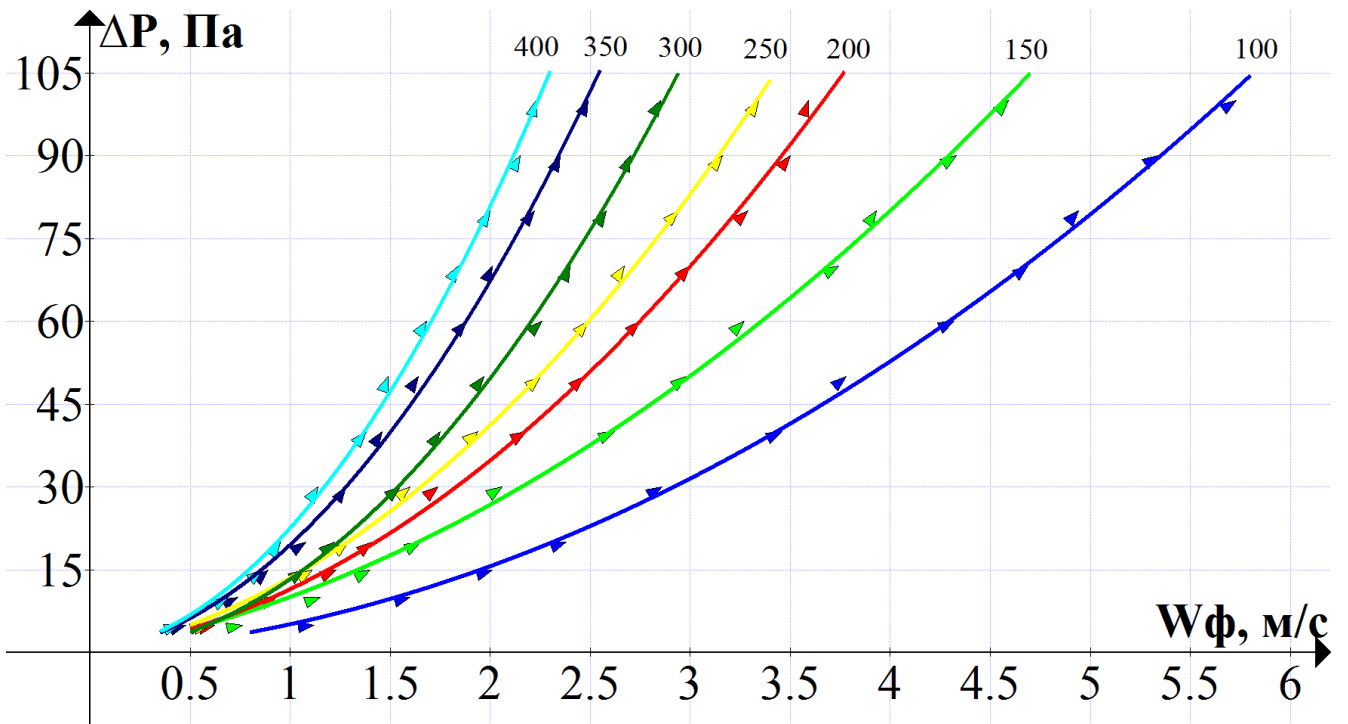


Рисунок 3.9 – Сравнение результатов эксперимента и моделирования для образцов со средним диаметром зерна 21,5 мм

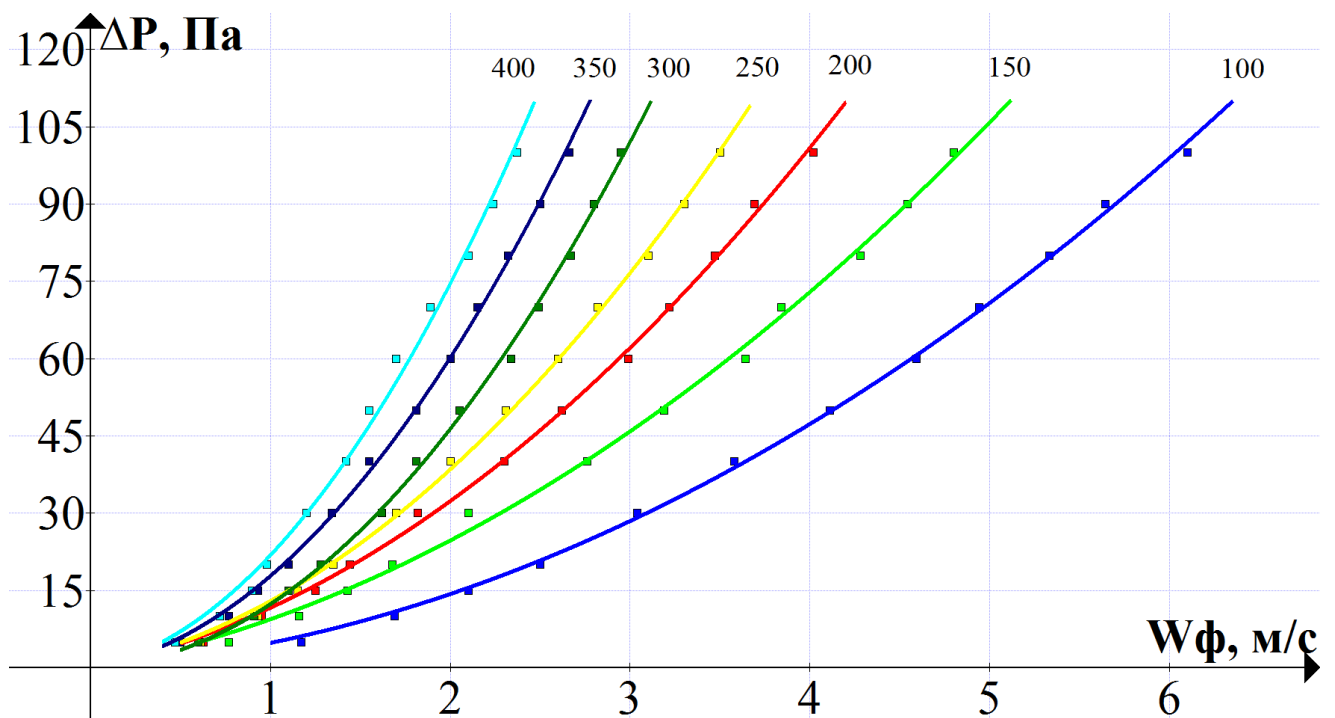


Рисунок 3.10 – Сравнение результатов эксперимента и моделирования для образцов со средним диаметром зерна 26 мм

Характеристики пористой среды, определенные по методике, описанной в п.1 данной главы представлены в таблице 3.3. Геометрические параметры образцов сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2

	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3
1	2	3	4
Средний диаметр зерна, м	0,017	0,0215	0,026
Минимальный диаметр зерна, м	0,015	0,015	0,023
Пористость	0,403	0,398	0,388
Размеры лицевой грани образца, м	0,21x0,21		

Таблица 3.3

	Номер образца					
	1		2		3	
$\delta$ , м	$i$ , кг/[м <sup>2</sup> ·ч·(Па)]	$R_u$ , м <sup>2</sup> ·ч·(Па) /кг	$i$ , кг/[м <sup>2</sup> ·ч·(Па)]	$R_u$ , м <sup>2</sup> ·ч·(Па) /кг	$i$ , кг/[м <sup>2</sup> ·ч·(Па)]	$R_u$ , м <sup>2</sup> ·ч·(Па)/кг
1	2	3	4	5	6	7
0,4	157,36	0,0025	171,01	0,0023	187,04	0,0021
0,35	144,82	0,0024	156,66	0,0022	165,05	0,0021
0,3	142,85	0,0021	162,85	0,0018	176,93	0,0017
0,25	117,87	0,0021	125,86	0,0020	133,66	0,0019
0,2	101,28	0,0020	102,11	0,0020	102,68	0,0019
0,15	98,10	0,0015	90,68	0,0017	91,11	0,0016
0,1	91,61	0,0011	98,45	0,0010	106,49	0,0009



### 3.4 Статистическая обработка результатов эксперимента

Вследствие большого количества выборок расчеты результирующей погрешности не приводятся в тексте работы. Статистическая обработка результатов эксперимента выполняется в следующей последовательности:

1. Определяются точечные оценки математического ожидания

$$M = \frac{1}{N} \sum X_i, \quad (3.17)$$

дисперсии

$$D = \frac{1}{N-1} \sum (X_i - M)^2 \quad (3.18)$$

и среднего квадратичного отклонения

$$\sigma = \sqrt{D}. \quad (3.19)$$

2. Определяется коэффициент вариации

$$K_v = \frac{\sigma}{M}. \quad (3.20)$$

3. Выборки анализируются на наличие грубых ошибок и промахов по правилу  $3\sigma$  а также по методу, основанному на использовании доверительного интервала  $\beta$ . Условием исключения из выборки значений является превышение доверительного интервала над его табличным значением. Для максимальных значений выборки:

$$\beta_1 = \frac{X_{\max} - M}{\sigma \sqrt{\frac{N-1}{N}}}. \quad (3.21)$$

Для минимальных значений:

$$\beta_2 = \frac{M - X_{\min}}{\sigma \sqrt{\frac{N-1}{N}}}. \quad (3.22)$$

После исключения промахов определяются точечные оценки очищенных выборок.

4. Определяется доверительный интервал (точнее половина симметричного интервала)

$$\mu = \frac{\sigma \cdot t}{\sqrt{N}}. \quad (3.23)$$

Вследствие малого объема выборки  $t$  определяется как аргумент функции Стьюдента  $t=1,895$ . Доверительная вероятность принимается равной 0,95.

5. Относительная погрешность результатов вследствие случайной ошибки определяется как:

$$\varepsilon = \frac{\mu}{M} \cdot 100\%. \quad (3.24)$$

6. Так как результирующая погрешность равна сумме систематической и случайной погрешности, то можно посчитать и ее. При этом систематическая погрешность соответствует приборной погрешности, описанной в паспортах на измерительные приборы. Средняя результирующая погрешность измерений по всем выборкам составила около 8%. Наибольшее отклонение экспериментальных данных от расчетных составило менее 5%.

### **Выводы по главе 3**

1. Сравнением экспериментальных данных с аппроксимационными линиями доказана возможность применения уравнений фильтрации для моделирования течений в зернистых средах в определенном диапазоне параметров.
2. Совпадением результатов моделирования фильтрации с экспериментом валидирована соответствующая физико-математическая модель, предлагаемая расчетным комплексом ANSYS CFX.
3. Определены коэффициенты фильтрации, возникающие при движении воздуха в зернистых средах. Эти коэффициенты используются далее при расчете связанной задачи тепломассообмена в засыпке.

## Глава 4

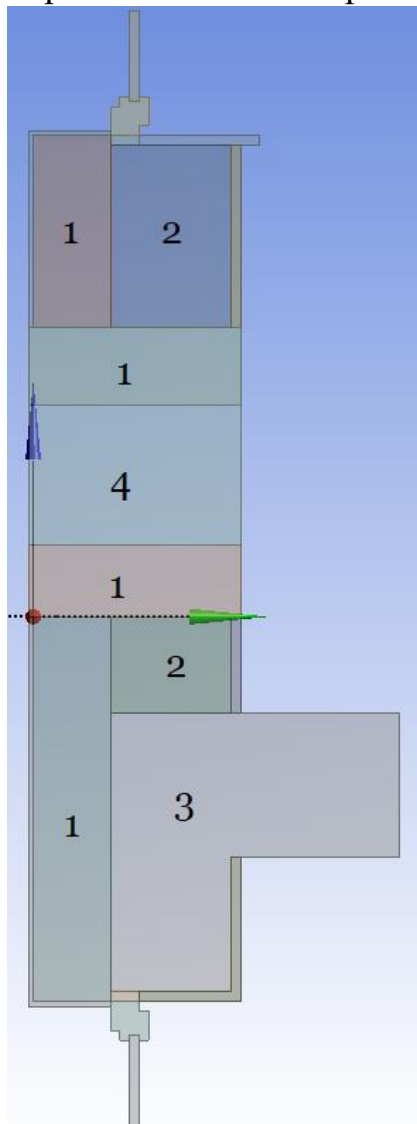
### **Физико-математическое моделирование наружного ограждения с пористой вставкой и системы гибридной реверсивной вентиляции**

Система гибридной реверсивной вентиляции является сложным видом инженерной системы ввиду ее разветвленности и многообразия действующих в ней процессов. Поэтому для успешного прогнозирования работы такой системы необходимо разработать ее физико-математическую модель. Было решено разделить исследование на две части. В первой части рассматривается движение воздуха в пористой вставке; здесь изучению подлежит тепломассообмен в пористой среде при различных краевых условиях. Во второй части исследования рассматривается работа всей системы гибридной реверсивной вентиляции, а основное внимание уделено комплексной задаче тепломассообмена в конкретном здании с такой системой. Результаты первой части будут учитываться во второй, где движение воздуха во вставке аппроксимируется степенным законом, а дополнительное охлаждение стены вследствие фильтрации холодного воздуха учитывается в тепловом балансе помещений в соответствии с методикой, приведенной в главе 5 диссертации. Таким образом, в рамках 4 главы данной работы проводится два этапа математического моделирования:

- определение температурного режима наружного ограждения с пористой вставкой при одновременной фильтрации холодного воздуха,
- комплексное моделирование нестационарного воздушно-теплового режима здания, оборудованного системой гибридной реверсивной вентиляции.

#### 4.1 Физико-математическое моделирование температурного режима наружного ограждения с пористой вставкой при фильтрации воздуха

Математическое моделирование температурного режима наружного ограждения с пористой вставкой при инфильтрации выполняется с целью поиска инженерной



методики, позволяющей увязать применение воздухопроницаемых проемов с требованиями к тепловой защите, а также для оценки экономайзерного эффекта, возникающего при фильтрации воздуха. В качестве примера для моделирования необходимо выбрать конструкцию наружного ограждения, в котором бы устанавливалась пористая вставка. Схема конструкции ограждения представлена на рисунке 4.1. Данную задачу можно решить в двумерной постановке, однако граничное условие, содержащее коэффициент теплоотдачи невозможно применить к линейному элементу (которым является торец геометрической модели), поэтому задача решается трехмерной, с единичной толщиной элемента.

Рисунок 4.1 – Схема конструкции наружного ограждения с пористой вставкой

На схеме: 1 – тепловая изоляция (минеральная вата  $\lambda=0,06$  Вт/(м·К),  $\delta=0,16$  м), 2 – кирпичная кладка ( $\lambda=0,7$  Вт/(м·К),  $\delta=0,25$  м), 3 – ж/б ригель ( $\lambda=1,4$  Вт/(м·К)), 4 – пористая вставка. Также присутствуют наружный и внутренний штукатурный слой ( $\lambda=0,76$  Вт/(м·К),  $\delta=0,01$  м и  $\delta=0,02$  м соответственно), оконные переплеты ( $\lambda=0,15$  Вт/(м·К)), подоконник ( $\lambda=0,15$  Вт/(м·К)), оконное стекло ( $\lambda=1,4$  Вт/(м·К)), подушка из монтажной пены, герметизирующая оконный переплет ( $\lambda=0,37$  Вт/(м·К)).

Можно переформулировать граничные условия и, вводя фиктивные материальные слои, рассчитать двумерную задачу. Однако в рамках рассматриваемого программного комплекса дорисовка фиктивных слоев и

задание граничных условий первого рода заняли бы больше времени, при этом время расчета сократилось бы совсем незначительно. Кроме того, введение фиктивных слоев дало бы погрешность в расчете нестационарного режима ограждения, так как фиктивные слои имеют отличную от нуля теплоемкость, которая, в действительности не наблюдается. Расчетная сетка состояла из призматических элементов с длиной ребра 0,005 м. Размерность сетки – 36544 элемента и 76964 узла.

Система дифференциальных уравнений, решаемых в рамках параграфа следующая:

Уравнение движения воздуха

$$-\nabla p = \frac{\mu}{k} \cdot w + K_{loss} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot w^2 = C_{R1} \cdot w + C_{R2} \cdot w^2 \quad (4.1)$$

Уравнение энергии для воздуха

$$\gamma \frac{\partial \rho H}{\partial \tau} = -\gamma \nabla (w \cdot \rho \cdot H) + \gamma \cdot S_k + Q_{fs} \quad (4.2)$$

где

$w_f$  – скорость движения воздуха в порах засыпки, м/с

$H$  – энтальпия воздуха, Дж/кг

$S_k$  – интенсивность источников тепла в воздухе, Вт

$Q_{fs}$  – тепловой поток от воздуха к твердому скелету материала, Вт.

Уравнение теплообмена для структуры пористой среды

$$\gamma_s \frac{\partial \rho_s \cdot C_s \cdot t}{\partial \tau} = \gamma_s \nabla (\lambda_s \cdot \nabla t) + \gamma_s \cdot S_s + Q_{sf} \quad (4.3)$$

где  $\rho_s$  – плотность твердого скелета материала, кг/м<sup>3</sup>

$C_s$  – теплоемкость материала, Дж/(кг·К)

$\gamma_s$  – доля, занимаемая структурой в общем объеме пористой среды,

$$\gamma_s = 1 - \gamma \quad (4.4)$$

$\lambda_s$  – коэффициент теплопроводности скелета материала, Вт/(м·К)

$S_s$  – интенсивность источников тепла в материале, Вт

$Q_{sf}$  – тепловой поток от твердого скелета материала к воздуху, Вт

$$Q_{fs} = -Q_{sf} = \alpha A_{fs} (T_s - T_f), \quad (4.5)$$

где

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от структуры к воздуху, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$A_{fs}$  – поверхностная плотность теплообмена, м<sup>-1</sup>

$$A_{fs} = \frac{A}{V}, \quad (4.6)$$

$A$  – площадь контакта воздуха и структуры, м<sup>2</sup>

$V$  – объем вставки, м<sup>3</sup>

$T_s, T_f$  – температуры структуры и воздуха соответственно, К.

Так как шаровая засыпка имеет изотропную пористость (строго говоря, в пристеночных слоях шары располагаются не так, как в массиве, поэтому пористость этих областей иная, но в текущем исследовании это не учитывается), то величины  $\gamma$  и  $\gamma_s$  могут быть вынесены из-под знаков дивергенции и представляться не в виде тензоров второго ранга, а в виде коэффициентов. Ввиду относительно малых перепадов температур радиационный теплообмен во вставке можно не учитывать. Система дифференциальных уравнений тепломассопереноса замыкается уравнениями граничных условий I, II и IV рода. Для поверхностей сплошных тел задается температура окружающего воздуха и коэффициент теплоотдачи. На внутренней поверхности стены, расположенной над отопительным прибором, задается температура окружающего воздуха +43°C [49]. На наружной стороне вставки задается скорость воздуха в порах. На внутренней стороне вставки задается постоянная температура, эта температура также является параметром моделирования. В зонах контакта слоев указывалось условие сохранения теплового потока и температуры (граничное условие IV рода).

На теплообмен в засыпке оказывают влияние следующие параметры:

1. теплопроводность пористой структуры,
2. коэффициент теплоотдачи от структуры к воздуху,
3. удельная площадь поверхности пор,
4. теплоемкость воздуха,
5. скорость движения воздуха в порах,

6. плотность воздуха,
7. пористость структуры
8. перепад температур, создаваемый на торцах засыпки,
9. диаметр пор.

То есть:  $t_s, t_f = f(\lambda_s, \alpha, A_{fs}, C_f, w_f, \rho_f, \gamma, \Delta T, d)$ . Поэтому искать общие зависимости, возникающие в данном процессе довольно трудно, если и возможно. Однако для случая шаровых засыпок (и не только), допустимо выразить одни параметры через другие, так как между ними присутствует прямая связь. Например  $A_{fs}$  и  $\gamma$  можно оценить в соответствии с теорией плотной упаковки. Так максимально плотная упаковка для сферических элементов – тетраэдрическая с  $\gamma = 0,25$ ; наименее плотная – кубическая с  $\gamma = 0,476$ . Также по результатам многочисленных экспериментов средняя пористость случайной упаковки шаров находится в диапазоне от 0,37 до 0,4. Тогда  $A_{fs}$  можно выразить как

$$A_{fs} = \frac{A_{сеч} \delta(1-\gamma)}{V_{ш}} A_{ш} = \frac{6\delta(1-\gamma)}{d},$$

а среднюю пористость случайной шаровой засыпки принять равной 0,385.

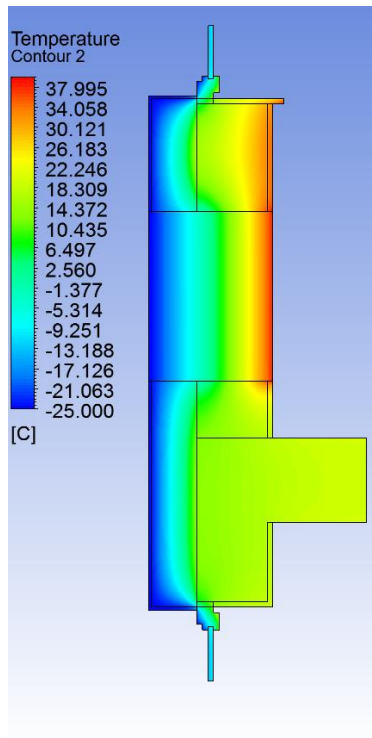
Коэффициент теплоотдачи можно поставить в зависимость от других параметров в соответствии с критериальным уравнением, полученным М. Э. Аэровым и О. М. Тодесом:

$$Nu = 0,395 \cdot \overline{\text{Pr}}^{-1/3} \cdot \overline{\text{Re}}^{0,64}, \text{ тогда}$$

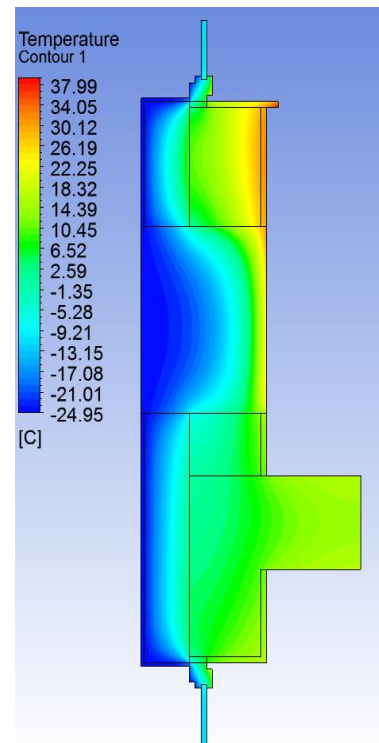
$$\overline{\alpha_g} = 0,395 \frac{\overline{\text{Pr}}^{1/3} \cdot \overline{\lambda_g}}{\overline{v_g}^{0,64}} \cdot \frac{w^{0,64}}{d^{0,36}}.$$

Число Прандтля можно осреднить по температуре. Тогда  $t_s, t_f = f(\lambda_s, w_f, \Delta T, d)$ , что значительно упрощает задачу.

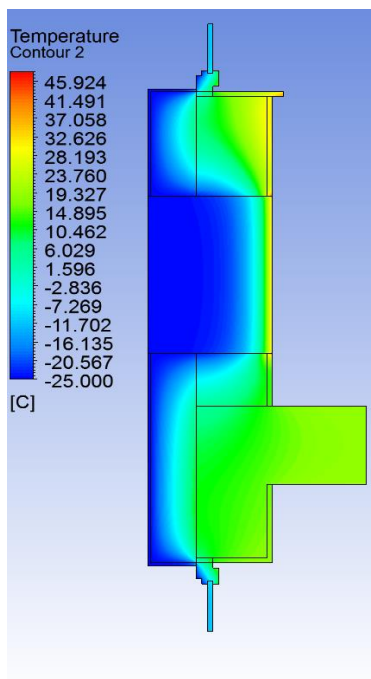
Температурные поля, возникающие в разрезе ограждения при некоторых значениях параметров, представлены на рисунке 4.2. Этот этап моделирования был параметрическим и наиболее трудоемкий расчет сошелся на 11 итерации.



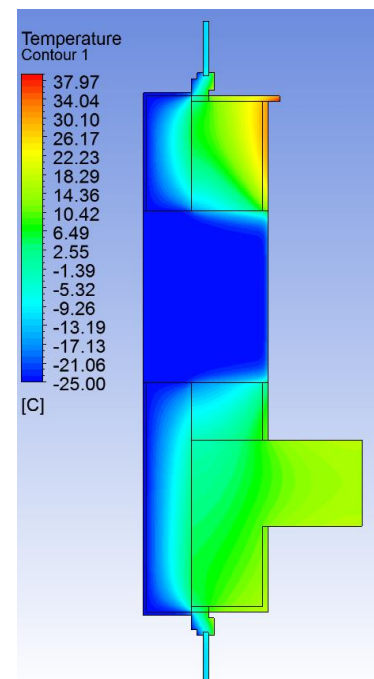
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.2. Температурные поля при различных параметрах моделирования.

а – при слабой конвекции, б – при средней конвекции, в – при активной конвекции, г – при очень активной конвекции.



Можно заметить, что в некоторых случаях закон распределения температуры в пористой структуре близок к линейному. При таком распределении наблюдаются минимальные теплотери через прилежащие к засыпке непроницаемые зоны наружного ограждения, что можно рассматривать как условие оптимизации. При близком к линейному распределению температуры в структуре, распределение температуры воздуха по сечению не является линейным, что очевидно следует из системы дифференциальных уравнений 4.1-4.3. Данная система имеет аналитическое решение, которое является слишком громоздким, чтобы приводить его здесь. Однако в случае линейного приближения температуры структуры эту систему можно решить аналитически и найти распределение температуры воздуха:

$$t_f = \frac{-a \cdot e^{-\frac{x}{a}} \cdot \left( e^{\frac{x}{a}} - 1 \right) \cdot \Delta T + \delta \cdot t_n + x \cdot \Delta T}{\delta}, \text{ или} \quad (4.7)$$

$$t_n = t_n - \Delta T \left( a \cdot e^{-\frac{1}{a}} \cdot \left( e^{\frac{1}{a}} - 1 \right) + 1 \right) + \Delta T *$$

где  $a = \frac{C \cdot G}{\alpha \cdot A_{fs} \cdot \delta}$ ,  $\delta$  – толщина ограждения, м.

Постановка дальнейшей задачи исследования звучит так: определить сочетания параметров  $\lambda_s$ ,  $w_f$ ,  $\Delta T$ ,  $d$ , при которых в засыпке возникает близкое к линейному температурное поле; определить область применения и погрешность, возникающую в случае замены нелинейного поля линейным.

Для решения этой задачи необходимо выполнить параметрическое моделирование по представленным ранее условиям. Диапазон изменения параметров моделирования принимался следующим:  $0,1 < w_f < 0,3$  м/с;  $10 < \lambda_s < 70$  Вт/(м·К);  $45 < \Delta T < 70$  °С;  $0,0015 < d < 0,05$  м. По результатам расчета и анализа более чем 2000 распределений температур, возникающих в данном диапазоне параметров, построены графики, представленные в приложении Б. Графики показывают зависимость между значением  $\Delta t$  и параметрами моделирования.  $\Delta t$  – величина, определяющая кривизну распределения температуры. Она

численно равна отклонению температуры от случая линейного распределения на оси вставки при  $x=\delta/2$  (см. рисунок 4.6).

Была сделана попытка вывести аппроксимационное выражение на основании выполненных расчетов. Для этого величина  $\Delta t$  рассматривалась как функция переменных  $\lambda_s$ ,  $w_f$ ,  $\Delta T$ ,  $d$ . По графикам (прил. 2) можно заметить, что зависимость  $\Delta t$  от  $\Delta T$ , при прочих постоянных, линейная. Таким образом  $\Delta t = A \cdot \Delta T$ , где  $A$  – функция от  $\lambda_s$ ,  $w_f$  и  $d$ . Если построить графики последней зависимости при  $\lambda_s = \text{const}$  и  $w_f = \text{const}$ , то видно, что  $A(d)$  – близка к линейной, однако при высоких  $\lambda$  отклоняется от нее в сторону полинома 3-ей степени. Так как для применения метода неопределенных коэффициентов необходимо, чтобы все зависимости в рамках каждой группы графиков имели одинаковый общий вид, то все графики  $A(d)$  следует аппроксимировать полиномом 3-ей степени. Таким образом получаем:  $A = B \cdot d^3 + C \cdot d^2 + D \cdot d + E$ , где коэффициенты  $B$ ,  $C$ ,  $D$  и  $E$  также функции от  $\lambda_s$  и  $w_f$ . Графики этих зависимостей достаточно точно можно аппроксимировать лишь полиномом 4-ой степени, коэффициенты в которых также будут функциями только от  $\lambda_s$  или  $w_f$ . Последние функции неопределенных коэффициентов также необходимо аппроксимировать полиномами высоких порядков. Результирующее выражение имеет настолько громоздкий и пугающий вид, что его отображение в тексте работы противоречит эстетическим принципам автора. Поэтому предлагается считать задачу выполненной частично и при дальнейших исследованиях пользоваться графическими зависимостями.

Так как строго линейное распределение температуры структуры наблюдается только при отсутствии температурного градиента от наружной поверхности стены к внутренней, а во всех остальных случаях отличается от него, то формула 4.7 всегда будет давать погрешность. Для расширения функционала этой формулы предлагается рассчитывать температуру воздуха не для заданного в начале  $\Delta T$ , а для его скорректированной величины  $\Delta T' = \Delta T - 2 \cdot \Delta t$ , где  $\Delta t$  определяется по графикам приложения Б. Графически это объясняется так: учитывая, что реальный график отклоняется от линейного

на величину  $\Delta t$  при  $x=\delta/2$  считаем, что скорректированный график температуры стенки также линейен, но проходит через точку реального графика при  $x=\delta/2$ . Таким образом искусственно занижается распределение температуры воздуха. Корректность данного способа предстоит определить методом численного моделирования температуры воздуха в засыпке при переменных параметрах теплообмена. Для большей ясности описываемые величины представлены графически на рисунке 4.3.

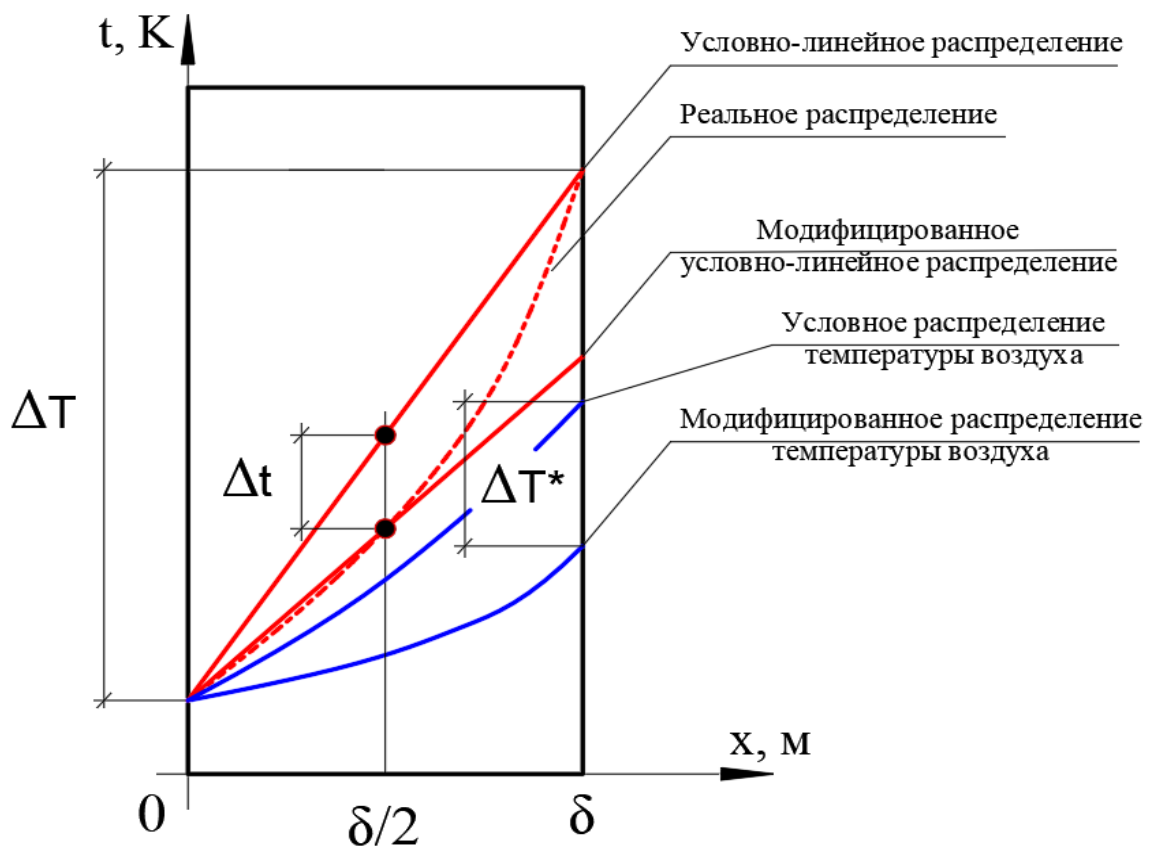


Рисунок 4.3 – Иллюстрация описываемого метода

Графики отклонений  $\Delta T^*$  расчетной температуры притока от действительной представлены в приложении В. Положительные значения величин  $\Delta T^*$  означают, что данный метод позволяет определять параметры моделирования с запасом. По результатам выполненных расчетов можно сделать выводы:

1. Линейное температурное поле вероятнее возникает в засыпках с относительно небольшой площадью внутренней поверхности, однако температура притока при этом, может быть недостаточной.

2. Высокие значения коэффициента теплопроводности твердой фазы способствуют формированию линейных распределений температур и повышению температуры притока.

3. Уменьшение перепада температур, создаваемых на торцах вставки, также способствует формированию линейных температурных полей.

Из данных выводов можно заключить, что для создания эффективного теплообменного и аэродинамического режимов необходимо стремиться подбирать параметры материала так, чтобы площадь поверхности пор и перепад температур на торцах вставки были минимальными, а коэффициент теплопроводности структуры – максимальным.

## **4.2 Физико-математическое моделирование воздушно-теплого режима административного здания, оборудованного гибридной реверсивной вентиляцией**

### **4.2.1 Общая информация о моделируемом объекте**

В рамках исследования выполняется физико-математическое моделирование нестационарного воздушно-теплого режима административного здания, находящегося в г. Москве. Цель моделирования – рассмотреть в численном эксперименте возможность применения проемов, заполненных пористой средой в качестве приточных устройств и провести валидацию предлагаемого графоаналитического метода подбора материала для этой среды (см. п 5.4). Задача воздушно-теплого режима здания есть нелинейная сетевая задача, параметры узлов которой находятся из системы уравнений, содержащей балансовые значения расходов для этих узлов. На рисунках 4.4, 4.5 представлены расчетные схемы рассматриваемого здания. Общая схема содержит 62 внутренних и 37 внешних узлов. Дополнительными неизвестными являются КМС тройников, зависящие от расходов проходящего через них воздуха. Таким образом, система уравнений содержит 86 неизвестных величин, а массивы данных по всем узлам имеют размеры до 123x123. Планировка здания приведена на рисунке 4.6.

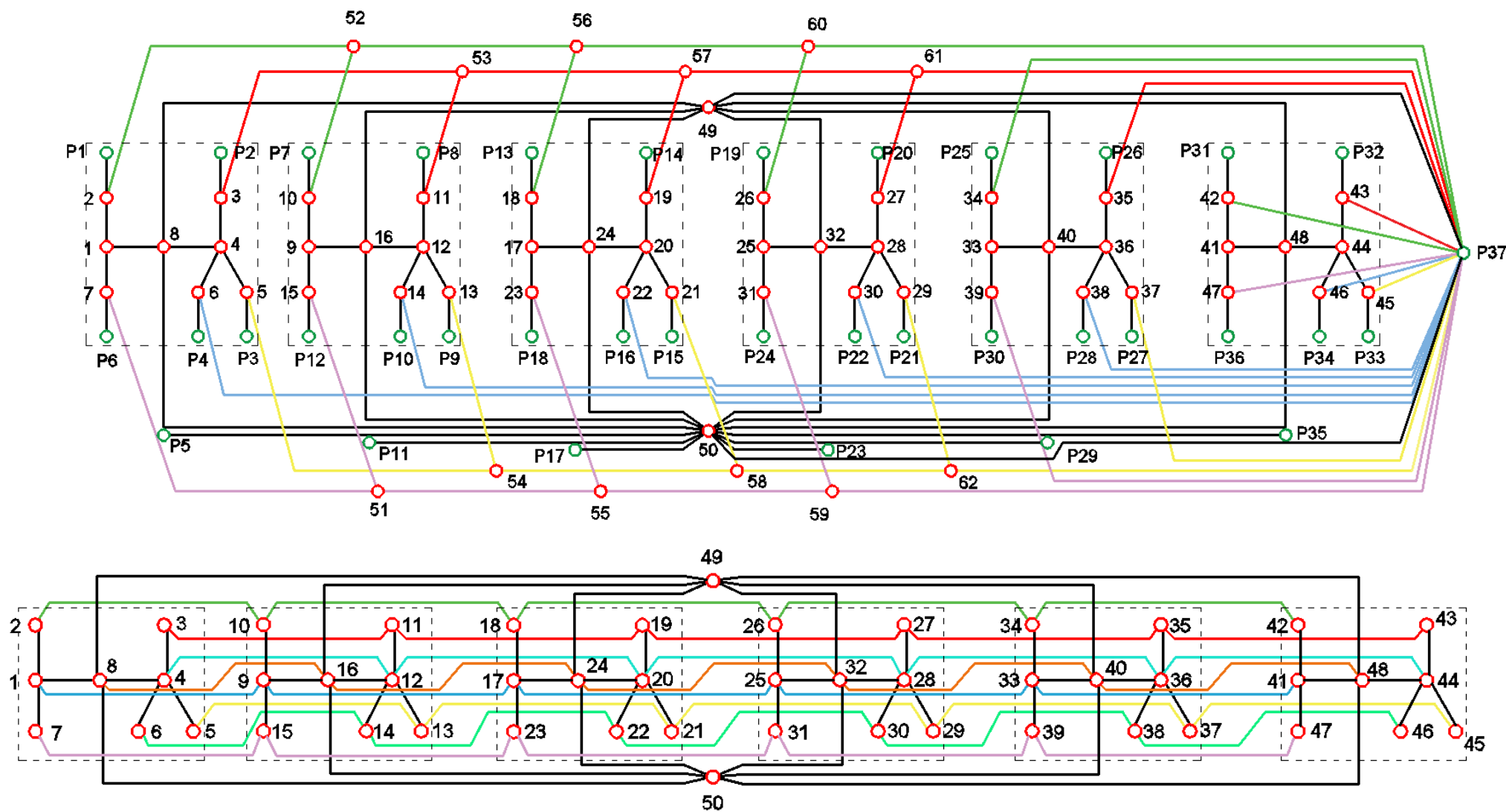


Рисунок 4.4– Аэродинамическая (вверху) и теплообменная (внизу) схемы моделируемого объекта. В теплообменную схему не включены внешние узлы

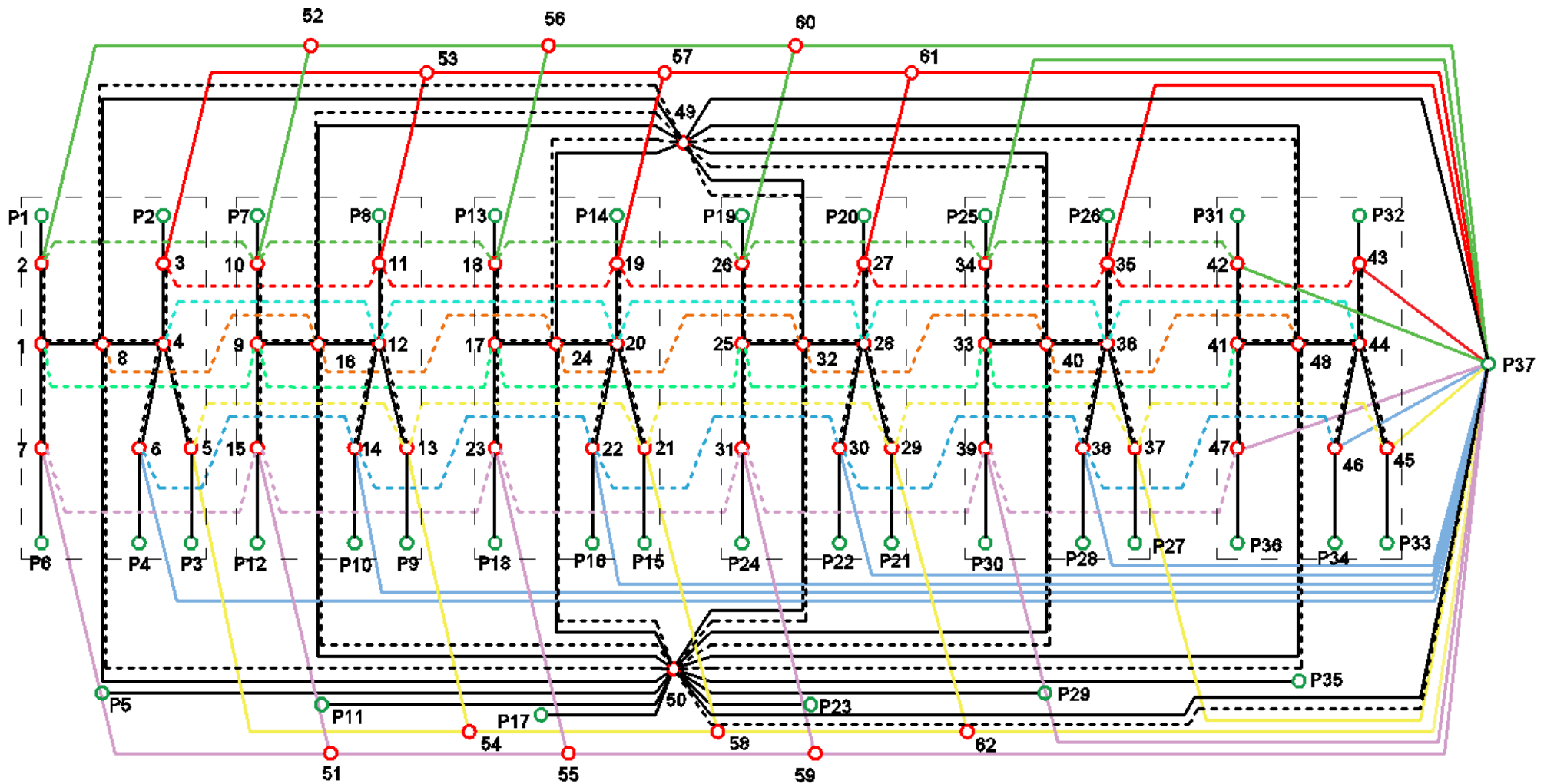


Рисунок 4.5– Общая расчетная схема нестационарного воздушно-теплового режима (ВТРЗ) рассматриваемого объекта. Пунктирами обозначены теплообменные связи, сплошными линиями – аэродинамические. Узлы красного цвета – внутренние, зеленые – граничные

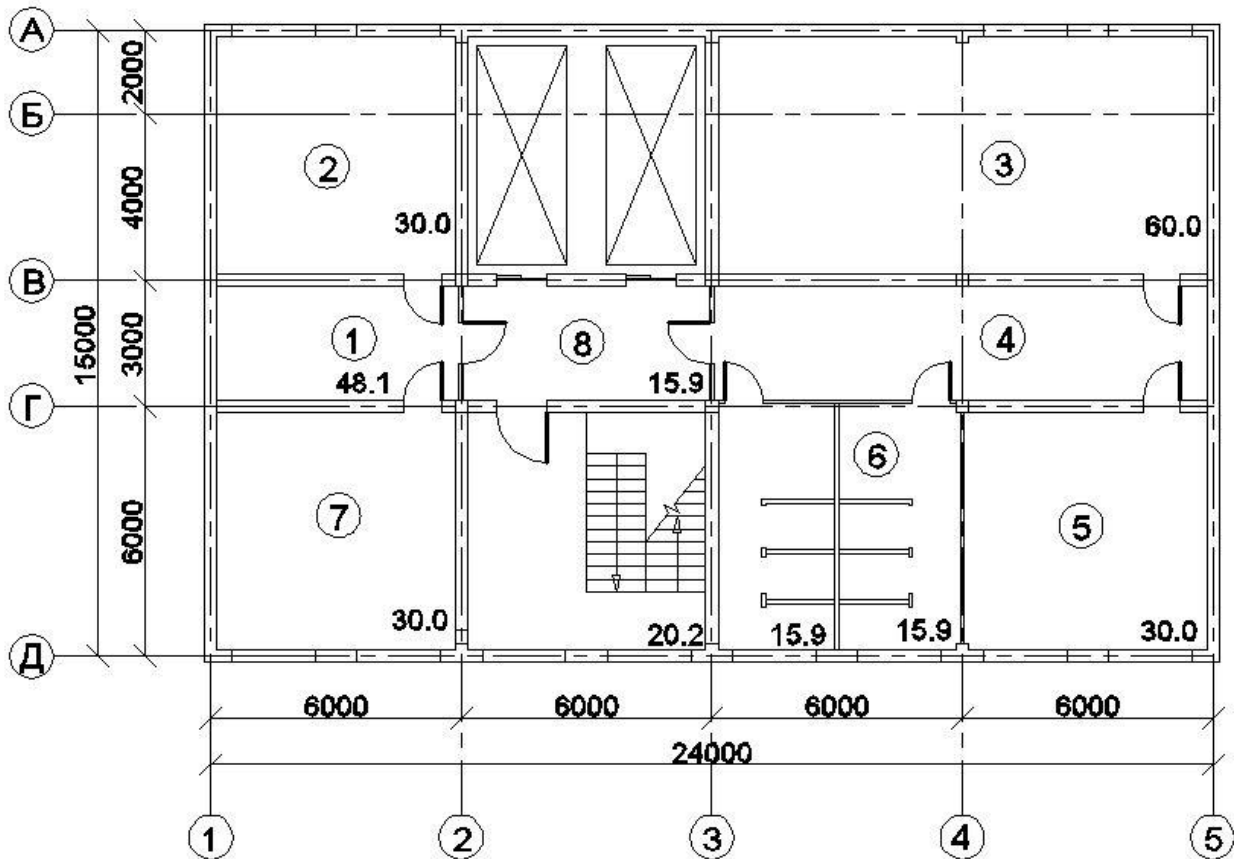


Рисунок 4.6 – Планировка моделируемого здания

В рассматриваемом алгоритме для ускорения счета и уменьшения выделения памяти использовался адаптивный временной шаг и векторизация некоторых циклических процессов. Была сделана попытка ввести временной шаг, зависящий от градиента температуры, но после пробных запусков и изучения структуры результатов более рациональным оказалось делать шаг зависимым от абсолютного значения температуры. Ввод адаптивного временного шага позволил сократить количество циклов прогонки программы с 23040 до 11520 без видимой потери точности. Порядок работы алгоритма будет рассмотрен подробно в следующих параграфах.

Обратный режим работы системы реверсивной вентиляции не представляет большого интереса, так как в нем расходы воздуха по помещениям обеспечиваются механическим оборудованием, поэтому моделированию подлежит только естественный режим при переменных значениях наружных и внутренних параметров. В качестве объекта

исследования был принят проект шестиэтажного административного здания в г. Москве.

Для создания модели здания необходимо определить начальные значения исходных величин, входящих в нее, и описать динамику их изменения во времени, если ее можно задать функционально. К этим величинам относятся:

- параметры наружного и внутреннего воздуха в каждом помещении,
- параметры наружных и внутренних ограждений, в том числе светопрозрачных,
- величины, входящие в тепловой баланс помещений,
- характеристики сопротивлений всех элементов воздушного тракта здания,
- конструктивно-планировочные решения здания.

#### 4.2.2 Подготовка исходных данных

К параметрам наружного воздуха относятся:

- средняя температура,
- амплитуда суточного колебания.

Данные значения принимаются по [131], а изменение температуры во времени задается следующим гармоническим законом

$$t_{ext} = \frac{A}{2} \sin\left(-\frac{\pi}{2} + \frac{\tau}{3600} \cdot \frac{\pi}{12}\right) + t_{av}. \quad (4.8)$$

Температура внутри помещений изменяется во времени и является искомой величиной, однако на первом расчетном шаге она задается вручную.

К параметрам наружных и внутренних ограждений, в том числе светопрозрачных, относятся:

- коэффициент теплопередачи,
- площадь,
- воздухопроницаемость.



Толщина слоя утеплителя подбирается посредством теплотехнического расчета наружного ограждения. По полученной конструкции стены определяется коэффициент теплопередачи. Площади стен определяются согласно правилам обмера. Воздухопроницаемыми считаются окна, межкомнатные и наружные двери, пористые вставки, двери лифтовых шахт. Так как модель воздушного режима использует в качестве гидравлической характеристики не сопротивление воздухопроницанию элемента, а его характеристику сопротивления, то необходимо выполнить соответствующие преобразования.

Для окон

$$S = 10 \cdot \left( \frac{R_u}{A} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (4.9)$$

где  $R_u$  – сопротивление воздухопроницанию,  $\text{м}^2 \cdot \text{ч} / \text{кг}$

$A$  – площадь окна,  $\text{м}^2$ .

Для дверей

$$S = 10 \cdot \left( \frac{R_u}{A} \right)^2. \quad (4.10)$$

Закон фильтрации во вставке имеет вид

$$G = k(\Delta p)^n, \quad 1 < n < 2. \quad (4.11)$$

После преобразования можно получить выражение

$$G = \left( \frac{\Delta P}{\sqrt[n]{\frac{1}{k}}} \right)^n, \quad (4.12)$$

что является, по сути, классическим законом движения воздуха через произвольное местное сопротивление

$$G = \left( \frac{\Delta p}{S} \right)^n. \quad (4.13)$$

Из чего следует, что для вставки

$$S = n \sqrt[n]{\frac{1}{k}} \quad (4.14)$$

В соответствии с описанным в главе 5 графоаналитическим методом для наиболее удобного регулирования системы необходимо обеспечивать максимально возможный показатель степени  $n$  (максимально близкий к 2). Так как в рамках моделирования рассматриваются только уравнения без привязки к каким-либо конкретным материалам засыпок, то предлагается для упрощения расчетов принять  $n=2$ . Тем не менее, предлагаемая модель может решать возложенную на нее задачу при любых значениях  $n$ .

К величинам, составляющим тепловой баланс помещений относятся:

- трансмиссионные теплопотери,
- теплопоступления от отопительных приборов,
- тепловыделения от людей и оборудования,
- тепловые потоки из смежных помещений,
- дополнительная теплота, заносимая или удаляемая с вентиляционным воздухом и при перетоках.

Для моделирования данной задачи используется программный комплекс Matlab и поскольку он не использует кириллицу, в настоящем разделе применяются специальные индексы и обозначения переменных, принятые в разработанном программном комплексе, соответствие которых общепринятым, указанным в главе 2, приведено в условных обозначениях в начале работы. Трансмиссионные теплопотери помещений определяются на основании заранее определенных величин потерь, рассчитанных при  $t_{ext}=t_5^{0.92}$ . Изменение теплопотерь при уменьшении или росте температурного перепада происходит пропорционально по следующей зависимости

$$Q_{hl\_i} = Q_{hl\_i\_расч} \cdot \frac{t_i - t_{ext}}{t_i - t_5^{0.92}} \quad (4.15)$$

Теплопоступления от отопительных приборов определяются как сумма трансмиссионных теплопотерь и затрат на подогрев санитарной нормы

вентиляционного воздуха при  $t_{ext}=t_5^{0.92}$ . Пересчет на текущие значения температурного перепада осуществляется аналогично с уравнением (4.15).

Бытовые теплопоступления воздействуют на помещения лишь в определенные дни и часы суток, при этом теплоотдача человеческого тела изменяется в зависимости от температуры воздуха в помещении и при  $t_i=+36,6^{\circ}\text{C}$  становится равной нулю. Далее теплообменная функция тела поддерживается только за счет испарения пота, то есть выделения скрытой теплоты. Теплоотдача офисного оборудования незначительно изменяется при колебаниях внутренней температуры и принимается условно не зависящей от нее. В предлагаемой модели принято, что бытовые теплопоступления существуют в период с 8:00 до 17:00 ежедневно, кроме воскресенья. Зависимость теплоотдачи посетителей и работников здания линейно зависит от температуры в помещениях.

Тепловые потоки из смежных помещений определяются по заданным коэффициентам теплопередачи внутренних стен и их площадям. Температурный перепад между помещениями задается в исходных данных и пересчитывается в ходе работы алгоритма.

Если рассмотреть узел (помещение), связанный с другими узлами, имеющими отличные температуры и обменивающийся с ними воздухом, то при составлении теплового баланса этого узла можно допустить ошибку. Ошибка эта возникает при автоматизации расчета, и связана с формальным подходом к составляющим теплового баланса. А так как математическое моделирование есть не что иное, как автоматизация расчета, то этот момент следует подробно оговорить.

Так, для внутреннего узла, имеющего две связи с внешними узлами (внешние узлы есть граничные элементы аэродинамической схемы, температура в них всегда равна температуре наружного воздуха) выражения для вентиляционных тепловых потоков будут иметь вид

$$Q_1 = G_{притока} \cdot C\Delta t$$

$$Q_2 = G_{вытяжки} \cdot C\Delta t$$

Суммарное же значение теплового баланса составит  $Q = Q_1 + Q_2$ .

Очевидно, что  $Q_1$  и  $Q_2$  не могут иметь разные знаки, так как при этом балансовое значение будет равно нулю, хотя узел, очевидно, будет остывать. Однако и одинаковые знаки они тоже иметь не могут, так как это приведет к двойному учету теплотрат. В действительности же воздухообмен сводится к замене некоторого количества воздуха с одной температурой на такое же количество воздуха с другой температурой, поэтому правильно будет учитывать лишь входящие в помещение расходы воздуха, а исходящие – игнорировать. При использовании матричных операций в расчете воздушно-теплового режима здания этот несложный нюанс играет значительную роль, так как матрицы расходов необходимо корректировать, зануляя их отрицательные элементы (отрицательными являются расходы, выходящие из узлов).

Вентиляция рассматриваемого объекта реализуется следующим образом: первые 4 этажа здания вентилируются системой оцинкованных воздуховодов с перепусками через 1 этаж; последние 2 этажа вентилируются индивидуальными воздуховодами; помещения санузлов вентилируются индивидуальными воздуховодами независимо от этажа. Кроме того, помещения санузлов не оборудуются приточно-вытяжными устройствами, в целях увеличения расхода воздуха, перетекающего в них из коридора. Так как справочная литература позволяет определить только коэффициенты местных сопротивлений воздуховодов, то необходимо преобразовать их значения в характеристики сопротивления. Это можно сделать, используя выражение 4.16

$$S = A \left( \frac{\gamma}{d} l + \zeta \right), \quad (4.16)$$

где

$A$  – удельное гидродинамическое давление в элементе, Па/(кг/ч)<sup>2</sup>, возникающее при расходе в 1 кг/ч

$$A = \frac{1}{2f^2 \rho \cdot 3600^2} \text{ или для круглого сечения } A = \frac{6,25}{10^8 \rho d^4},$$

$l$  – длина элемента, м

$d$  – эквивалентный по скорости диаметр элемента, м

$\zeta$  – коэффициент местного сопротивления

$f$  – площадь живого сечения элемента, м<sup>2</sup>

$\rho$  – плотность перемещаемого воздуха, кг/м<sup>3</sup>

$\gamma$  – коэффициент гидравлического трения

$$\gamma = f \left( \text{Re}, \frac{\sigma}{d} \right),$$

где

$\sigma$  – абсолютная шероховатость материала, м

Число Рейнольдса определяется как

$$\text{Re} = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (4.17)$$

где

$\nu$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с, определяемая по формуле  $\nu = \mu/\rho$

$\mu$  – динамическая вязкость воздуха, Па·с.

Так определяются характеристики сопротивления индивидуальных воздуховодов для каждого этажа и всех участков систем с перепусками, включая участки с тройниками. Так как сопротивления тройников зависят от расходов воздуха через их патрубки, а также от их геометрических и конструктивных характеристик, то эти сопротивления должны входить в систему уравнений в виде переменных величин.

Конструктивно-планировочные решения здания определялись по чертежам из проекта.

### 4.2.3 Матричные операции при моделировании нестационарного ВТРЗ

Попытка использовать матричные операции при работе с моделями зданий уже была предпринята в [42, 43, 19]. В данном параграфе эта тема получает дополнительное развитие и рассматривается с несколько иной стороны. Написание алгоритмов рекомендуется начинать с формирования блок-схемы (рисунок 4.7).

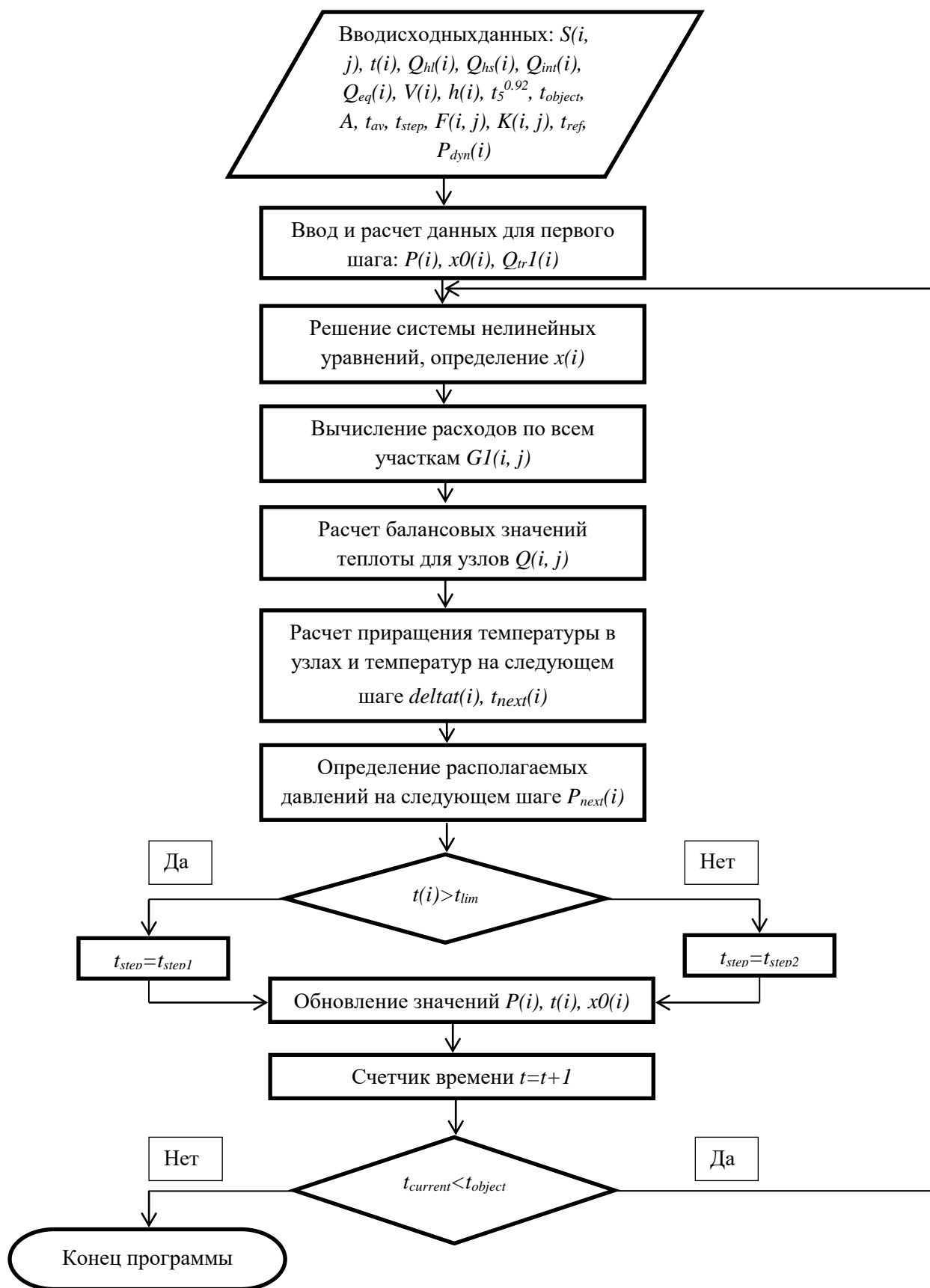


Рисунок 4.7 – Блок-схема программы для моделирования ВТРЗ

Как можно заметить, некоторые переменные величины имеют один индекс ( $i$ ) или два ( $i, j$ ). Это говорит о том, что рассматриваемые переменные представляются в виде массивов данных с размерностью 1 или 2. Такое представление данных является удобным в подобных задачах по ряду причин. Во-первых, это систематизирует переменные, позволяя проводить некоторые вычисления сразу со всем массивом, а не прописывать каждое действие отдельным оператором, что уменьшает количество выделяемой памяти и ускоряет расчеты. Во-вторых, в отдельных случаях к таким массивам могут быть применены матричные операции, заменяющие значительные блоки программ, необходимых при традиционном подходе. Сама же задача воздушно-теплого режима характерна той особенностью, что любое здание можно интерпретировать как некоторое множество узлов, соединенных участками. При этом, в наиболее простом случае, каждый узел может быть описан лишь одним числом – номером узла. Участки же могут быть описаны минимум двумя числами (координатами) – номерами узлов начала и конца участка (разумеется, можно пронумеровать участки и характеризовать их одним числом, но такой подход не ведет к упрощению решения задачи). В таком контексте можно задавать параметры всех узлов в виде векторов, а параметры участков в виде матриц. При этом каждый параметр можно поставить в соответствие конкретному узлу расположив его значение под координатой, равной номеру узла. Для примера, если необходимо определить расходы воздуха через все участки схемы, то формируется два массива: одномерный массив давлений в узлах

$$\bar{P} = (P_1, P_2 \dots P_n)$$

и двумерный массив характеристик сопротивления

$$S = \begin{pmatrix} 0 & \dots & S_{1,j_{\max}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{i_{\max},1} & \dots & 0 \end{pmatrix}.$$

При этом данная матрица будет иметь нулевую главную диагональ, так как связи между узлами 1–1, 2–2, ...  $i_{\max}$ – $j_{\max}$  – не существуют. А вот элементы массива с другими координатами уже могут не быть нулевыми, в зависимости от аэродинамической схемы здания. Так, например, элемент с координатами (1, 3) будет соответствовать характеристике сопротивления участка, соединяющего узлы 1 и 3 (если такая связь существует). Определив таким образом два массива в алгоритме прописывается цикл, в теле которого вычисляется значение расхода по выражению

$$G_i = \operatorname{sgn}(p_i - p_x) \sqrt{\frac{|p_i - p_x|}{S_{ix}}}$$

На выходе получается двумерный массив  $G(i, j)$ , содержащий величины расходов по всем узлам, причем расход, направленный из  $i$  в  $j$  будет положительным, а обратный – отрицательным. Матрица  $G(i, j)$  будет симметричной по абсолютным значениям относительно главной диагонали. Таким образом, совершенно любые характеристики узлов можно помещать в одномерные массивы, а характеристики участков – в двумерные. Не вызывает сомнений, что использовать подобные конструкции гораздо выгоднее, чем прописывать каждое вычисление отдельно.

Внутренняя задача воздушного режима с сосредоточенными параметрами сводится, по сути, к решению системы уравнений, описанной в главе 2 и последующему расчету расходов по алгоритму, представленному выше. Гораздо больший интерес представляют матричные операции при работе с тепловым режимом здания. В этой задаче здание тоже может быть рассмотрено как граф, состоящий из узлов и участков, правда функции участков будут несколько шире. Здесь они переносят не только воздушные массы, но и проводят теплоту посредством теплопередачи. Причем некоторые связи могут проводить теплоту и при этом быть непроницаемы для воздуха (глухие перегородки) и наоборот (воздуховоды), а некоторые будут совмещать эти функции. Количество участков в таком графе будет гораздо большим, так как



каждое помещение граничит минимум с тремя другими. Тепловой поток от теплопередачи через стену и количество теплоты, переносимое вентиляционным воздухом, определяются по следующим формулам

$$Q_{tr} = FK\Delta t, \quad (4.18)$$

$$Q_{vent} = GC\Delta t. \quad (4.19)$$

Очевидно, что для применения матричных операций можно использовать два массива: двумерный массив перепадов температур между узлами

$$\Delta t(i, j) = \begin{pmatrix} 0 & \cdots & \Delta t_{1, j \max} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta t_{i \max, 1} & \cdots & 0 \end{pmatrix}$$

и трехмерный массив  $M(i, j, k)$ , содержащий значения функционалов  $F(i, j) \cdot K(i, j)$  при  $k=1$  и  $G(i, j) \cdot C$  при  $k=2$

$$M(i, j, 1) = \begin{pmatrix} 0 & \cdots & F_{1, j \max} \cdot K_{1, j \max} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{i \max, 1} \cdot K_{i \max, 1} & \cdots & 0 \end{pmatrix},$$

$$M(i, j, 2) = \begin{pmatrix} 0 & \cdots & G_{1, j \max} \cdot C \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{i \max, 1} \cdot C & \cdots & 0 \end{pmatrix}.$$

Сначала, используя цикл, при  $k=1$  матрично перемножаются массивы  $\Delta t(i, j)$  и  $M(i, j)$ , затем при  $k=2$  также матрично перемножаются массивы  $\Delta t(i, j)$  и  $M(i, j)$

$$Q_{tr}(i, j) = M(i, j, 1) \cdot \Delta t(i, j), \quad (4.20)$$

$$Q_{vent}(i, j) = M(i, j, 2) \cdot \Delta t(i, j). \quad (4.21)$$

Здесь необходимо именно матричное умножение, так как оно сочетает в себе сразу две операции: умножение элементов строки на элементы столбца и последующее суммирование полученных чисел. Перемножая соответствующие

элементы столбцов и строк, получают ряд слагаемых, сумма которых дает балансовое значение теплоты по узлу. Эта сумма находится вторым шагом матричного умножения – суммированием полученных произведений. Умножение первого столбца матрицы  $M(i, j, 1)$  на первую строку матрицы  $\Delta t(i, j)$  с последующим суммированием дает балансовое значение теплоты по первому узлу и записывается в первую ячейку матрицы  $Q_{tr}(1,1)$ . Умножение второго столбца на вторую строку дает балансовое значение для второго узла и заносится в ячейку матрицы  $Q_{tr}(2,2)$  и так далее. В результате на главной диагонали матриц  $Q_{tr}(i,j)$  и  $Q_{vent}(i,j)$  будут появляться результирующие значения тепловых балансов по узлам. Эти значения легко выводятся в отдельные одномерные массивы (что логично, так как балансовые значения теплоты являются уже характеристиками узлов, а не участков)  $\bar{Q}_{tr}(i)$  и  $\bar{Q}_{vent}(i)$ .

После определения векторов балансовых значений теплоты по воздуху и при теплопередаче через перегородки формируются векторы данных по теплопотерям, теплопоступлениям от отопительных приборов, оборудования и людей. Выполняется суммирование перечисленных векторов

$$\bar{Q}(i) = \bar{Q}_{tr}(i) + \bar{Q}_{vent}(i) + \bar{Q}_{int}(i) + \bar{Q}_{hs}(i) - \bar{Q}_{hl}(i). \quad (4.22)$$

В результате получается одномерный массив, содержащий значения результирующих балансов теплоты для каждого узла. Используя этот массив можно определить приращение температуры для следующего расчетного шага

$$\bar{t}_{next}(i) = \bar{t}(i) + \frac{\bar{Q}(i)}{C \cdot \bar{V}(i)}. \quad (4.23)$$

Операция деления здесь выполняется почленно, а последующее суммирование – векторно. Таким образом, завершается полный цикл определения неизвестных в задаче воздушно-теплого режима здания.

Существует ряд тонкостей, связанных с реализацией данного алгоритма. В частности, как писалось выше, при таком подходе возможна ошибка вследствие формального учета составляющих теплового баланса по воздуху. Ряд других сложностей, влияющих на быстродействие и объем выделяемой машинной памяти, связан с конкретным языком программирования, на котором

выполняется алгоритм. В частности при использовании программного комплекса MATLAB рационально использовать предварительное выделение памяти для всех массивов, участвующих в циклах; нумеровать участки так, чтобы матрицы данных имели диагонально-окаймленную форму; пользоваться специальным инструментом для работы с разреженными матрицами.

#### **4.2.4 Результаты моделирования нестационарного ВТРЗ**

Расчетное время численного эксперимента составило 192 часа или 8 суток. Считалось, что система отопления оборудована автоматическими терморегуляторами, поэтому на графиках температуры в некоторых помещениях она не поднимается выше 26 °С. Здесь 26 °С – значение температуры внутреннего воздуха, при котором подача воды в прибор полностью прекращается. Тепловая инерционность прибора после его отключения не учитывается ввиду того, что она не оказывает значительного влияния на тепловой режим помещения при достаточно мелком временном шаге. Моделируется система вентиляции, не оборудованная регулируемыми устройствами. Это допустимое упрощение, так как цель моделирования – валидация графоаналитического метода. Если же потребуются рассчитать тепловые затраты на вентиляцию, то необходимо добавить в алгоритм цикл, который будет оценивать расходы воздуха через приточно-вытяжные устройства и при необходимости повышать их характеристику сопротивления. Нерегулируемость системы влечет еще одну неточность. Мощность системы отопления и трансмиссионные теплотери линейно зависят от температурного перепада, а расход приточного воздуха – нелинейно, поэтому в некоторых случаях может быть заметна разбалансировка теплового режима. Тем не менее, эти погрешности не мешают сделать необходимые выводы. На рисунках 4.8-4.13 представлены некоторые результаты расчетов согласно описанной модели.

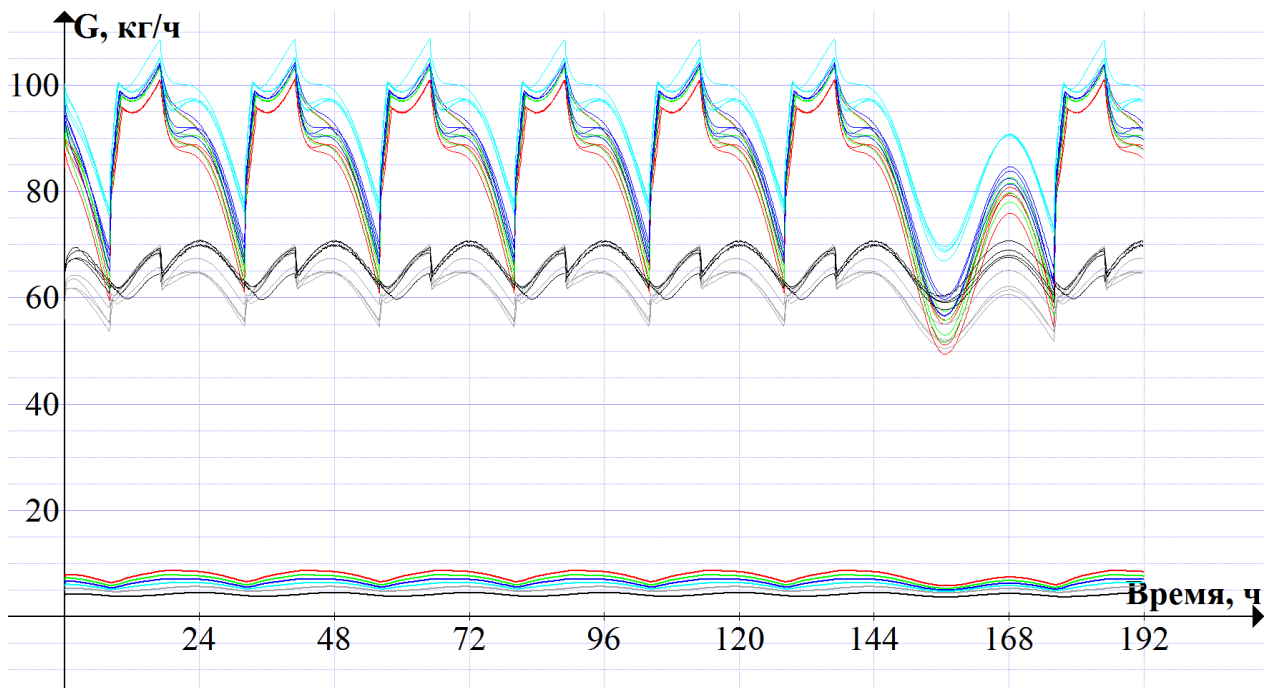


Рисунок 4.8 – Массовые расходы воздуха по вентилируемым помещениям на всех этажах при  $t_{ext}=+8^{\circ}\text{C}$

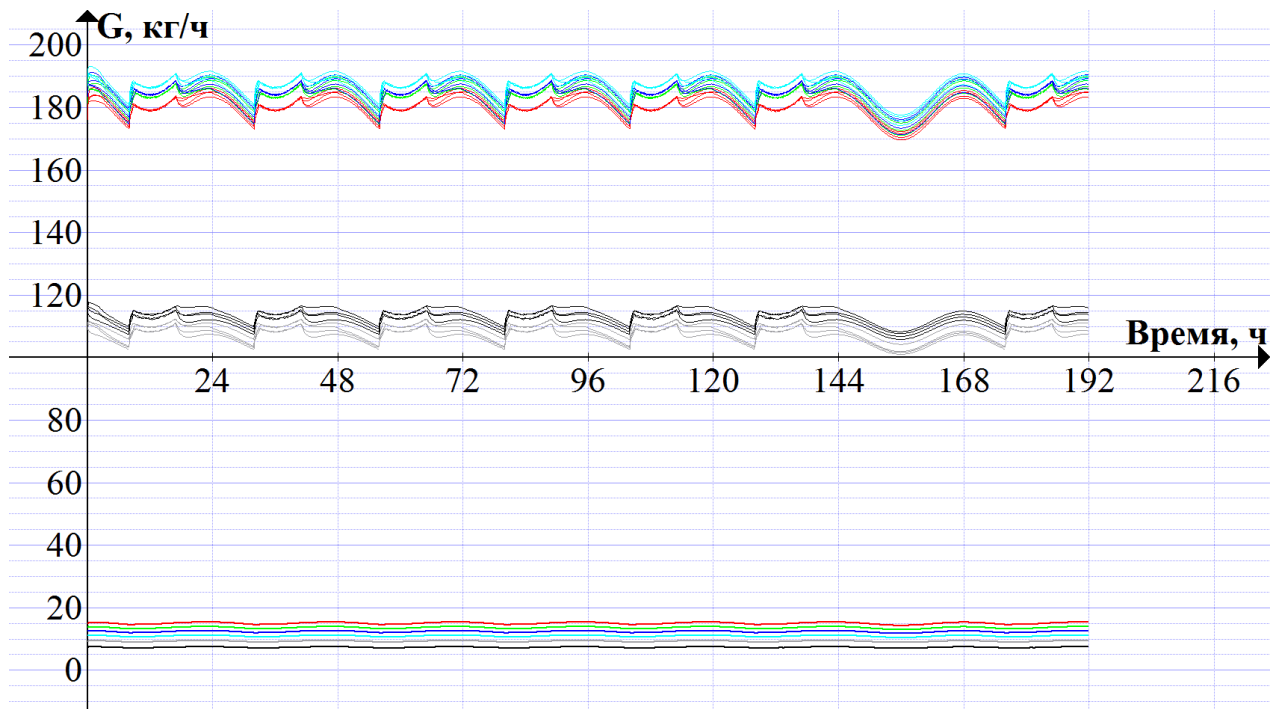


Рисунок 4.9 – Массовые расходы воздуха по вентилируемым помещениям на всех этажах при  $t_{ext}=-25^{\circ}\text{C}$

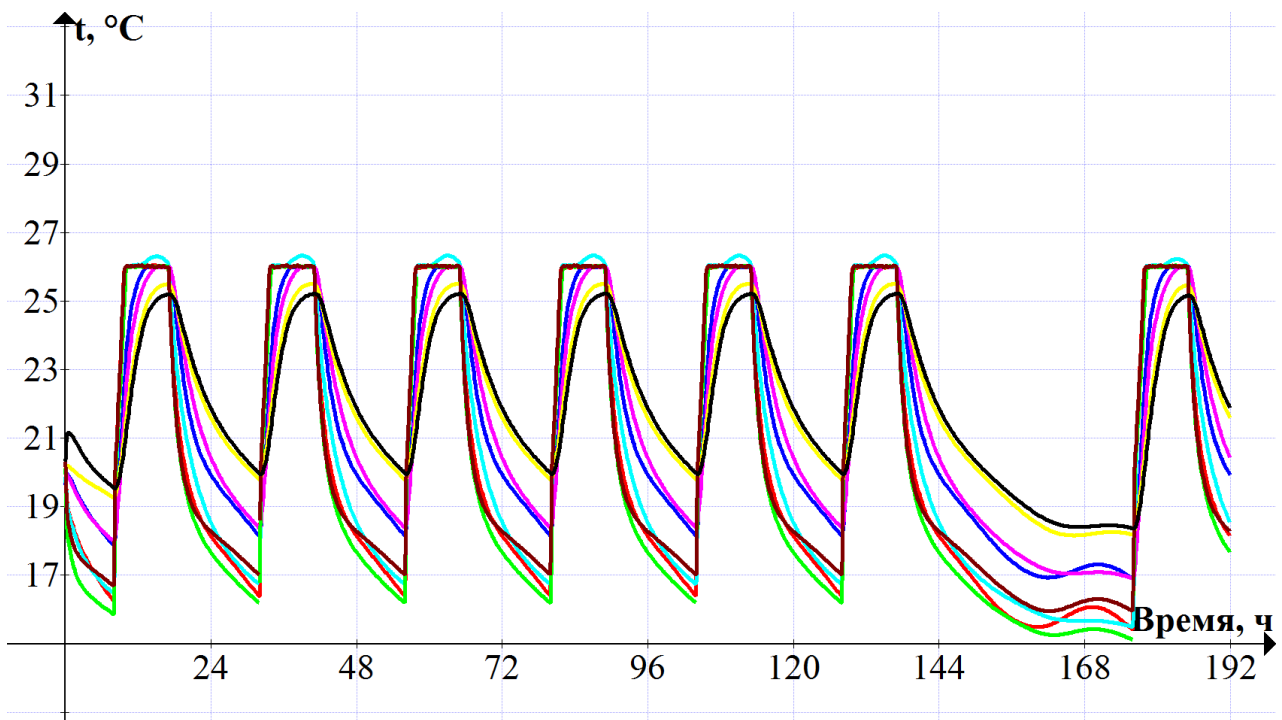


Рисунок 4.10 – Температура в помещениях и коридорах 3 этажа при  $t_{ext}=+ 8\text{ }^{\circ}\text{C}$

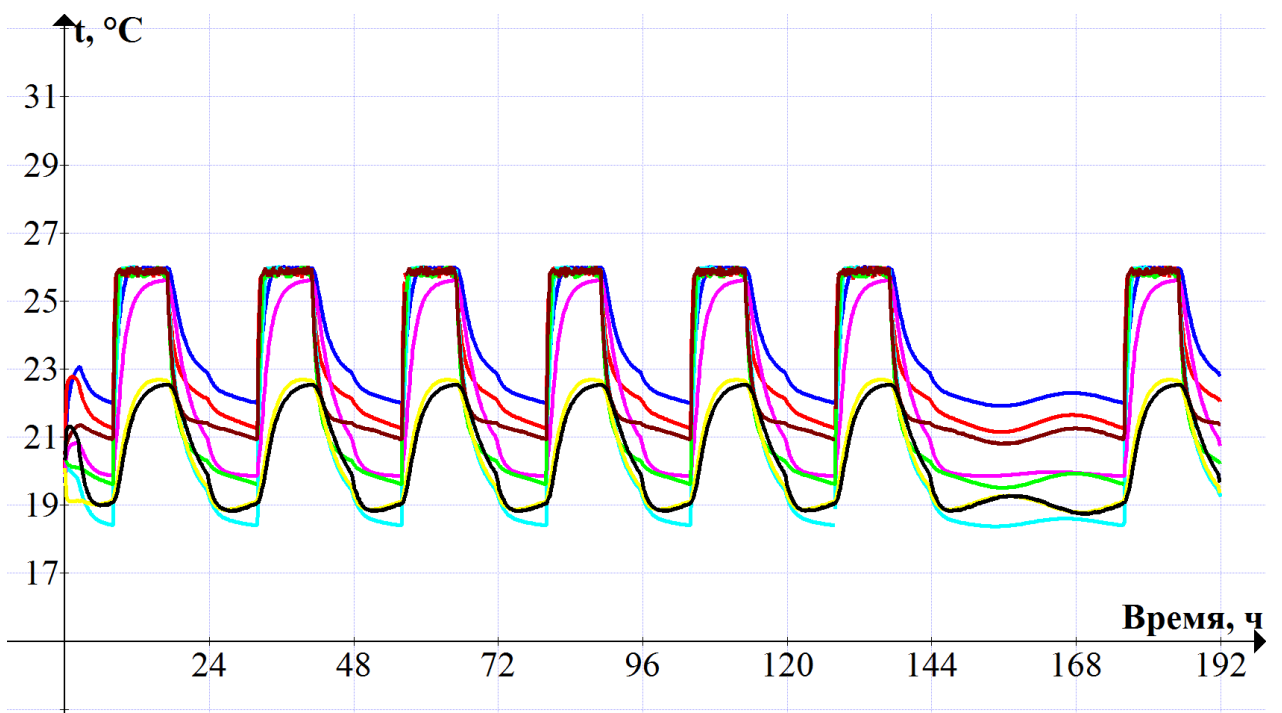


Рисунок 4.11 – Температура в помещениях и коридорах 3 этажа при  $t_{ext}=- 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

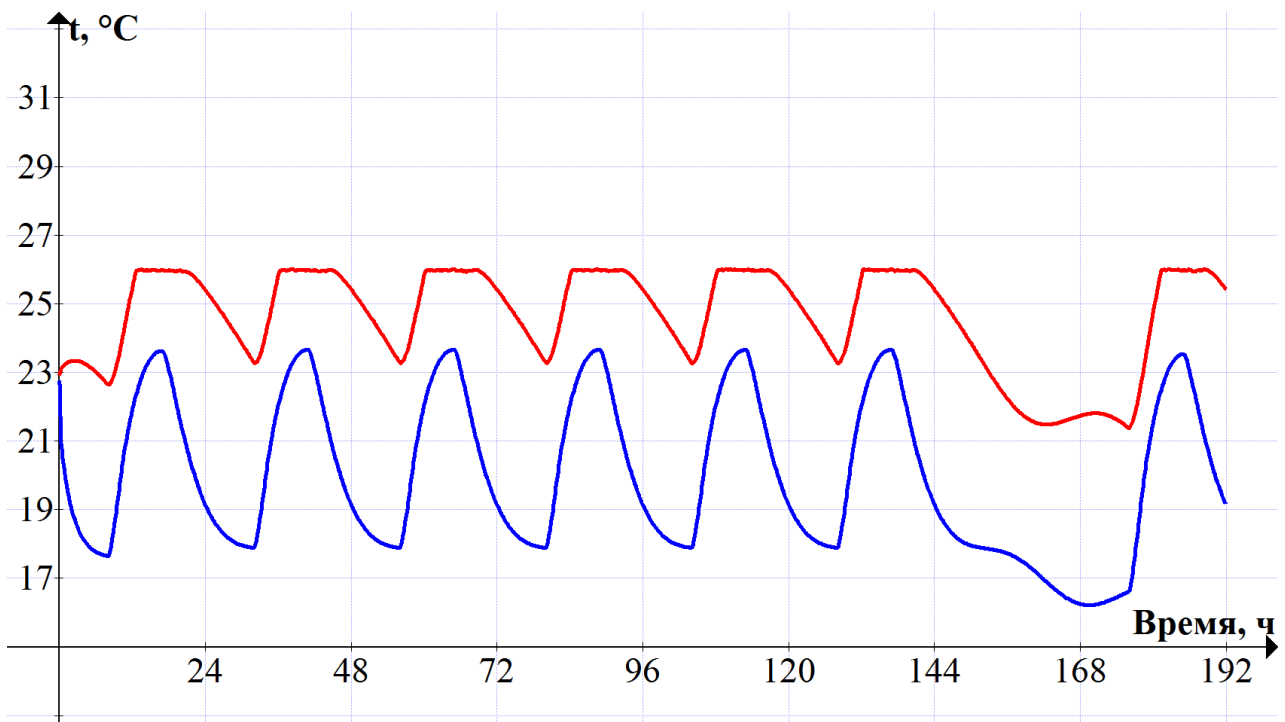


Рисунок 4.12– Температура на лестничной клетке и в лифтовой шахте при  $t_{ext}=+8\text{ °C}$

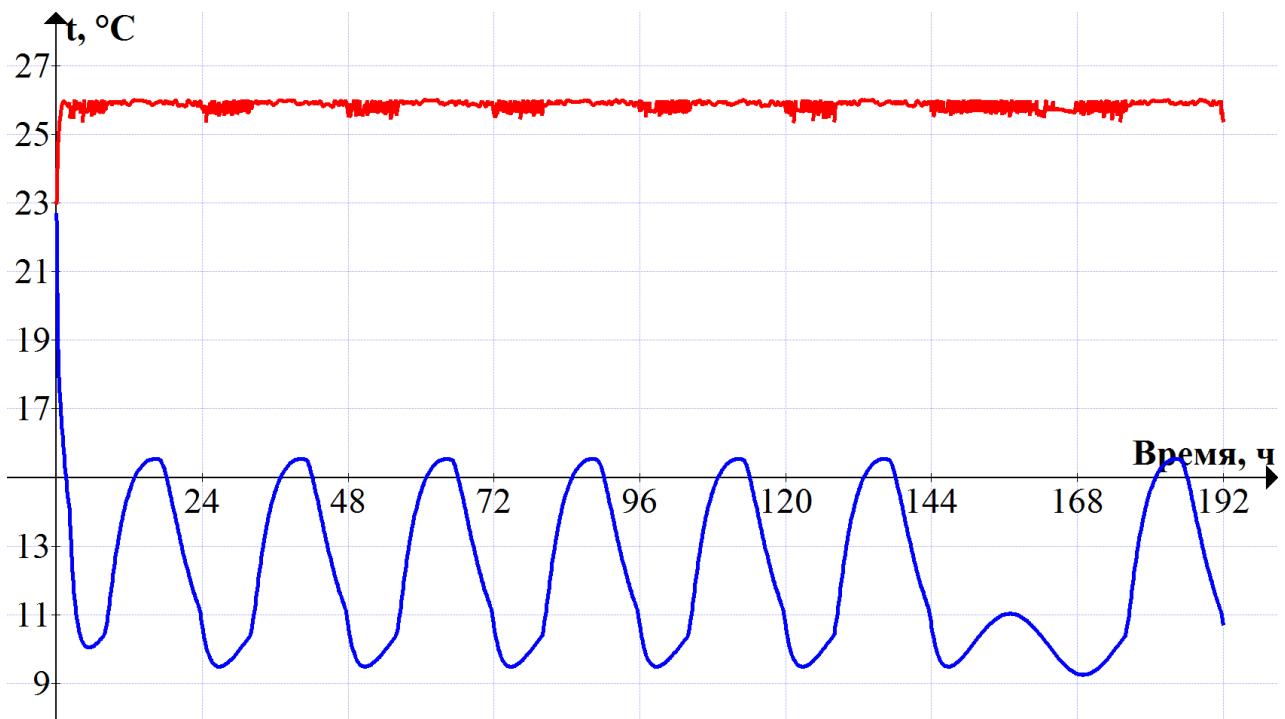


Рисунок 4.13 – Температура на лестничной клетке и в лифтовой шахте при  $t_{ext}=-25\text{ °C}$

На графиках массовых расходов линии одного цвета соответствуют помещениям одного этажа. Соответствие цветов: 1 этаж – красный, 2 этаж – зеленый, 3 этаж – синий, 4 этаж – бирюзовый, 5 этаж – серый, 6 этаж – черный. В верхней части графика содержится по 4 линии каждого цвета. Эти линии соответствуют обитаемым помещениям каждого этажа. Находящиеся чуть ниже группы тонких серых и черных линий описывают изменение расходов по обитаемым помещениям двух верхних этажей. Эти линии располагаются ниже остальных, так как два верхних этажа имеют относительно малое располагаемое давление и вентилируются индивидуальными каналами. Более толстые линии в нижней части графиков показывают изменение расходов воздуха, поступающего через наружные ограждения в помещения санузлов каждого этажа (соответственно цвету этажа). Санузлы не оборудуются приточно-вытяжными устройствами, поэтому свежий воздух поступает в них только через неплотности оконных проемов.

Температурные графики содержат по 8 линий, соответствующих 8 помещениям третьего этажа. Соответствие цветов: помещение №1 – синий, №2 – красный, №3 – бирюзовый, №4 – фиолетовый, №5 – зеленый, №6 – желтый, №7 – коричневый, №8 – черный. Номера помещений указаны на плане здания (рисунок 4.9). Графики для лестничной клетки и лифтовой шахты содержат по две линии. Красная линия соответствует лестничной клетке, синяя – лифтовой шахте. Температура в лифтовой шахте достаточно низкая, так как в ней не установлены отопительные приборы, а подогрев ее происходит только за счет перетока теплого воздуха и теплопередачи через внутренние стены.

Как видно из графиков, предлагаемый графоаналитический метод позволяет подбирать такие заполнения приточно-вытяжных устройств, которые будут обеспечивать нормативный расход воздуха при критических значениях температурных перепадов.

## **Выводы по главе 4**

1. Выполнено моделирование температурных режимов наружного ограждения с воздухопроницаемым элементом. Разработан метод замены температурных полей, позволяющий с большой точностью рассчитать температуру приточного воздуха, формирующуюся при фильтрации.

2. Выполнено моделирование нестационарного воздушно-теплового режима здания при работающей системе гибридной реверсивной вентиляции. По результатам моделирования выполнена валидация графоаналитического метода подбора заполнения воздухопроницаемого проема.

3. Разработаны блоки программы, решающей внутреннюю задачу нестационарного ВТРЗ, позволяющие кратно ускорить работу алгоритма без потери точности.



## Глава 5

### Рекомендации к проектированию систем реверсивной вентиляции

Так как приточно-вытяжные устройства располагаются в наружных ограждениях, то они влияют на тепловую защиту здания. В соответствии с современными строительными нормами при расчете приведенного сопротивления теплопередаче необходимо определять удельные тепловые потоки через теплопроводные включения, к которым можно отнести приточно-вытяжные устройства. Расчет выполняется по методике, изложенной в [20], впоследствии принятой в СП 50. 13330. 2012 Тепловая защита зданий. Расчет проводится для конструкции ограждения, приведенной в п. 4.1 главы 4 настоящей работы.

#### **5.1 Оценка возможности применения воздухопроницаемых проемов с пористым заполнением с точки зрения современных требований к тепловой защите**

Расчет начинается с выделения из фрагмента наружного ограждения отдельных элементов, их классификации (плоские, линейные, точечные) и определения проекций этих элементов на плоскость ограждающей конструкции. Пористая вставка является элементом системы вентиляции, поэтому тепловой поток, условно проходящий через проем, содержит не только трансмиссионную, но и вентиляционную составляющую. Учет вентиляционных тепловых затрат приведет к достаточно большим удельным тепловым потокам через этот элемент, и, следовательно, к заниженной результирующей величине приведенного сопротивления теплопередаче и неправильному подбору толщины тепловой изоляции, поэтому предлагается разделить теплотери через приточную вставку на трансмиссионные и вентиляционные.

В традиционной постановке данной задачи тепловой поток направлен от внутренней поверхности ограждения к наружной. При этом, если ограждение является воздухопроницаемым, инфильтрующийся воздух движется в направлении, противоположном трансмиссионному тепловому потоку. В таких обстоятельствах возникает «экономайзерный эффект». Он заключается в

подогреве воздуха указанным тепловым потоком и, как следствие, частичном возврате теплоты внутрь здания. Доля возвращенного теплового потока при инфильтрации в некоторых наружных ограждениях может достигать 18% [41, 4]. При использовании регенеративных пористых насадок с реверсивным вентилятором аналогичный эффект может достигать уже 90%. Процент утилизации теплоты может повышаться вплоть до 100%, когда инфильтрующийся воздух полностью ассимилирует тепловой поток, движущийся через воздухопроницаемую часть ограждения. В общем случае процент тепловой утилизации зависит от температуры наружной поверхности ограждения. Если эта температура выше температуры наружного воздуха и инфильтрация отсутствует, то «экономайзерный эффект» не наблюдается; при таком же соотношении температур и наличии инфильтрации эффективность теплоутилизации больше нуля; в случае, когда из-за интенсивного конвективного теплообмена температура поверхности сравнивается с температурой наружного воздуха, тепловая утилизация максимальна и эффект равен 100%. Равенство температур свидетельствует об отсутствии трансмиссионного теплового потока ассимилированного в результате конвективного теплообмена. Рассматриваемый поток теплоты через воздухопроницаемый фрагмент ограждения можно определить как

$$Q_{mn} = \alpha_n A (t_n - t_{усл}). \quad (5.1)$$

Пусть в отсутствие инфильтрации температура на наружной поверхности ограждения равна  $t'_{усл}$ . При постепенном увеличении количества фильтруемого воздуха  $t'_{усл}$  начнет приближаться к  $t_n$ , а  $Q'_{mn}$  станет уменьшаться вплоть до 0, что будет свидетельствовать о растущей теплоутилизации. Долю теплоты, переданную на нагрев воздуха можно определить как

$$\Delta = \frac{Q'_{mn} - Q_{mn}}{Q'_{mn}} = \frac{(t_n - t'_{усл}) - (t_n - t_{усл})}{t_n - t'_{усл}} = \frac{t_{усл} - t'_{усл}}{t_n - t'_{усл}}. \quad (5.2)$$

В расчетах температурных полей ограждения, приведенных ранее видно, что фронт низких температур сдвинут глубоко внутрь ограждения даже при малых скоростях движения воздуха в порах, поэтому процент утилизации теплоты

можно принять равным 100% и считать, что трансмиссионные теплотери в данных элементах отсутствуют. Если в таких условиях выполнить идеальную тепловую и паровую изоляцию проема и обеспечить в нем расход воздуха, не превышающий нормативных значений, станет понятно, что он не нарушает теплозащитных свойств наружного ограждения, а значит, никак не влияет то, что в современных терминах называется тепловой защитой здания. Однако если ограничить расход воздуха регулирующим устройством и пароизолировать вставку не составляет большого труда, то полностью нивелировать искривление температурного поля вблизи ее периметра невозможно. Следуя методике [20, 63] по существу не важно какое именно теплопроводное включение является возмущителем температурного поля, поэтому любое включение может быть заменено на эквивалентное по величине теплового потока. В частности это утверждение справедливо потому, что при расчете удельных тепловых потоков все включения рассматриваются независимо друг от друга. На этом основании предлагается заменить плоский элемент (вставку) на линейный элемент (откос вставки) и следующим образом формализовать решаемую задачу:

- условно предположить, что возмущение температурного поля в области стены, прилегающей к периметру вставки создается исключительно самим стыком вставки и наружного ограждения,
- не рассматривать пористую вставку как плоский элемент, а периметр вставки классифицировать как линейный элемент, и определять удельные тепловые потоки через него на основании расчетов двумерного температурного поля,
- так как периметр вставки имеет прямоугольную геометрию, то области, находящиеся вблизи углов этого прямоугольника, испытывают дополнительное тепловое воздействие смежных сторон откоса вставки. Предлагается рассматривать их как точечные элементы и рассчитывать дополнительные тепловые потоки с использованием трехмерных температурных полей,
- в случае, когда теплоутилизационный эффект отличен от 100% вставка рассматривается как плоский элемент, но учету подлежит только неассимилированный фильтрацией трансмиссионный тепловой поток.

## 5.2 Определение удельных тепловых потоков через элементы воздухопроницаемого проема

В рамках исследования расчету подлежат:

- удельные тепловые потоки через линейные элементы периметра вставки,
- удельные тепловые потоки через угловые элементы периметра вставки.

Общая формула для определения приведенного сопротивления теплопередаче для ограждающей конструкции с теплопроводными включениями

$$R^{np}_o = \frac{t_g - t_n}{\left(\sum \Delta Q_m\right) / A} = \frac{1}{\left(\sum \frac{\Delta Q_m}{t_g - t_n}\right) / A} = \frac{1}{\left(\sum \frac{\Delta Q_i}{(t_g - t_n) S_i} + \sum \frac{\Delta Q_j}{(t_g - t_n) L_j} + \sum \frac{\Delta Q_k}{(t_g - t_n) N_k}\right) / A}$$

где  $\sum \Delta Q_m$  – сумма тепловых потоков через все элементы, составляющие рассматриваемый фрагмент ограждения, Вт

$A$  – площадь фрагмента, м<sup>2</sup>

$S_i$  – площади проекций плоских элементов на рассматриваемый фрагмент, м<sup>2</sup>

$L_j$  – длина проекций линейных элементов на рассматриваемый фрагмент, м

$N_k$  – количество точечных элементов в рассматриваемом фрагменте, шт.

Выполнив замену

$$U_i = \sum \frac{\Delta Q_i}{(t_g - t_n) S_i}, \quad \Psi_j = \sum \frac{\Delta Q_j}{(t_g - t_n) L_j}, \quad K_k = \sum \frac{\Delta Q_k}{(t_g - t_n) N_k},$$

получим

$$R_o^{np} = \frac{1}{\sum U_i \frac{S_i}{A} + \sum \Psi_j \frac{L_j}{A} + \sum K_k \frac{N_k}{A}}, \quad (5.4)$$

или

$$R_o^{np} = \frac{1}{\sum U_i s_i + \sum \Psi_j l_j + \sum K_k n_k}, \quad (5.5)$$

где  $s_i = \frac{S_i}{A}$ ,  $l_j = \frac{L_j}{A}$ ,  $n_k = \frac{N_k}{A}$ .

Последние величины принято называть удельными геометрическими показателями.

Удельный поток теплоты через линейный элемент определяется по формуле

$$\Psi_j = \frac{\Delta Q_j^L}{t_g - t_n}, \quad (5.6)$$

где  $\Delta Q_j^L$  – дополнительный тепловой поток, обусловленный данным линейным элементом, приходящийся на 1 п. м. этого элемента, Вт/м, определяемый по формуле

$$\Delta Q_j^L = Q_j^L - Q_{j,1}^L \quad (5.7)$$

где  $Q_j^L$  – поток теплоты через участок фрагмента, содержащего данный элемент, приходящийся на 1 п. м. этого элемента, Вт/м, получаемый в результате температурного расчета ограждения,  $Q_{j,1}^L$  – поток теплоты через тот же участок, не содержащий этого элемента, Вт/м, определяемый по формуле

$$Q_{j,1}^L = \frac{t_g - t_n}{R_{0,j,1} \cdot b} S_{j,1}, \quad (5.8)$$

где  $b$  – протяженность расчетной области при расчете двумерного температурного поля в направлении, перпендикулярном сечению, м,  $S_{j,1}$  – площадь плоского элемента, вошедшего в расчетную область, м<sup>2</sup>.

Удельный поток теплоты через точечный элемент можно определить как

$$K_k = \frac{\Delta Q_k}{t_g - t_n}, \quad (5.9)$$

где  $\Delta Q_k$  – дополнительный поток теплоты через рассматриваемый точечный элемент, Вт, определяемый по формуле

$$\Delta Q_k = Q_k - \tilde{Q}_k, \quad (5.10)$$

где  $Q_k$  – поток теплоты через плоский фрагмент, содержащий рассматриваемый точечный элемент, Вт, определяемый по результатам расчета трехмерного температурного поля,  $\tilde{Q}_k$  – тепловой поток через тот же фрагмент, не содержащий точечного элемента, Вт

$$\tilde{Q}_k = \frac{t_g - t_n}{R_{0,k}} S_k, \quad (5.11)$$

где  $S_k$  – площадь однородного заполнения, вошедшего в расчетную область при расчете температурного поля,  $\text{м}^2$ .

Определение удельных тепловых потоков невозможно без расчета температурных полей, причем для линейных элементов необходим двумерный расчет, а для точечных – трехмерный (рисунки 5.2-5.11). При точном решении задачи для боковых сторон периметра вставки удельные тепловые потоки будут одинаковы, однако они будут отличаться от удельных тепловых потоков через горизонтальные участки периметра. Это отличие возникает вследствие того, что горизонтальный размер вставки относительно велик, что не позволяет противоположным ее торцам влиять друг на друга. При небольших высотах вставки ее верхняя и нижняя стороны испытывают взаимовлияние, что необходимо учитывать при точном решении, однако в рамках текущего исследования это влияние не считается значительным. Геометрические модели рассчитываемых областей приведены на рисунке 5.1.

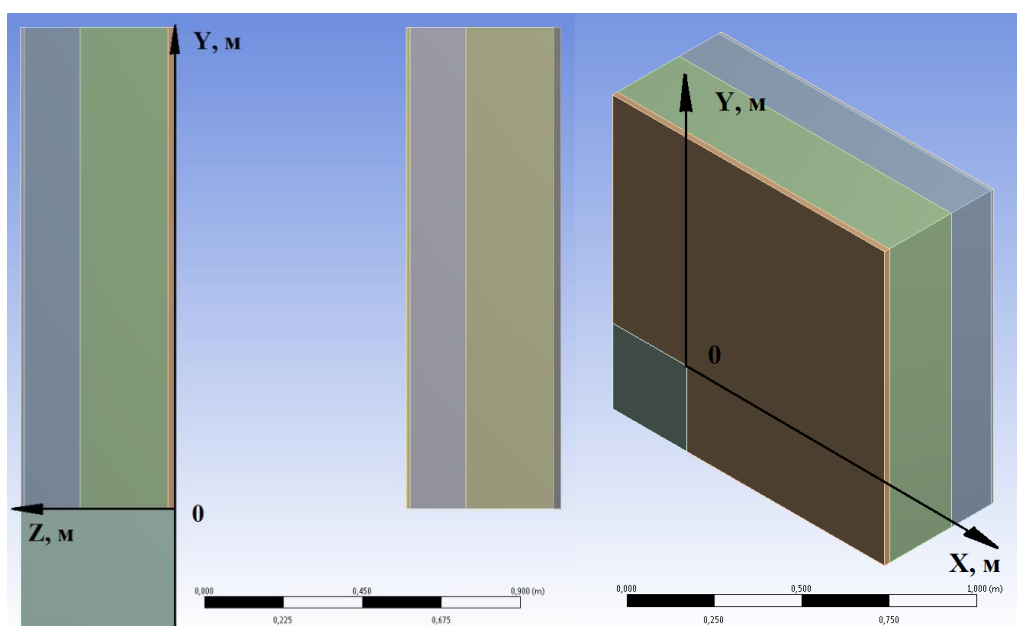


Рисунок 5.1– Геометрия расчетной области многослойной стены со вставкой и без нее при определении удельных тепловых потоков

Ниже приводятся температурные профили на внутренней поверхности глади ограждения вблизи горизонтальной стороны вставки в зависимости от скорости движения воздуха в порах.

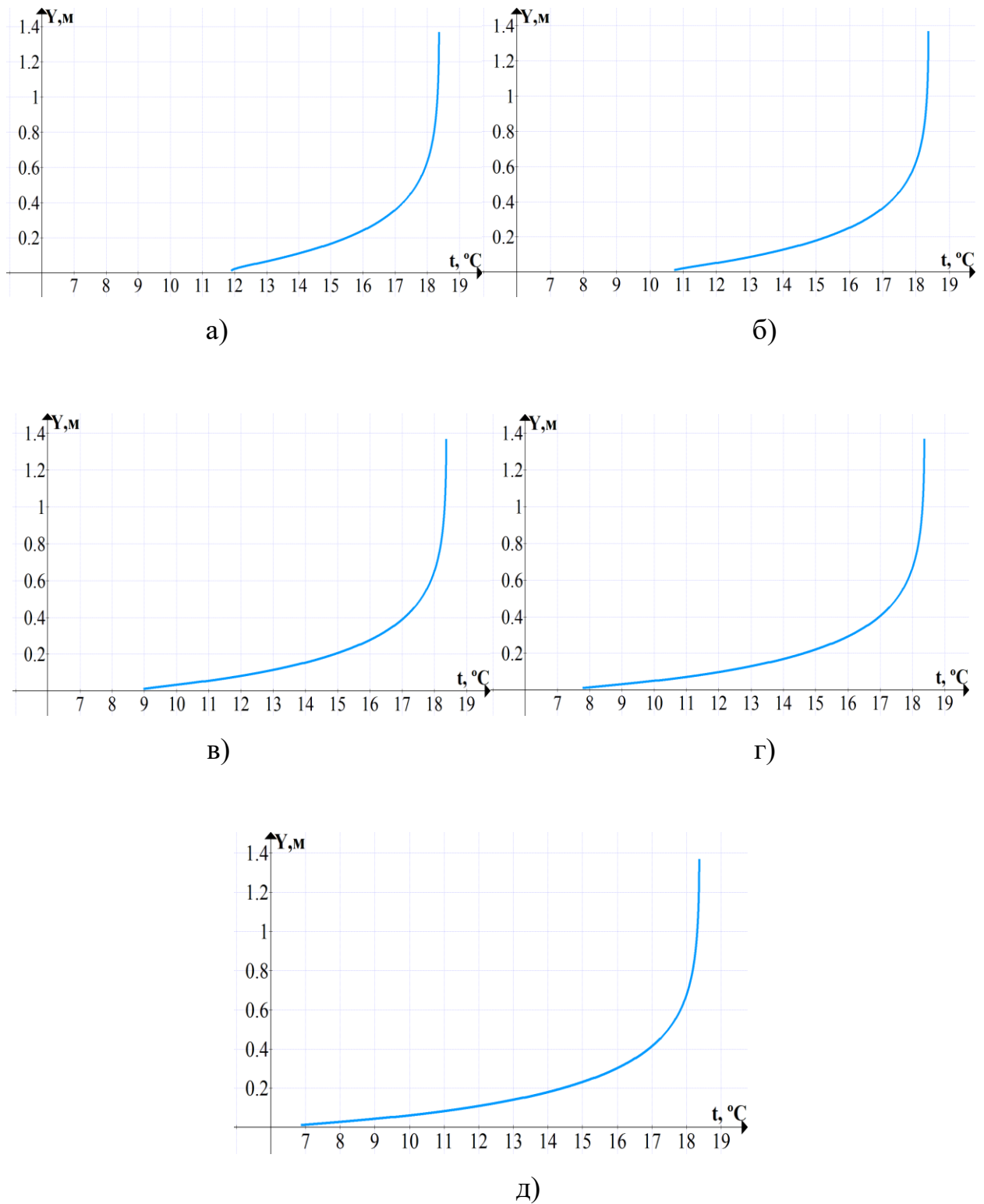


Рисунок 5.2 Температурное поле вдоль края вставки. а –  $w_f=0,01$  м/с; б –  $w_f=0,015$  м/с; в –  $w_f=0,02$  м/с; г –  $w_f=0,025$  м/с; д –  $w_f=0,03$  м/с.

Ниже представлены графики, показывающие изменение температуры на внутренней поверхности ограждения вблизи угла вставки.

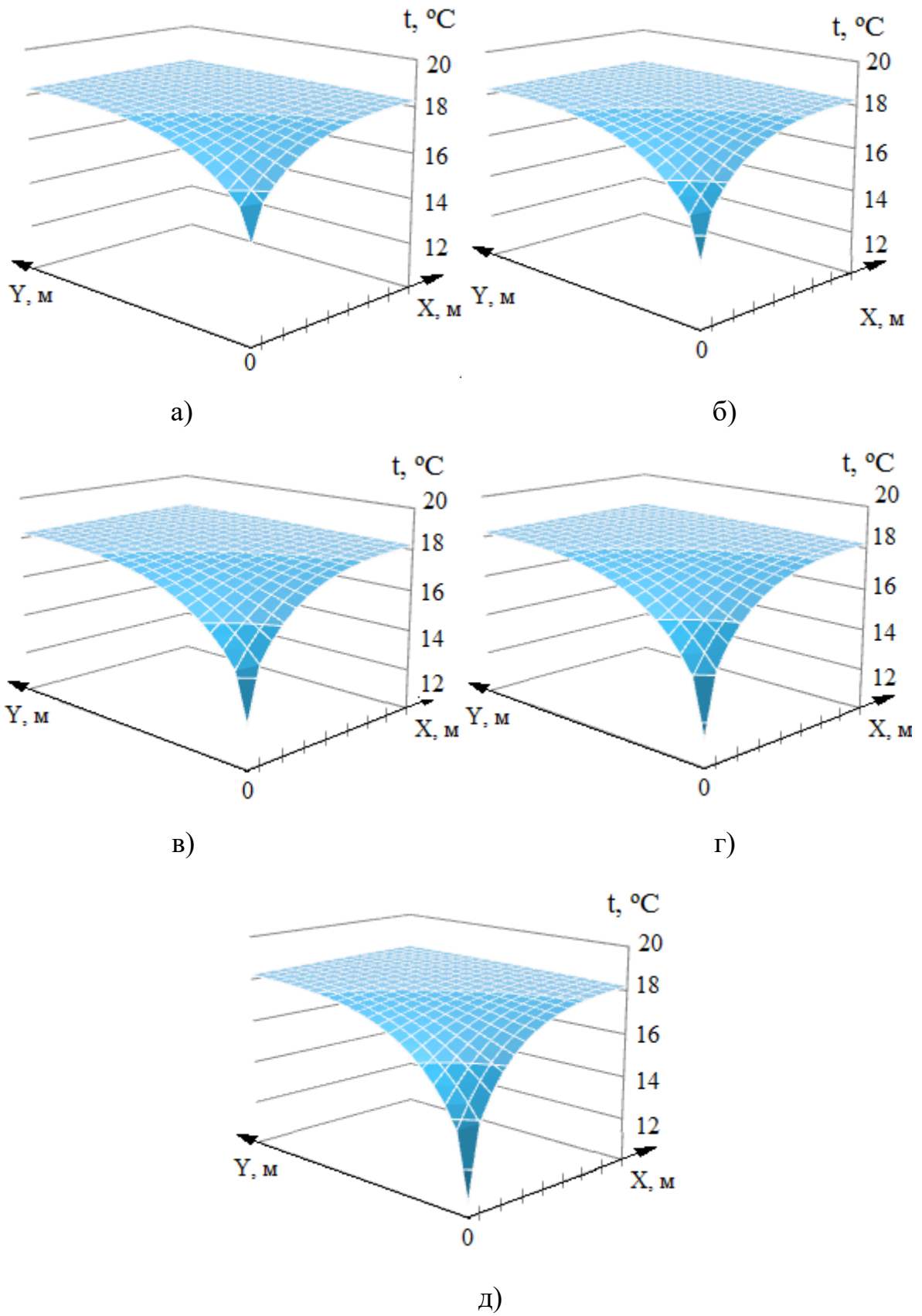


Рисунок 5.3 Температурное поле вблизи угла вставки. а –  $w_f=0,01$  м/с; б –  $w_f=0,015$  м/с; в –  $w_f=0,02$  м/с; г –  $w_f=0,025$  м/с; д –  $w_f=0,03$  м/с.



На представленных графиках (рисунок 5.2) для расчетной модели линейного элемента нуль по  $Y$  совмещен с верхним углом вставки; для модели углового элемента (рисунок 5.3) точка с наименьшей температурой соответствует углу вставки, обращенному в геометрический центр модели. В расчете тепловых потоков через угловой элемент модель, представленная на рис. 5.1 учитывается не полностью (это видно по графикам температур на рисунке 5.3). С одной стороны это позволяет решить поставленную задачу лишь приблизительно, так как зона взаимовлияния откосов вставки несколько больше представленной. С другой стороны взаимовлияние в отброшенной области вызывает меньший дополнительный тепловой поток, чем в случае, если рассматривать действие на эту область только откоса вставки. Вследствие этого получается, что рассмотренная расчетная схема дает результат с небольшим запасом и может применяться для ориентировочных расчетов.

Тепловой поток, возникающий в плоской модели со вставкой, определялся как площадь криволинейной трапеции под графиком температуры (основание трапеции при этом находится на отметке  $t_n$ ), умноженной на коэффициент теплоотдачи ограждения. Дополнительный тепловой поток определялся разностью между потоками через рассматриваемую область при наличии вставки и ее отсутствии. Удельный тепловой поток получался при делении дополнительного на температурный перепад  $t_6 - t_n$ . Для трехмерной модели выполнялись те же действия с разницей лишь в первом пункте. Там определялась не площадь трапеции, а объем призмы с криволинейным верхним основанием. Зависимость удельных тепловых потоков от скорости движения воздуха в порах представлена на рисунках 5.4, 5.5.

Предлагаемый способ формализации метода расчета удельных тепловых потоков имеет ограниченную область применения, так как он основан на положении об отсутствии трансмиссионного теплового потока через заприборные участки ограждений. Иными словами формализация справедлива пока экономайзерный эффект при инфильтрации равен 100%. В случае меньшего

значения необходимо рассматривать дополнительный тепловой поток через вставку, как через плоский элемент.

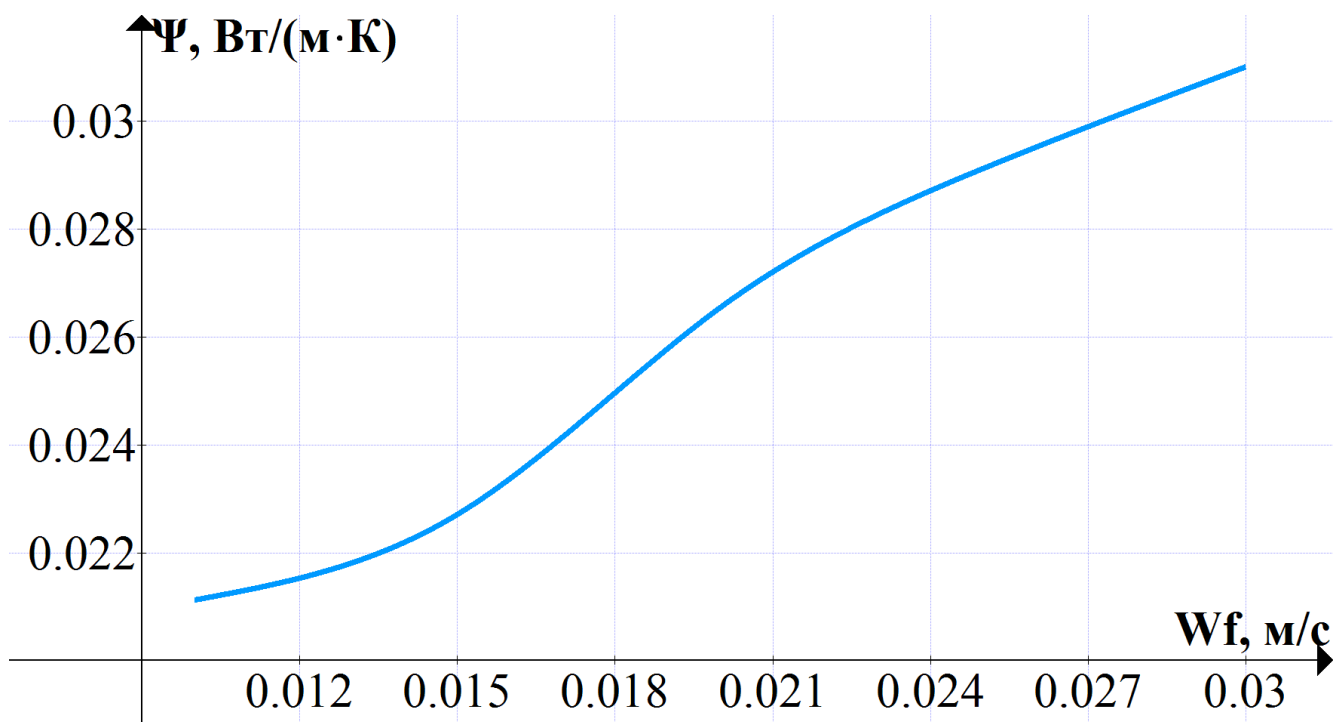


Рисунок 5.4 – Зависимость между удельными тепловыми потоками и скоростью движения воздуха в порах для линейного элемента

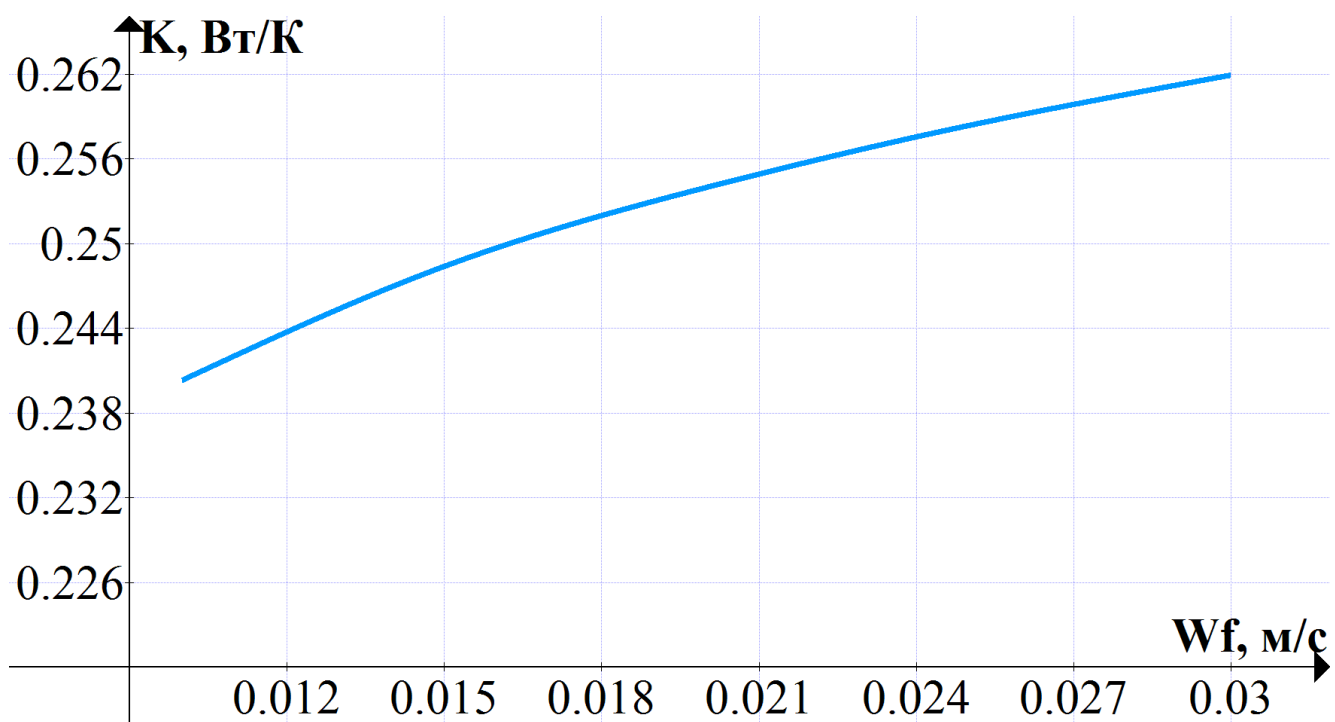


Рисунок 5.5 – Зависимость между удельными тепловыми потоками и скоростью движения воздуха в порах для углового элемента

Учитывая, что и в этом случае охлаждение стены будет вызвано (условно), только стыком вставки и стены, дополнительный поток теплоты через плоский элемент будет равен

$$\Delta Q = Q_{tr} - Q_{вент} ,$$

где

$Q_{tr}$ – трансмиссионный тепловой поток через вставку, без учета фильтрации,

Вт

$Q_{вент}$ – теплотраты на подогрев фильтруемого воздуха, Вт

$$Q_{tr} = \frac{A \cdot \Delta t}{\left( R_n + \frac{\delta_{вст}}{\lambda_{вст}} + R_{вн} \right)}$$

где

$A$ – площадь вставки, м<sup>2</sup>

$R_n, R_{вн}$ – сопротивления теплоотдаче на наружной и внутренней поверхностях ограждения без учета фильтрации, м<sup>2</sup>·К/Вт.

Тогда величина удельного теплового потока выразится как

$$U_{вст} = \frac{\Delta Q}{\Delta t \cdot A} = \frac{1}{R_n + \frac{\delta_{вст}}{\lambda_{вст}} + R_{вн}} - \frac{GC_p}{A} = K_{вст} - \frac{GC_p}{A} ,$$

где

$K_{вст}$ – коэффициент теплопередачи от внутреннего воздуха к наружному через вставку без учета фильтрации, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

### 5.3 Графоаналитический метод подбора заполнения воздухопроницаемого проема

Подбор материала для засыпки нужно осуществлять не только по теплотехническим и теплофизическим характеристикам, но и характеристикам пористости. Для правильного подбора этих характеристик предлагается графоаналитический метод. Этот метод не рассматривает все многообразие

параметров пористой среды в их сложной взаимосвязи, а использует лишь одну важнейшую характеристику, к которой, в данном контексте, сводятся все остальные. Этой ключевой характеристикой представляется зависимость между перепадом давления и расходом воздуха, движущимся через образец пористого материала. Как известно эта зависимость имеет степенной вид

$$L = m(\Delta p)^n, 1 < n < 2, \quad (5.23)$$

где

$L$  – объемный расход воздуха, м<sup>3</sup>/ч

$\Delta p$  – перепад давления, Па.

В контексте исследования  $\Delta p$  это давление, которое тратится на преодоление сопротивления вставки. Полное давление, создающее циркуляцию в естественном режиме работы реверсивной вентиляции, называется располагаемым давлением. Вследствие того, что располагаемое давление для всех этажей здания различно, заполнение вставки также будет меняться от этажа к этажу. В верхней части здания проемы будут заполняться более воздухопроницаемыми материалами, в нижней – менее воздухопроницаемыми. Располагаемое давление тратится на преодоление сопротивления вставки и системы воздуховодов от рассматриваемого этажа до устья вентиляционной шахты. Его величина меняется во времени, поэтому без соответствующей регулировки значение расхода воздуха через вставку будет иметь колебательный характер.

Определять заполнение проема предлагается по следующему алгоритму:

1. для каждого этажа проектируемого объекта определяется располагаемое давление при температуре наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 и температуре +8 °С,
2. из располагаемых давлений вычитаются потери в вентиляционной сети от помещения до устья вытяжной шахты. Долю потерь, приходящуюся на преодоление сопротивления вставки, предлагается принимать как можно

большой в целях повышения гидравлической устойчивости системы. Потери в системе вентиляции зависят от диаметров воздуховодов, размеры которых предлагается выбирать исходя конструктивно-планировочных или иных требований,

3. результирующие давления откладываются по оси перепадов давлений в системе координат  $L-\Delta p$  (см. рисунок 5.6),
4. на ось объемных расходов воздуха наносится величина расхода через единицу площади вставки ( $100 \text{ м}^3/\text{ч}$  в качестве примера),
5. определяется положение точки 1,
6. из экспериментальной базы данных выбираются материалы, засыпки из которых имеют зависимость  $L(\Delta p)$ , проходящую через точку 1 или над ней (см. рисунок 5.6) при толщине наружного ограждения,
7. в случае если по пункту 6 подходящими являются несколько материалов, то выбирается тот, характеристика сопротивления которого будет наиболее крутой (нижняя линия на рисунке).

Расстояния  $S1$  и  $S2$  показывают максимальный объем воздуха, который придется регулировать клапаном для вставки, наполненной засыпкой с соответствующей характеристикой сопротивления. Теоретически показатель степени  $n$  может принимать значения от 1 до 2. С точки зрения простоты регулировки необходимо, чтобы кривизна характеристики была максимальной, что обеспечивается наибольшей величиной  $n$ . Само собой, что для использования данного метода необходимо сформировать базу данных, содержащую необходимые характеристики, что не является проблемой при современном уровне развития экспериментальной науки.

До сих пор рассматривалась работа системы вентиляции только под действием температурного напора, однако даже в холодный период года ветровое давление может создавать области разрежения вблизи некоторых приточно-вытяжных устройств, при этом удаляемый воздух поступает в помещения из других помещений, расположенных на наветренном фасаде. Таким образом возникает перерасход воздуха в одних помещениях, а в других наблюдается

эксфильтрация с конденсацией и замерзанием воды в толще ограждения. Для исключения таких явлений необходимо предусматривать регулирующие элементы в конструкции приточно-вытяжного устройства.

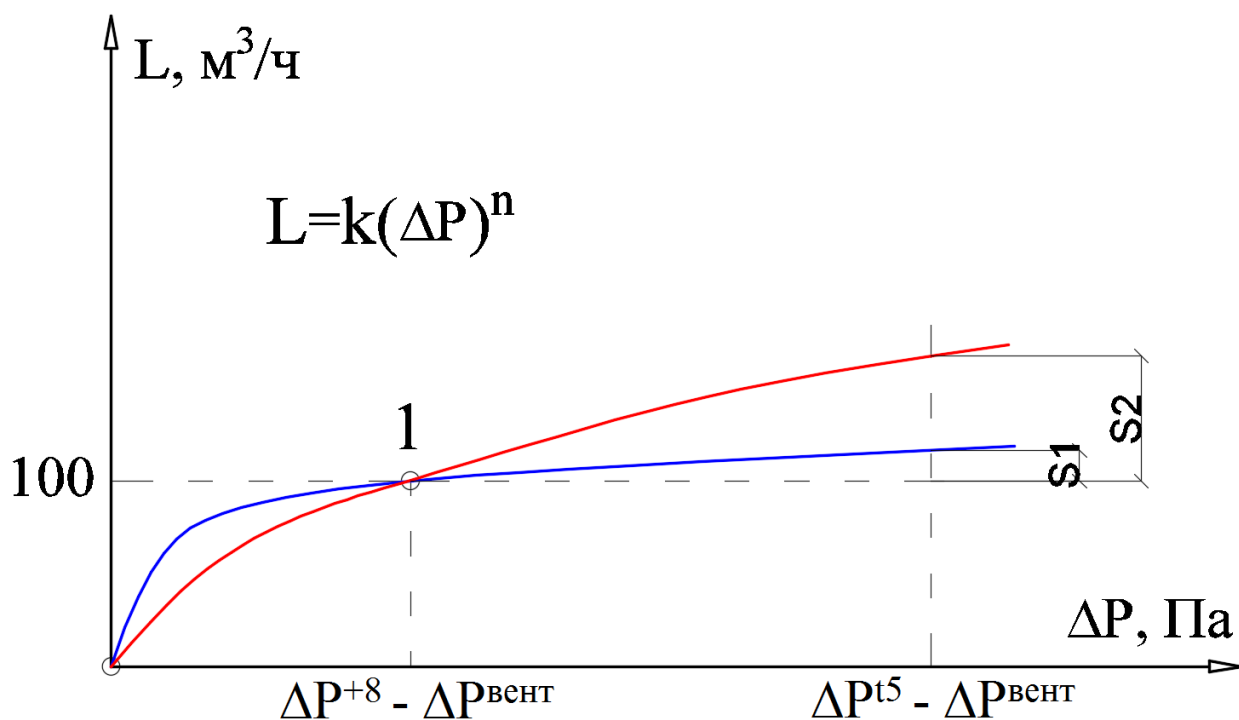


Рисунок 5.6— Пример использования графоаналитического метода

Валидация предлагаемого метода на примере административного здания рассмотрена в главе 4 настоящей работы.

#### 5.4 Комплексная методика применения воздухопроницаемых проемов с пористым заполнением

Вопрос корректного использования воздухопроницаемых проемов пока остается открытым, так как не выявлен порядок действий при расчете всех неизвестных этой задачи. Данный пункт ставит целью устранение этой неопределенности.

Для начала перечислим исходные данные и все неизвестные величины, подлежащие определению. К исходным данным относятся:

1. объемный или массовый расход воздуха через один проем,  $L(G)$ ,
2. величина располагаемого давления для проема (соответствует располагаемому давлению этажа, но перепад высот измеряется от геометрического центра вставки),  $\Delta p$ ,
3. температуры наружного воздуха и притока для помещения с рассматриваемым проемом,  $t_n, t_n$ ,

Определяемыми будут следующие величины:

1. диаметр сфер в засыпке,  $d$ ,
2. скорость движения воздуха в порах материала,  $w_f$ ,
3. коэффициент теплопроводности материала вставки,  $\lambda_s$ ,
4. площадь поверхности пор,  $A_{fs}$ ,
5. площадь вставки,  $A$ ,
6. перепад температур на наружной и внутренней сторонах ограждения,  $\Delta T$ ,

Количество определяемых параметров довольно велико и в любом случае всегда будут находиться их различные комбинации, дающие близкий результат. По этой причине затруднительно вводить какие-либо конкретные ограничения на тот или иной параметр и далее речь пойдет больше об их сочетаниях.

Для подбора заполнения воздухопроницаемого проема необходимо решить две задачи: аэродинамическую и теплотехническую, то есть подобрать такое заполнение, которое будет удовлетворять и аэродинамическим и теплотехническим требованиям. Аэродинамическое требование подразумевает способность подобранной вставки обеспечивать требуемый воздухообмен под действием естественных сил при температуре наружного воздуха  $+8^\circ\text{C}$ . Теплотехническое требование подразумевает способность вставки обеспечивать необходимую температуру притока. Эти задачи решаются отдельно, начиная с аэродинамической.

Изначально неизвестна площадь вставки. Так как необходим равномерный прогрев всего воздушного потока, то отопительный прибор должен полностью перекрывать вставку во фронтальной проекции, поэтому ее площадь должна быть

не меньше площади отопительного прибора. Положение характеристики сопротивления засыпки в осях  $L-\Delta p$  зависит от диаметра пор, который принимается равным диаметру зёрен. Таким образом для решения аэродинамической задачи достаточно подобрать только диаметр пор. Делается это с использованием расчетных уравнений (например уравнения Эргуна) или по результатам экспериментальных исследований аэродинамики пористого материала. Целью является подбор такого диаметра зёрен, при котором характеристика сопротивления пройдет через точку 1 (рисунок 5.14) или выше нее. Зная расход воздуха (определяемый по санитарной норме) и площадь пористой вставки, а также считая, что пористость засыпки приблизительно равна 0,385 (см. п. 4.1) определяется скорость воздуха в порах

$$w_f = \frac{G}{3600A\gamma\rho}.$$

Решение теплотехнической задачи подразумевает предварительное определение режима фильтрации. При ламинарном течении в пористом материале считается, что распределения температур структуры и фильтрующегося воздуха совпадают. Соответствующее ламинарному режиму дифференциальное уравнение, описывающее данные температурные поля, выглядит так

$$\lambda \cdot (1 - \gamma) \cdot \nabla^2 t - C_{\epsilon} \rho_{\epsilon} w_f \cdot \nabla t = 0.$$

А. В. Лыковым был использован критерий подобия, называемый числом охлаждения, представляемый в виде

$$Kn = \frac{C_{\epsilon} \rho_{\epsilon} w_f \delta}{\lambda(1 - \gamma)}.$$

Эта величина описывает характер распределения температуры внутри плоской пластины при наличии ламинарной фильтрации. При значениях  $Kn < 1$  наблюдается распределение температуры близкое к линейному, что оптимально [64] с точки зрения минимизации тепловых потоков через прилежащие к вставке области ограждения. Поэтому при выборе параметров вставки рекомендуется стремиться к формированию в ней ламинарного режима течения и линейного распределения температур.



Теплопроводность материала засыпки определяется как

$$\lambda = \frac{C_s \rho_s w \delta}{1 - \gamma}.$$

Вследствие малых скоростей в порах максимальный расход воздуха, который может пропускать такая засыпка, сильно ограничен. Для расширения области применения воздухопроницаемых элементов необходимо рассмотреть также области инерционного и турбулентного течения. В этом случае необходимо пользоваться графиками из приложений Б и В. Сначала по известным  $d$  и  $w$  определяются такие сочетания  $\Delta T$  и  $\lambda_s$ , которые способствуют формированию условно линейного температурного поля структуры. Для выбранных значений рассчитывается температура приточного воздуха по формуле 4.7. Погрешность, допущенная при использовании этой формулы, определяется по графикам приложения В. Выполнением этих действий определяются сочетания теплотехнических и фильтрационных параметров, при которых температура притока будет удовлетворять санитарной норме. Выбор конкретной комбинации параметров остается за проектировщиком, который может опираться на экономический фактор или другие уместные ограничения. Далее необходимо воспользоваться методикой из пункта 5.2 для расчета удельных тепловых потоков через периметр вставки или найти ранее вычисленные значения в нормативных документах.

## Заключение

### Итоги выполненного исследования

1. Исследован стационарный температурный режим наружного ограждения с воздухопроницаемым элементом при фильтрации в нём холодного воздуха. Получены зависимости между теплотехническими характеристиками ограждения, параметрами фильтрационного процесса и температурными полями, формирующимися в ограждении.
2. Разработана физико-математическая модель воздушно-теплого режима административного здания с действующей системой гибридной реверсивной

вентиляции. На основании данной модели исследованы режимы работы такой системы.

3. Разработан модифицированный программный код для данной модели, использующий матричные операции и адаптивный временной шаг.
4. Подтверждена применимость уравнений фильтрации для описания течений в зернистых средах в определенном диапазоне параметров.
5. Разработан метод расчета удельных тепловых потоков для случая воздухопроницаемых теплопроводных включений.
6. Разработан метод замены температурных полей, позволяющий с большой точностью рассчитать температуру приточного воздуха и подобрать заполнение воздухопроницаемых элементов для любых режимов фильтрации. Разработаны рекомендации к проектированию систем гибридной реверсивной вентиляции.

#### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы**

Разработка конструктивных решений приточно-вытяжных устройств, модификация трассировки воздуховодов. Конструирование отопительных приборов, обеспечивающих оптимальный температурный режим наружного ограждения.

## Список сокращений и условных обозначений

$p$  – давление, Па

$\mu$  – динамическая вязкость, Па·с

$k$  – проницаемость, м<sup>2</sup>

$G$  – массовый расход, кг/с

$\gamma$  – пористость

$A$  – площадь, м<sup>2</sup>

$w$  – скорость, м/с

$\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>

$d$  – диаметр, м

$R$  – термическое сопротивление, м<sup>2</sup>·К/Вт

$R_{и}$  – сопротивление воздухопроницанию, [м<sup>2</sup>·ч·(Па)<sup>n</sup>]/кг

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>

$l$  – линейный размер, м

$L$  – объемный расход, м<sup>3</sup>/с

$Q$  – тепловой поток, Вт

$a$  – температуропроводность, м<sup>2</sup>/с

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$\delta$  – толщина, м

$T, t$  – температура, К или °С

$C$  – массовая теплоемкость, Дж/(кг·К)

$K_{loss}$  – коэффициент квадратичных потерь, м<sup>-1</sup>

$i$  – воздухопроницаемость, кг/[м<sup>2</sup>·ч·(Па)<sup>n</sup>]

$H$  – энтальпия, Дж/кг

$S_k$  – функция тепловых источников и стоков, Вт

$V$  – объем, м<sup>3</sup>

$S$  – характеристика сопротивления

$\zeta$  – коэффициент местного сопротивления

$f$  – площадь живого сечения, м<sup>2</sup>

$\gamma$  – коэффициент гидравлического трения

$\sigma$  – абсолютная шероховатость материала, м

$\nu$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с

Re – число Рейнольдса

Nu – число Нуссельта

Pr – число Прандтля

$\tau$  – время, с

$S_i$  – площади проекций плоских элементов на рассматриваемый фрагмент, м<sup>2</sup>

$L_i$  – длина проекций линейных элементов на рассматриваемый фрагмент, м

$N_k$  – количество точечных элементов в рассматриваемом фрагменте, шт

K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

P – периметр, м

Индексы:

л – ламинарный

т – турбулентный

см – смешанный

i, j, k, n – счетчики

экв – эквивалентный

и – инфильтрация

R – радиационный

б, int – бытовой

вент, vent – вентиляционный

со, hs – система отопления

тп, hl – трансмиссионные теплотери

осв – искусственное освещение

в – внутренний/воздух

н, ext – наружный

к – конвективный/контактный

ф – фильтрация

усл – условный

s – твердая структура пористой среды

f – флюид/фильтрат

av – средний

5 – пятидневка

eq – оборудование

object – целевой

tr – трансмиссионный (относится к смежным помещениям)

ref – приведенный

dyn – динамический

current – текущий

lim – пороговый

next – следующий шаг

spec – удельный

p – изобарный

ст – стена

вст – вставка

доп – дополнительный

## Список литературы

1. Аравин, В. И. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде: монография/ В. И. Аравин, С. Н. Нумеров; [параграфы 135, 136 и 141-144 главы 12 написаны Н. И. Дружининым].– М: Гос. изд. теоретико-тех. лит., 1953.– 616 с.
2. Артемов, М. Д. К вопросу воздухопроницаемости ограждающих конструкций /М. Д.Артемов // Тепловой режим. Теплоизоляция и долговечность зданий.– 1981.– С. 51-55.
3. Беляев, В. С. Теплопередача в наружных стенах при продольной фильтрации воздуха /В. С. Беляев // Теплотехнические свойства и микроклимат жилых зданий. – 1982. – С. 18-22.
4. Береговой, А. М. Эффект энергосбережения в помещении с естественной вентиляцией в условиях инфильтрации воздуха через наружную стену / А. М. Береговой, А. В. Мальцев, М. А. Дерина, А. В. Гречишкин // Региональная архитектура и строительство.– 2013. – №3. – С. 140-144.
5. Строительная теплофизика: монография / В. Н. Богословский. – М.:Изд. Высшая школа, – 415 с.
6. Бондаренко, Н. Ф. Физика движения подземных вод : монография /Н. Ф. Бондаренко.– М.:Гидрометеиздат, 1973.– 216 с.
7. Брилинг, Р. Е. Воздухопроницаемость ограждающих конструкций и материалов: монография / Р. Е.Брилинг. – М.:Стройиздат, 1948. – 103 с.
8. Бутцев, Б.И. Гигрорегулируемая вентиляция "Аэрэко" - инструмент комфорта и энергосбережения в жилых домах /Б.И. Бутцев// Жилищное строительство. – 2001. – №3. – С. 71-72.
9. Валов, В.М. Животноводческие здания с воздухопроницаемыми ограждающими конструкциями: монография / В. М. Валов.– Омск : 1986.–92 с.
10. Валов, В. М. Пути использования воздухопроницаемых ограждающих конструкций в животноводческих зданиях / В. М. Валов // Вопросы механизации животноводства в Западной Сибири.–1983.– С. 37-43.

11. Валов, В. М. Температурно-влажностный режим ограждающих конструкций зданий при фильтрации воздуха: монография / В. М. Валов, Г. А. Пахотин. –Омск: СибАДИ, 1982. – 95 с.
12. Валов, В. М. Теплофизические основы проектирования тонкостенных оболочек с воздухопроницаемым слоем утеплителя / В. М. Валов, А. Д. Кривошеин // Известия ВУЗов. Строительство.–1994. – №12. – С. 107-113.
13. Варапаев, В.Н. Математическое моделирование комбинированного теплообмена при естественной конвекции воздуха в незамкнутых областях /В.Н. Варапаев // Вестник МГСУ. –2010. –№ 1. – С. 248-254.
14. Варапаев, В.Н. Численное моделирование стационарного воздушно-теплового режима многоэтажных зданий с естественной системой вентиляции / В.Н.Варапаев, Е.Х. Китайцева, И.В. Шабашвили // Вестник МГСУ.– 2011.– № 8. –С. 122-128.
15. Варапаев, В.Н. Экспериментальное и численное моделирование трехмерных турбулентных течений в вентилируемом помещении /В.Н.Варапаев, С.А.Дорошенко, С.А.Капустин, А.Ю.Троцко// International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. –2015.–Т. 11.– № 2. –С. 79-88.
16. Варапаев, В.Н. Математическое моделирование задач внутренней аэродинамики и теплообмена зданий: монография /В.Н. Варапаев, Е.Х. Китайцева. –Москва: Изд-во Современного гуманитарного университета, 2008.–337 с.
17. Гагарин, В. Г. Учет продольной фильтрации воздуха при оценке теплозащиты стены с вентилируемым фасадом / В.Г. Гагарин, В.В. Козлов, А. В. Садчиков // Промышленное и гражданское строительство.– 2005.–№ 6. – С. 42-45.
18. Гагарин, В. Г. Продольная фильтрация воздуха в современных ограждающих конструкциях / В. Г.Гагарин, В. В.Козлов, А. В.Садчиков, И. А.Мехнецов // АВОК. –2005. –№8. –С. 60-70.

19. Гагарин, В. Г. Использование матричного метода для определения вентиляционной составляющей тепловой нагрузки на систему отопления здания. / В. Г. Гагарин // ПГС. – 2014. – № 7. – С. 21-25.
20. Гагарин, В. Г. Теоретические предпосылки расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций / В. Г. Гагарин, В. В. Козлов // Строительные материалы. – 2010. – № 12. – С. 4-12.
21. Ентов, В. М. Теория фильтрации / В. М. Ентов // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 2. – С. 121-128.
22. Калядин, Ю. А. Исследование влияния внутренней фильтрации воздуха на температурный режим наружных стеновых панелей, утепленных воздухопроницаемыми материалами: монография / Ю. А. Калядин. – М.: 1966. – 156 с.
23. Калядин, Ю. А. Методы учета влияния внутренней фильтрации воздуха на теплотехнические свойства наружных стен, утепленных воздухопроницаемыми материалами / Ю. А. Калядин // Сб. науч. тр. НИИМОССТРОЙ. – 1966. – № 3. – С. 147-155.
24. Каменев, П. Н. Вентиляция: учебник для ВУЗов / П. Н. Каменев, Е. Н. Тертичник. – Москва: Изд-во Ассоц. строит. вузов, 2008. – 614 с.
25. Китайцева, Е. Х. Алгоритм решения задач воздушного режима многоэтажных зданий / Е. Х. Китайцева // Проблемы математики и прикладной геометрии в строительстве. Сб. трудов МИСИ. – 1982. – С. 5-9.
26. Козлов, В. В. Результаты экспериментальных исследований воздухопроницаемости минеральной ваты / В. В. Козлов, И. С. Курилюк // Academia. Архитектура и строительство. – 2009. – № 5. – С. 500-503.
27. Константинова, Е. В. Расчет воздухообмена в жилых и общественных зданиях : монография / Е. В. Константинова. – М.: Стройиздат, 1964.
28. Константинова, Е. В. Воздушно-тепловой режим многоэтажных жилых зданий: монография / Е. В. Константинова. – М.: Изд. лит. по строительству, 1969. – 136 с.



29. Косторнов, А. Г. Проницаемые металлические волокновые материалы: монография / А. Г. Косторнов. – Киев : Техніка, 1983. – 128 с.
30. Кривошеин, А. Д. Производственные сельскохозяйственные здания с воздухопроницаемыми ограждающими конструкциями: теплотехнические основы проектирования: монография / А. Д. Кривошеин. – Омск , 1993.– 200 с.
31. Латышенков, М. А. Разработка методов расчёта и исследование воздушного режима жилых и общественных зданий повышенной этажности: дисс. на соиск. науч. ст. канд. техн. наук: 05.23.03 / М. А. Латышенков– М., 1971.– 196 с.
32. Лейбензон, Л.С. Руководство по нефтепромысловый механике Ч.1. : монография / Л.С. Лейбензон.– М.-Л., 1931.
33. Лейбензон, Л.С. Собрание трудов. Том 3. : монография / Л.С. Лейбензон. - Москва, 1955.
34. Лейбензон, Л.С. Собрание трудов. Том 4. : монография / Л.С. Лейбензон. - Москва, 1955.
35. Леонтьев, Н. Е. Об описании фильтрации при наличии предельного градиента / Н. Е. Леонтьев // Вестник Нижегородского Университета им Н. И. Лобачевского.– 2011.–№ 4-3. – С. 930-931.
36. Леонтьев, Н. Е. Течения в пористой среде вокруг цилиндра и сферы в рамках уравнения Бринкмана с граничным условием Навье / Н. Е. Леонтьев // Известия Российской Академии Наук. Механика жидкости и газа. – 2014. –№ 2. – С. 107-112.
37. Ливчак, И. Ф. Вентиляция многоэтажных жилых зданий : монография /И. Ф. Ливчак, А. Л. Наумов. – М.: АВОК-Пресс, (ОАО Яросл. полигр. комб.), 2005. – 133 с.
38. Лукашевич, С.Б. Курсъ отопленія и вентиляціи преподаваемый въ строительномъ училищѣ / С.Б. Лукашевич. – С-Пб : Гражданскій инженеръ, 1878. – 448 с.
39. Лыков, А. В. Тепло- и массообмен в капиллярно-пористых телах / А. В. Лыков // Сб. Проблемы теплообмена.– 1967. – С. 97-141.

40. Максимова, М. В. Прогнозирование запыления воздухопроницаемых ограждающих конструкций здания : дисс. на соиск. науч. ст. канд. техн. наук: 05.23.03 / М. В. Максимова. – Омск, 2000. – 141 с.
41. Мальцев, А. В. Энергосбережение в многоэтажных жилых зданиях при инфильтрации воздуха через наружную стену / А. В. Мальцев // Новый университет. Серия: технические науки. – 2015. – № 3-4 (37-38). – С. 87-90.
42. Меренков, А. П. Теория гидравлических цепей: монография / А. П. Меренков, В. Я. Хасилев; Отв. ред. М. Г. Сухарев. – М. : Наука, 1985. – 278 с.
43. Неклюдов, А. Ю. Совершенствование методов расчета тепловой нагрузки на системы отопления и вентиляции с учетом влияния теплотехнических неоднородностей оболочки здания: дисс. на соиск. науч. ст. канд. техн. наук: 05.23.03 / А. Ю. Неклюдов. – Москва, 2016. – 154 с.
44. Парфентьева, Н. А. К расчету нестационарного температурного поля в наружных ограждениях зданий с учетом фильтрации воздуха / Е. В. Медведева, Н. А. Парфентьева, В. Н. Титов // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1977. – № 11. – С. 144-148.
45. Пирвердян, А. М. Физика и гидравлика нефтяного пласта: монография / А. М. Пирвердян. – М. : Недра, 1982. – 192 с.
46. Пирвердян, А. М. Нефтяная подземная гидравлика: монография / А. М. Пирвердян. – Баку: Азнефтеиздат, 1956. – 332 с.
47. Полубаринова-Кочина, П. Я. Некоторые задачи плоского движения грунтовых вод: монография / П. Я. Полубаринова-Кочина. – Москва-Ленинград: Изд-во Акад. наук СССР, 1942. – 142 с.
48. Полубаринова-Кочина, П. Я. Гидродинамика и теория фильтрации: избранные труды: монография / П. Я. Полубаринова-Кочина. – Москва: Наука, 1991. – 351 с.
49. Пухкал, В. А. Исследование инерционности отопительных приборов / В. А. Пухкал // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5 – С. 10-19.

50. Пыхачев, Г. Б. Подземная гидравлика: монография / Г. Б. Пыхачев, Р. Г. Исаев.– Москва : Недра, 1973. – 359 с.
51. Разумов, Н. Н. Графоаналитический метод исследования и расчета воздухообмена в зданиях любой объемно-пространственной композиции: дисс. на соиск. науч. ст. канд. техн. наук: 05.23.03 / Н. Н. Разумов.– Москва, 1969. – 136 с.
52. Рымаров, А. Г. Математическая модель процессов распределения примесей в воздухе при неорганизованном поступлении вредных веществ /А. Г. Рымаров // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании. – 2015. –С. 588-591.
53. Рымаров, А. Г. Characteristics of heat-mass exchange modes of mutual influence buildings /А. Г. Рымаров//Естественные и технические науки. – 2013. – №1 (63).– С. 380-382.
54. Рымаров, А. Г. Математическая модель процессов распределения примесей в воздухе при неорганизованном поступлении вредных веществ: дисс. на соиск. науч. ст. канд. техн. наук: 05.23.03 /А. Г. Рымаров.– Москва, 1995.
55. Рымаров, А.Г. Особенности работы воздушных клапанов в окнах в квартире жилого здания в холодный период года /А.Г. Рымаров, В.В. Смирнов, Д.Н. Зинченко // Сантехника, отопление, кондиционирование. –2008. –№8– С.86 –87.
56. Рымаров, А.Г. Конструкционные особенности централизованной реверсивной вентиляции административных зданий /А.Г. Рымаров, В. Ю. Кравчук // Сантехника, отопление, кондиционирование. –2017. –№12. –С. 86-88.
57. Рымаров, А.Г. Применение сквозных проемов с пористым наполнением для вентиляции помещений /А.Г. Рымаров, В. Ю. Кравчук // Сантехника, отопление, кондиционирование. –2018. –№2. –С.64-66.
58. Рымаров, А.Г. Система реверсивной вентиляции для административных зданий /А.Г. Рымаров, В. Ю. Кравчук // Вестник Дагестанского Государственного Технического Университета.– 2017.–Том 44. №4. –С. 161-169.

59. Рымаров, А.Г. Системы естественной вентиляции жилых зданий, оборудованных окнами с малой воздухопроницаемостью (класс "Г" и выше) /А.Г. Рымаров, В. Ю. Кравчук // Научное обозрение. – 2016.– № 10. –С. 23-26.
60. Рымаров, А.Г. Исследование применения воздушных клапанов в квартире жилого здания в холодный период /А.Г. Рымаров, В. Ю. Кравчук // Сантехника, отопление, кондиционирование. –2016. –№ 12 (180). –С. 70-71.
61. Рымаров, А.Г. Системы естественной вентиляции при опрокинутом движении воздуха /А.Г. Рымаров, В. Ю. Кравчук // Научное обозрение. –2017.– № 16. – С. 6-9.
62. Рымаров, А.Г. Энергосберегающие решения гражданских зданий при реновации /А.Г. Рымаров, В. Ю. Кравчук // Сантехника, отопление, кондиционирование. –2018.– №2. – С. 62-63.
63. Саргсян С.В. Расчёт удельного теплового потока через стену с металлическим стаканом / С.В. Саргсян, Н.А. Парфентьева, В.Ю. Кравчук, Е.П. Базунов // Энергосбережение и водоподготовка. 2022. №1 (135). С. 36-39.
64. Саргсян С.В. Оптимальные теплотехнические характеристики пористой вставки в наружной стене / С.В. Саргсян, В.Ю. Кравчук, А.Г. Ляпинков // Энергосбережение и водоподготовка. 2022. №1 (135). С. 36-39.
65. Садчиков, А. В. Влияние продольной фильтрации воздуха в утеплителе на теплозащитные свойства стен с навесными вентилируемыми фасадами: дисс. канд. техн. наук. 05.23.01., 05.23.03 / А. В. Садчиков.–М.: 2007.– 248 с.
66. Светлов, К.С. О применении ЭЦВМ для расчета воздухообмена жилых зданий / К. С. Светлов //Методы математического моделирования в энергетике.–1966.
67. Собоьщиков, В.И. Что надо делать в домах против холода, сырости и духоты: монография / В. И. Собоьщиков, 1872.
68. Титов, В. П. Воздушный режим зданий и учет воздухопроницания в расчете теплового режима / В. П. Титов // Сб. трудов МИСИ. – 1967. – №52.

69. Титов, В. П. Пористый регенеративный теплообменник с неподвижной насадкой / В. П. Титов, Н. А. Парфентьева, Е. В. Медведева // Водоснабжение и санитарная техника. – 1981. – № 4. – С. 27-28.
70. Титов, В. П. Теплотехнический расчет наружных стен с учетом инфильтрации воздуха / В. П. Титов // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1962. – № 3. – С. 137-147.
71. Ушков, Ф. В. Теплопередача при наличии фильтрации воздуха: монография / Ф. В. Ушков. – Москва., 1956. – 136 с.
72. Ушков, Ф. В. Теплопередача ограждающих конструкций при фильтрации воздуха: монография / Ф. В. Ушков. – Москва. Стройиздат, 1969.
73. Ушков, Ф. В. Влияние воздухопроницаемости на теплозащиту стен / Ф. В. Ушков // Строительная промышленность. – 1951. – № 8. – С. 16-19.
74. Фокин, К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей здания: монография / К. Ф. Фокин. – М.: Стройиздат, 1973. – 287 с.
75. Цвяк, А. Н. Разработка ограждающих конструкций с регулируемой воздухопроницаемостью: дисс. на соиск. науч. ст. канд. техн. наук: 05.23.03 / А. Н. Цвяк. – Омск, 2004. – 136 с.
76. Шелег, В. К. Современные тенденции развития материалов для тонкой фильтрации жидкостей и газов: монография / В. К. Шелег, Н. В. Мулева. – Минск: БелНИИТИ, 1983. – 31 с.
77. Шкловер, А. М. Основы строительной теплотехники жилых и общественных зданий: монография / А. М. Шкловер, Б. Ф. Васильев, Ф. В. Ушков. – Стройиздат, 1956. – 350 с.
78. Щелкачев, В. Н. Подземная гидравлика: монография / В. Н. Щелкачев, Б. Б. Лапук; под общ. ред. акад. Л. С. Лейбензона. – Москва, Ленинград: Гостоптехиздат, 1949. – 524 с.
79. Подземная гидродинамика: [Сборник статей] / Под ред. проф. В. Н. Щелкачева; М-во высш. и сред. спец. образования СССР. Моск. ин-т нефтехим. и газовой пром-сти им. И. М. Губкина. – Москва: Недра, 1971. 79 С.

80. Эглит М. Э. Модели микронеоднородных сред: дисс. на соиск. науч. ст. доктора ф.-м. наук: 01.02.05/ Эглит М. Э.– Москва,1999. –306 с.
81. Artmann, N. Cooling of the building structure by night-time ventilation : PhD thesis by Nikolai Artmann. Aalborg University. Denmark, –2008.
82. Blocken B. Computational analysis of the performance of a venturi-shaped roof for natural ventilation venturi-effect versus wind-blocked effect / B.Blocken, T. Van Hoof, L.Aanen, B.Bronsema // Computers & Fluids. – 2011. –№26.
83. Buckley-Leverett, 1942, article, chapter 9.
84. Carman's Flow of Gases Through Porous Media, Academic, 1956.
85. Chalkley, J. W., Cornfield, J., Park, H. // Science, №110 (1949). – 295P.
86. Christenson, M. Climate warming impact on degree-days and building energy demand in Switzerland/M. Christenson, H. Manz, D.Gyalistras // Energy Conversion and Management. – 2005. – № 47. –PP. 671-686.
87. Collins, R.E. Flow of fluids through porous materials: монография / R.E. Collins. – NY.: Reinhold publishing corporation,1961. –351 p.
88. Darcy, H., 1856, Les Fontaines Publiques de la ville de Dijon, Dalmont, Paris.
89. Davison's Neutron Transport Theory, Oxford, 1957.
90. Dong Chen. Periodically reversible supply/exhaust ventilation strategy /Dong Chen // Building and Environment. – 2017. –№124. –PP. 2590-2597.
91. Eisa, Z. S. Native methods to improve housing comfort in iran climate / Z. S. Eisa //Amit. – 2011. – 1 (14). –PP. 1-11.
92. Forchheimer P., Z. Ver. deuts. Ing., 45, 1901.
93. Frank, T. Climate change impacts on building heating and cooling energy demand in Switzerland/T.Frank //Energy and Buildings. – 2005. – № 37. – PP. 1175-1185.
94. Happel Hydrodynamics at low Reynolds numbers: монография / Happel, Brenner. –Мир.– 1976. –632 p.
95. Kaviany, M. Principles of heat transfer in porous media: монография / M.Kaviany. –Springer-Verlag.– 1991.– 626 p.
96. Klinkenberg L. J., Drilling Prod. Proc, 200 (1941).

97. Kolokotroni, M. The effect of the London urban heat island on building summer cooling demand and night ventilation strategies / M. Kolokotroni, I. Giannitsaris, R. Watkins. –Solar Energy.– 2006.– № 80. –PP. 383-392.
98. Manuel, M. Image analysis of packed beds of spherical particles of different sizes /M. Manuel, A.Josh Teixeira, A. Yelshin. –Separation and Purification Technology. – 1999. №15. – PP. 59-68.
99. Manuel, M./ Binary spherical particle mixed beds: porosity and permeability relationship measurement/M. Manuel, A.J. Teixeira, W. R. Bowen, A. Yelshin. – Transport filtration society.– 2001. –№1(4). – PP. 101-106.
100. Mason, E. A., Gas transport in porous media: the dusty-gas model: монография E. A. Mason, A. P. Malinauskas.–Amsterdam-Oxford-New York: Elsevier. – 1983.– 200 p.
101. Mei, H. T. Ventilated wall and window test passive-solar concept. Technical Report / Lamar Univ. Dept. of Mechanical Engineering. Beaumont, TX (USA): 1982.– 44p.
102. Muskat, M. The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media: монография / M.Muskat, R. D. Wyckloff . – NY. London: McGraw-Hill Book Co.– 1937.–763 p.
103. Nicos Martys, S. / Universal scaling of fluid permeability for sphere packings /S.Nicos Martys, S. Torquato, D. P. Bentz // The American Physical Society.–1994. – vol 50. №1. – PP. 403-408.
104. Van den Engel, P.Natural and hybrid ventilation principles based on buoyancy, sun and wind / P. Van den Engel, R. Kemperman, H. Doolard // REHVA.– 2012. – aug.–PP.25-32.
105. van den Engel,P. Use the interaction of gravitational forces, the sun and wind for effective ventilation / P. van den Engel, R. Kemperman, H. Doolard. // REHVA. – 2012. – aug.
106. Raisch, E. Die Luftdurchlässigkeit von baustoffen : монография / E.Raisch. – Gesundheits-Ingenieur, 1928.– №30.–PP. 481-489.

107. Silberstein, A. Effects of air and moisture flows on the thermal performance of insulations in ventilated roofs and walls / A. Silberstein, H.Hens, // Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes. –1996. –Vol.19.–PP. 367-385.
108. Sheidegger, A. E. The physics of flow through porous media /A. E. Sheidegger. –Toronto :University of Toronto press. –1957. –255 p.
109. Volnenko, A. A Purification Apparatuses with New Types of Regular Packings for Chromium Salts Production / A. A.Volnenko, S.O. Balabekov, N.B. Korganbaev, S. S. Didar //Chemical Engineering.– 2015. – vol. 43. – PP. 1147-1152.
110. Walkerlain, S. A comparison of the power law to quadratic formulations for air infiltration calculations/S.Walkerlain, D. J.Wilson, Max H. Sherman// Original Research Article Energy and Buildings. –1998. –vol. 27.– Is. 3.– PP. 293-299.
111. Xiao-li Xu. Natural ventilation in the double skin facade with venetian blind / Xiao-li Xu, Zhao Yang // Energy and Buildings.–vol. 40. – Is. 8.– 2008. –PP. 1498-1504.
112. Fanger, P. Ole. Ventilation in multi-storey residential buildings: Air quality [Электронный ресурс]//Режим доступа:[http://imikro.ru/ventilyaciya\\_v\\_mnogoetazhnyh\\_zhilyh](http://imikro.ru/ventilyaciya_v_mnogoetazhnyh_zhilyh)
113. Китайцева, Е.Х. Естественная вентиляция жилых зданий / Е.Х. Китайцева, Е.Г.Малявина [Электронный ресурс]//Режим доступа:[http://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=67](http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=67)
114. Шонина, Н.А. Вентиляция для многоэтажных жилых зданий [Электронный ресурс] // URL:[http://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=5599](http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5599)
115. Department of trade and industry's "Partners in Innovation" BRE's research programme [Электронный ресурс]// Режим доступа: <http://projects.bre.co.uk/natvent/index.html>
116. Herman, W. J. A ventilation system patent [Электронный ресурс] / W. J.Herman // Режим доступа:<https://www.google.si/patents/US3927828>.
117. Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН. Патент на способ регулирования теплообмена в системе вентиляции офисных и жилых помещений и устройство для реализации этого способа [Электронный



- ресурс] //Режим доступа:  
<http://bd.patent.su/22770002277999/pat/servlet/servlet10be.html>.
118. Мальсагов, А. А. Патент на климат-систему для помещений Заявка № 2007142965/06 от 20.11.2007 [Электронный ресурс] / А. А. Мальсагов // Режим доступа: <http://bd.patent.su/2360000-2360999/pat/servlet/servlet2e9c.html>.
119. Сервейинг: организация, экспертиза, управление: практикум в 3 частях / под общ. ред. д-ра экон. наук, проф. П.Г. Грабового ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Нац. исследоват. Моск. гос. строит. ун-т. Москва : НИУ МГСУ, 2016 —.[Электронный ресурс] Режим доступа: <http://docplayer.ru/68521382-Surveying-organizaciya-ekspertiza-upravlenie.html>.
120. Онлайн каталог компании VISSMAN [Электронный ресурс]// Режим доступа: <http://arkodan.com/kondicionirovaniya-i-ventiljacija/vitovent-100-d>.
121. Любанская, З.Г. Экономика систем ТГВ: Методические указания к выполнению курсовой работы для студентов специальности 270109.65 «Теплогазоснабжение и вентиляция» дневной, заочной и заочной ускоренной формы обучения / З.Г. Любанская // Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2010. — 36 с. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/904/77904/58868>.
122. Онлайн каталог компании VEZA[Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.veza.ru>
123. Патент на систему вентиляции. — Заявл. 18/IV—1978, № 260644/29—06; Оpubл. в Б. И., 1979, № 36.
124. Патент на систему вентиляции. — Заявл. 18/IV—1978, № 260644/29—06; Оpubл. в Б. И., 1979, № 36.
125. Постановление Правительства Москвы от 13.12.2016 г. № 848-ПП «Об утверждении цен, ставок и тарифов на жилищно-коммунальные услуги для населения» [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.mos.ru/authority/documents/doc/35438220/>
126. Приказ от 29.11.2017 года № 323-ТР «Об установлении цен (тарифов) на электрическую энергию для населения и приравненным к нему категориям

- потребителей города Москвы на 2018 год» [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.mos.ru/authority/documents/doc/37587220/>
127. Стандарт АВОК. Здания жилые и общественные. Нормы воздухообмена. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2002 – 16 С.
128. ГОСТ 8050-85 «Двуокись углерода газообразная и жидкая. Технические условия». [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200005325>
129. ГОСТ 12.3.018-79. Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний. Введ. 1981-01-01. - М: Изд-во стандартов, 1979. - 11 С.
130. ГОСТ 32493-2013 «Материалы и изделия теплоизоляционные. Метод определения воздухопроницаемости и сопротивления воздухопроницанию». Введ. 14.11.2013. – М: Изд-во стандартов, 2014. – 8 С.
131. СП 131.13330.2012 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99\* (с Изменением №2). Введ. 01.01.2013. М: Изд-во стандартов. 2012. 113 С.

## Приложение А

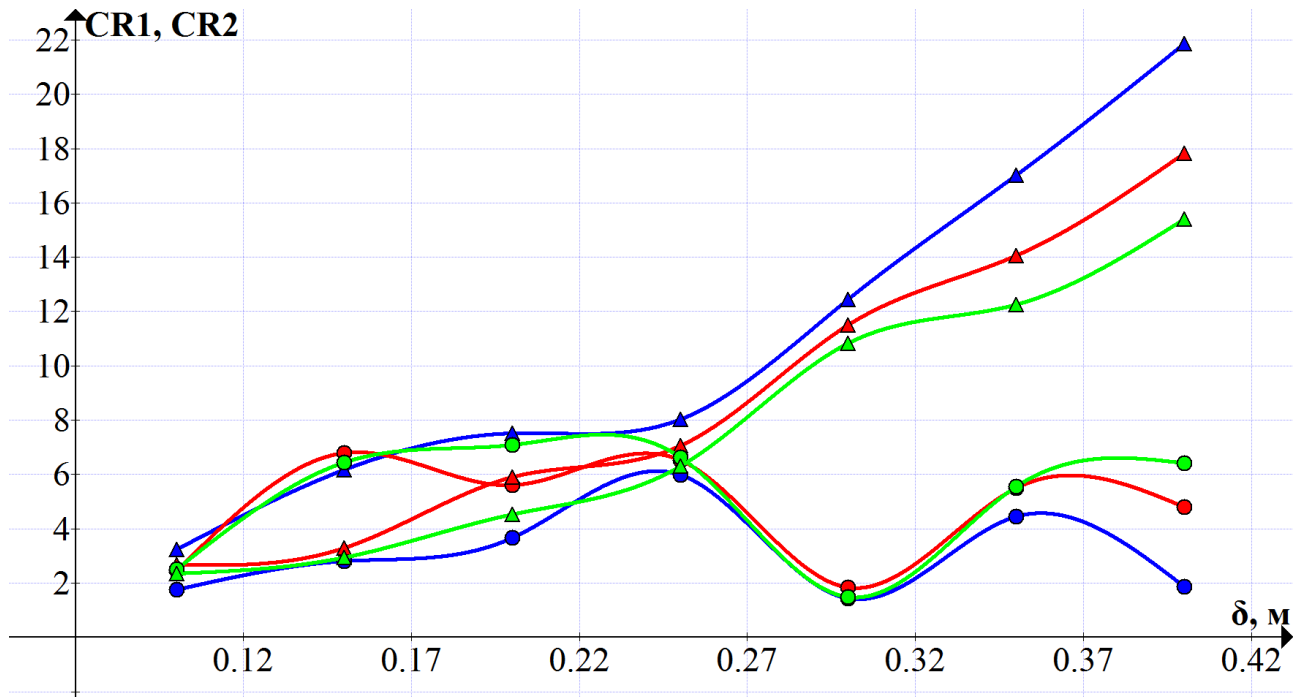


Рисунок П1.1 – Зависимость коэффициентов фильтрации от параметров засыпки

По вертикали отложены значения коэффициентов, по горизонтали – толщина образца. Синяя линия соответствует засыпке со средним диаметром зерна 17 мм, красная – 21,5 мм, зеленая – 26 мм. Линии, обозначенные треугольниками соответствуют коэффициентам  $C_{R1}$ , кружками – коэффициентам  $C_{R2}$ .

### Приложение Б

Результаты расчетов температурных полей структуры в пористой вставке

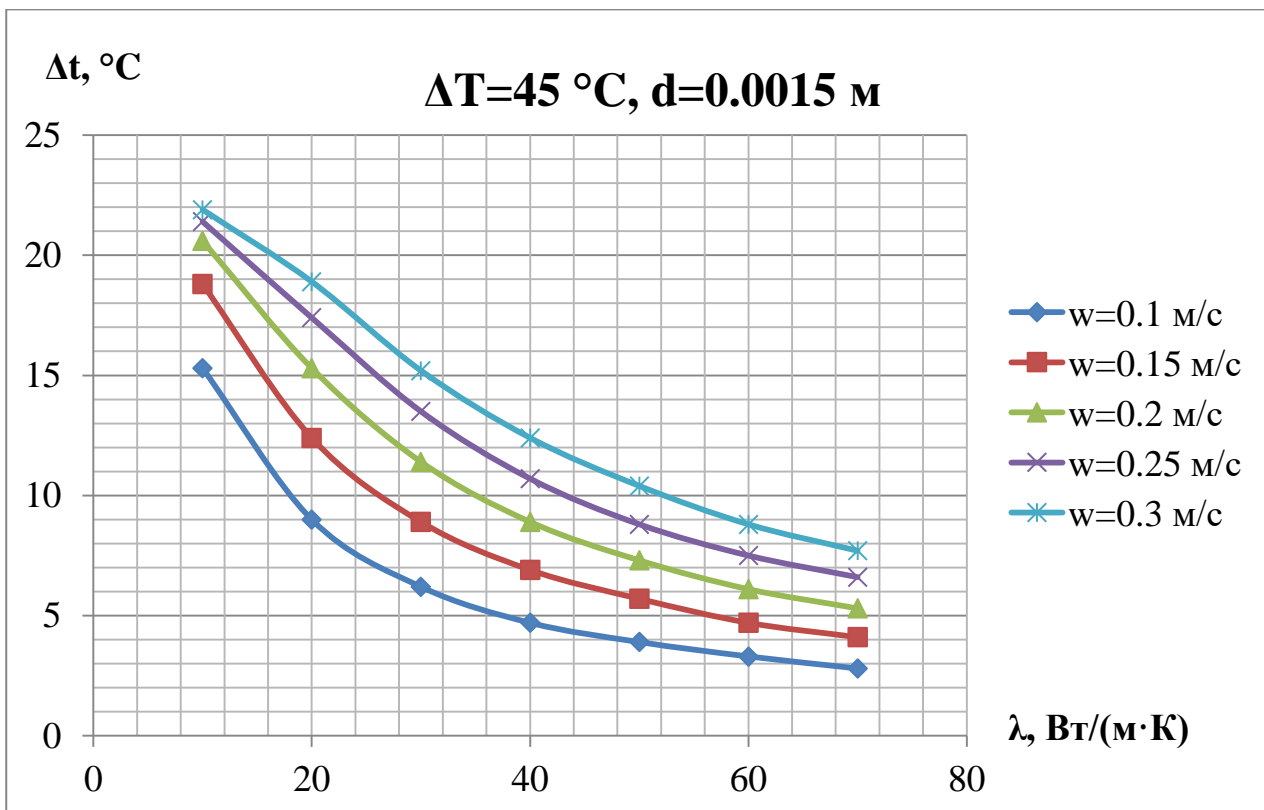


Рисунок П 2.1 – Распределение температур при указанных параметрах

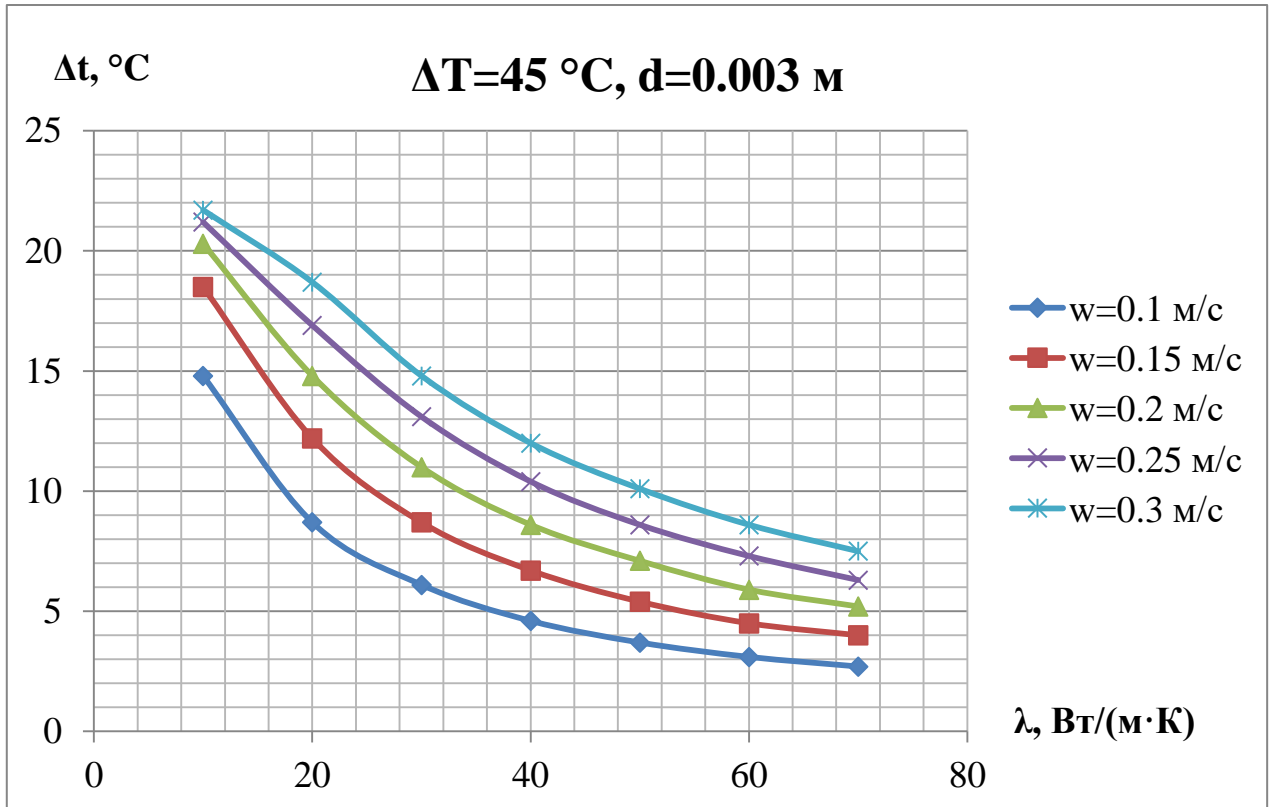


Рисунок II 2.2 – Распределение температур при указанных параметрах

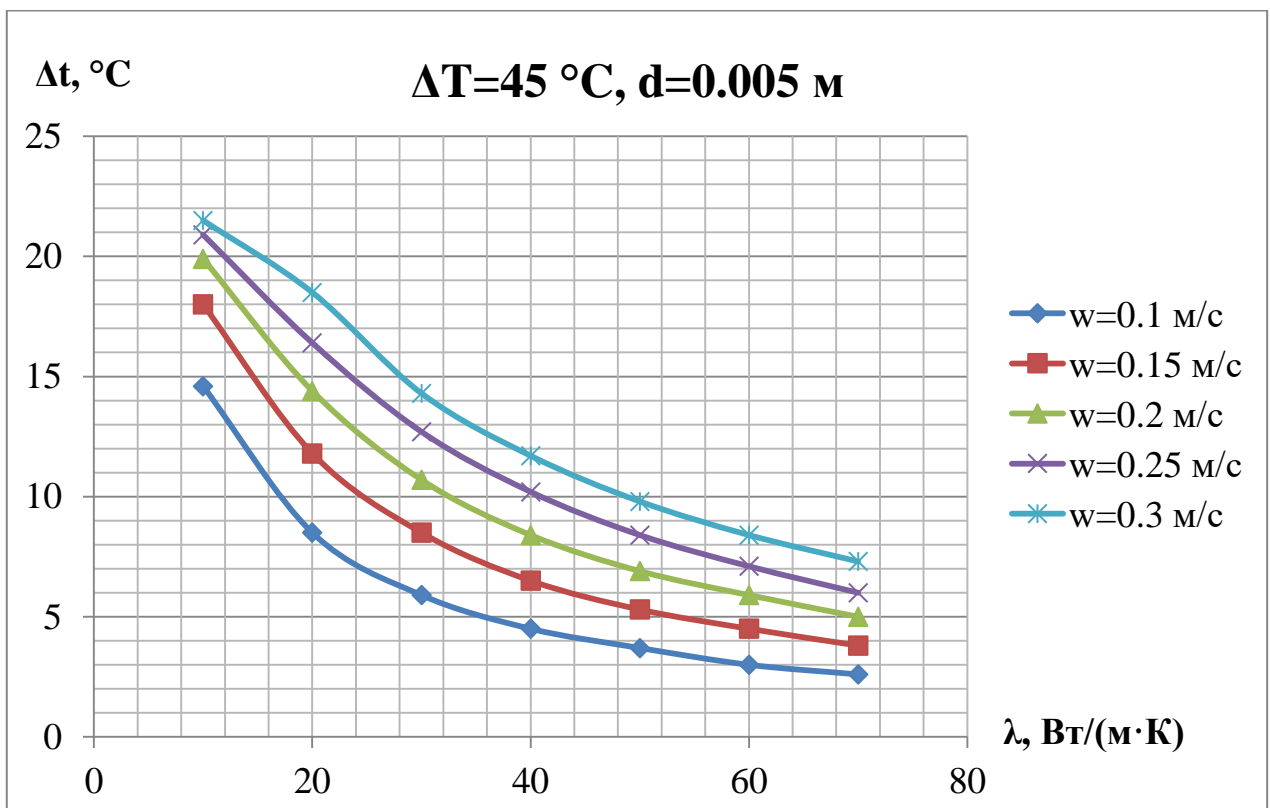


Рисунок II 2.3 – Распределение температур при указанных параметрах

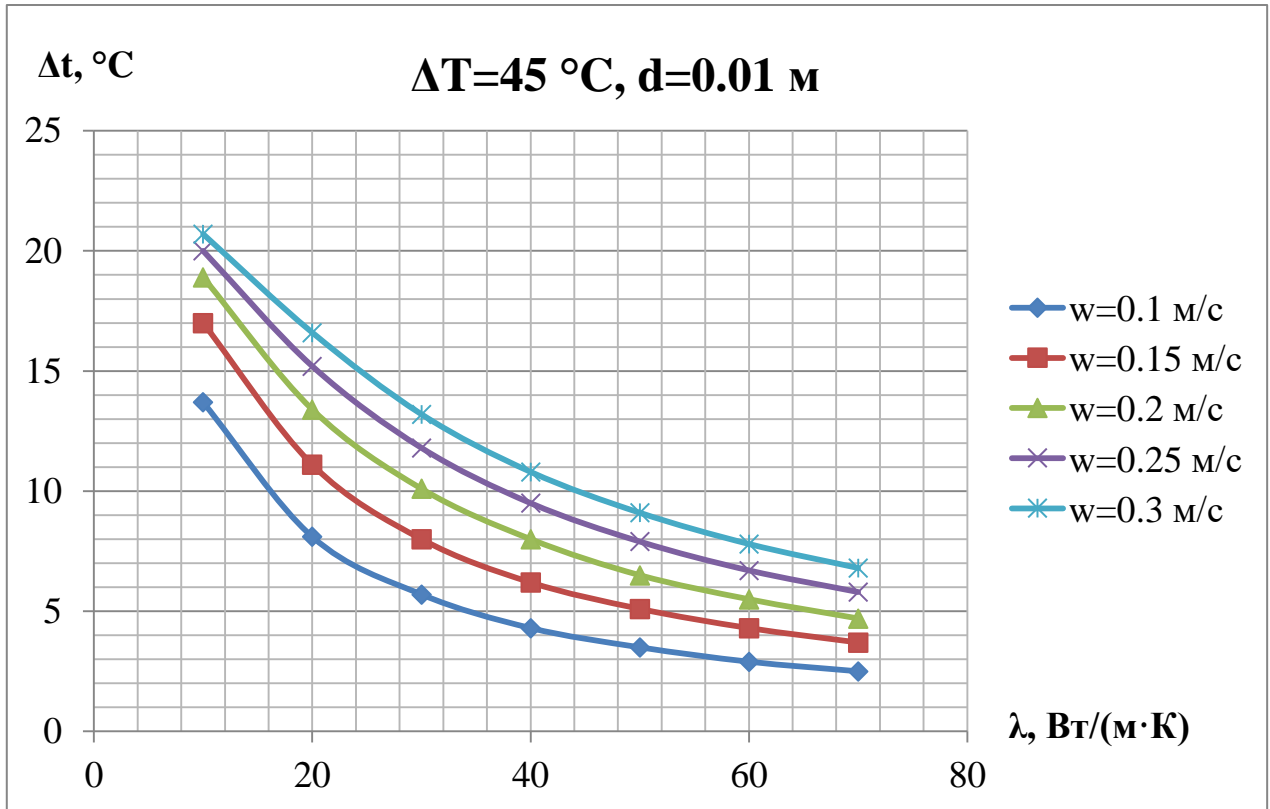


Рисунок II 2.4 –Распределение температур при указанных параметрах

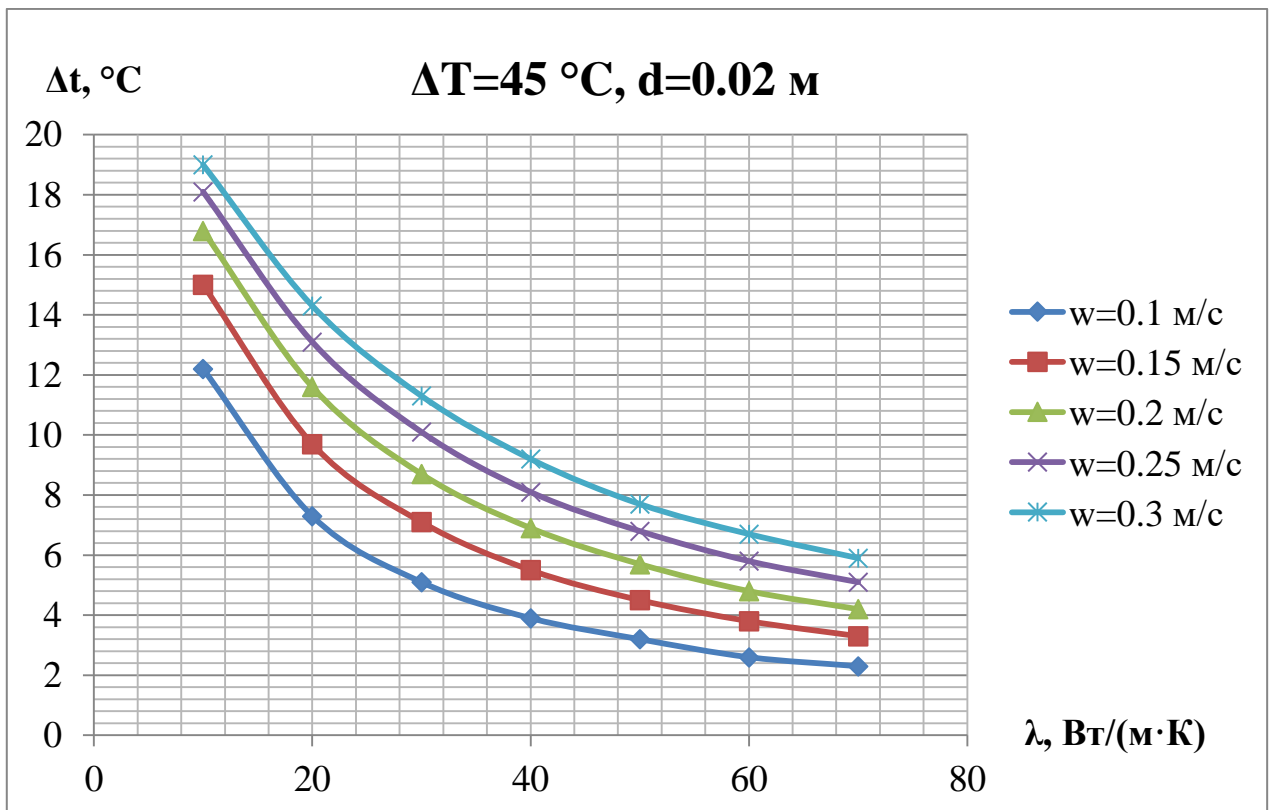


Рисунок II 2.5 –Распределение температур при указанных параметрах

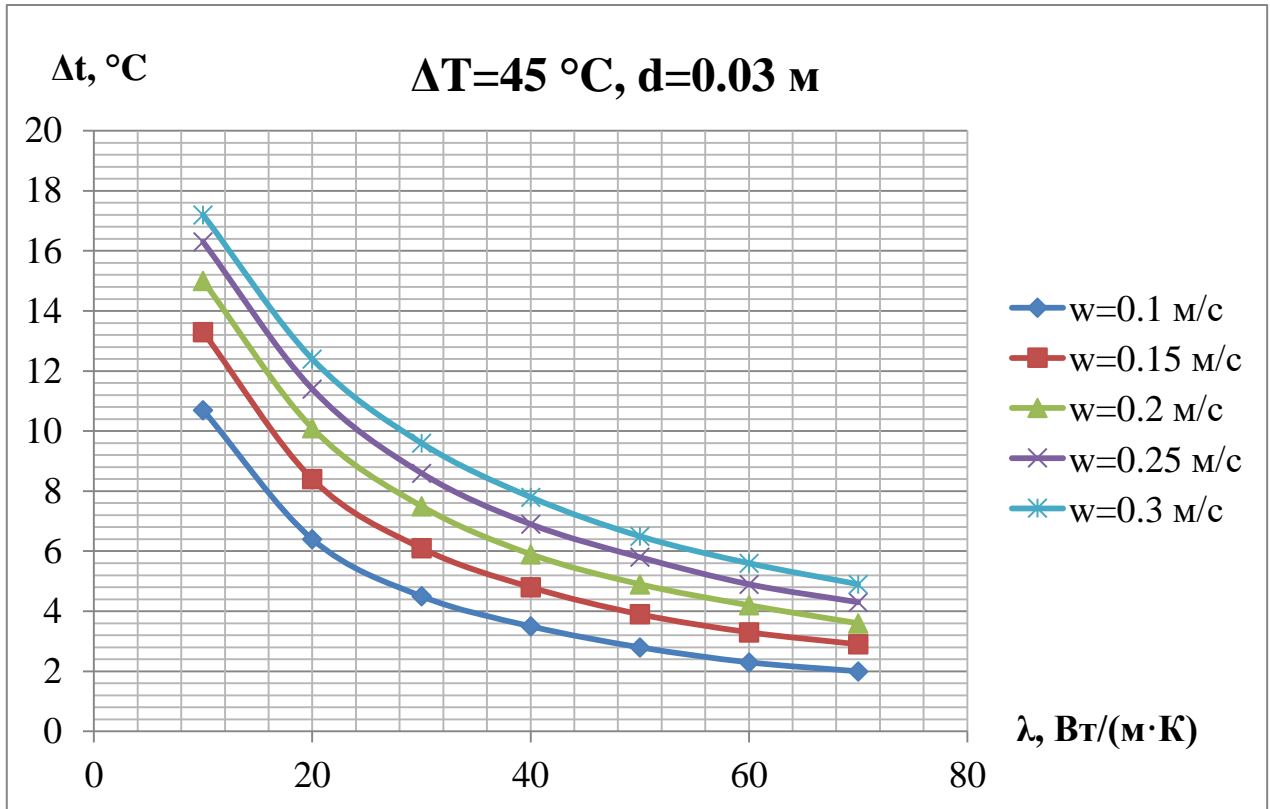


Рисунок II 2.6 – Распределение температур при указанных параметрах

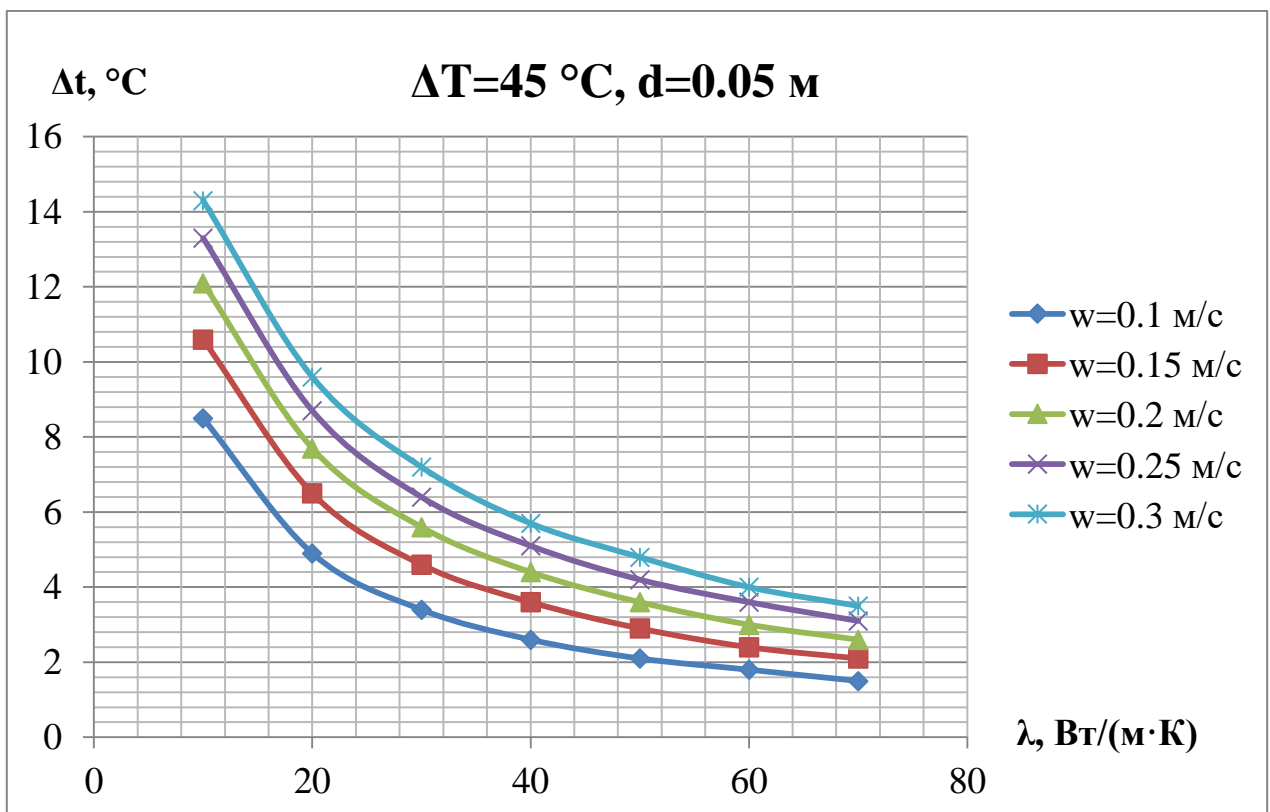


Рисунок II 2.7 – Распределение температур при указанных параметрах

## Приложение В

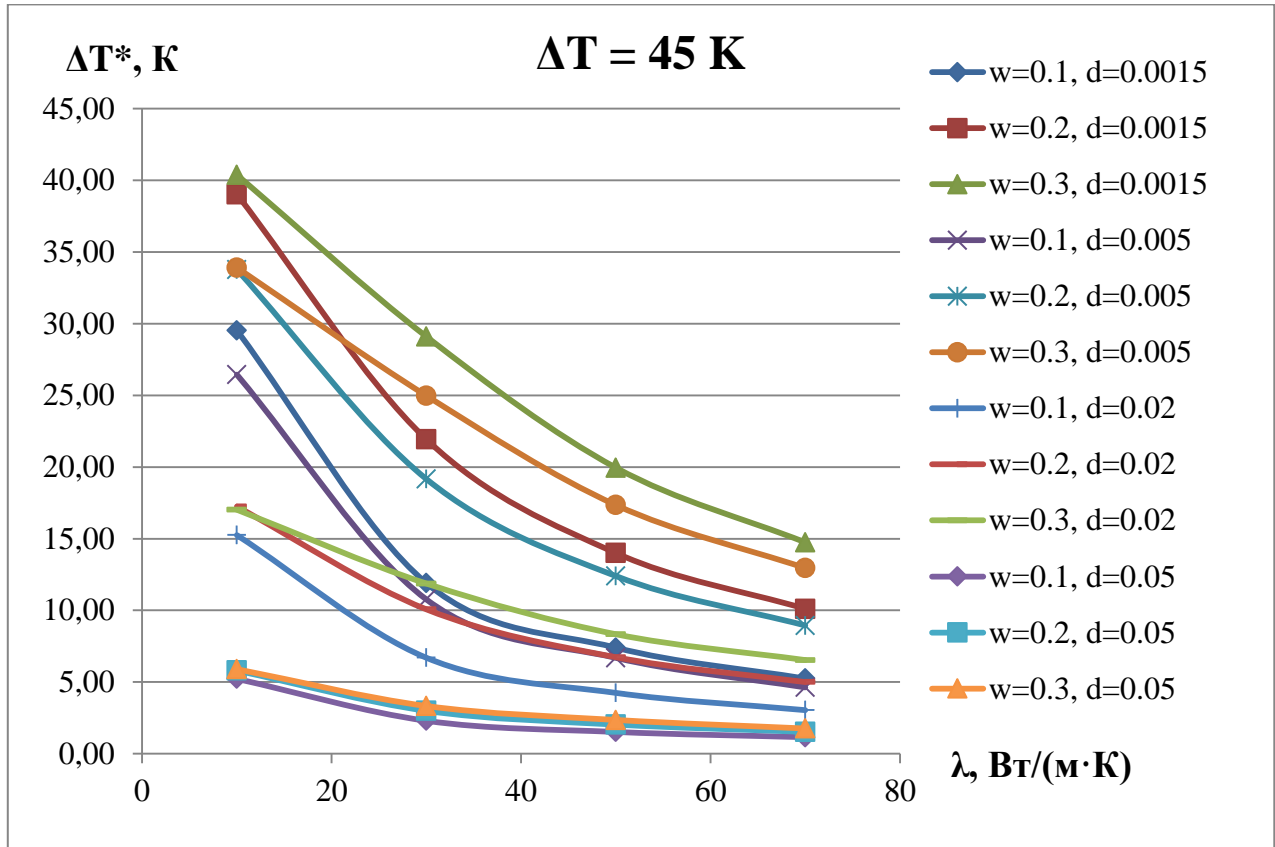


Рисунок П 3.1 – Отклонение расчетной температуры притока от истинной при указанных параметрах.

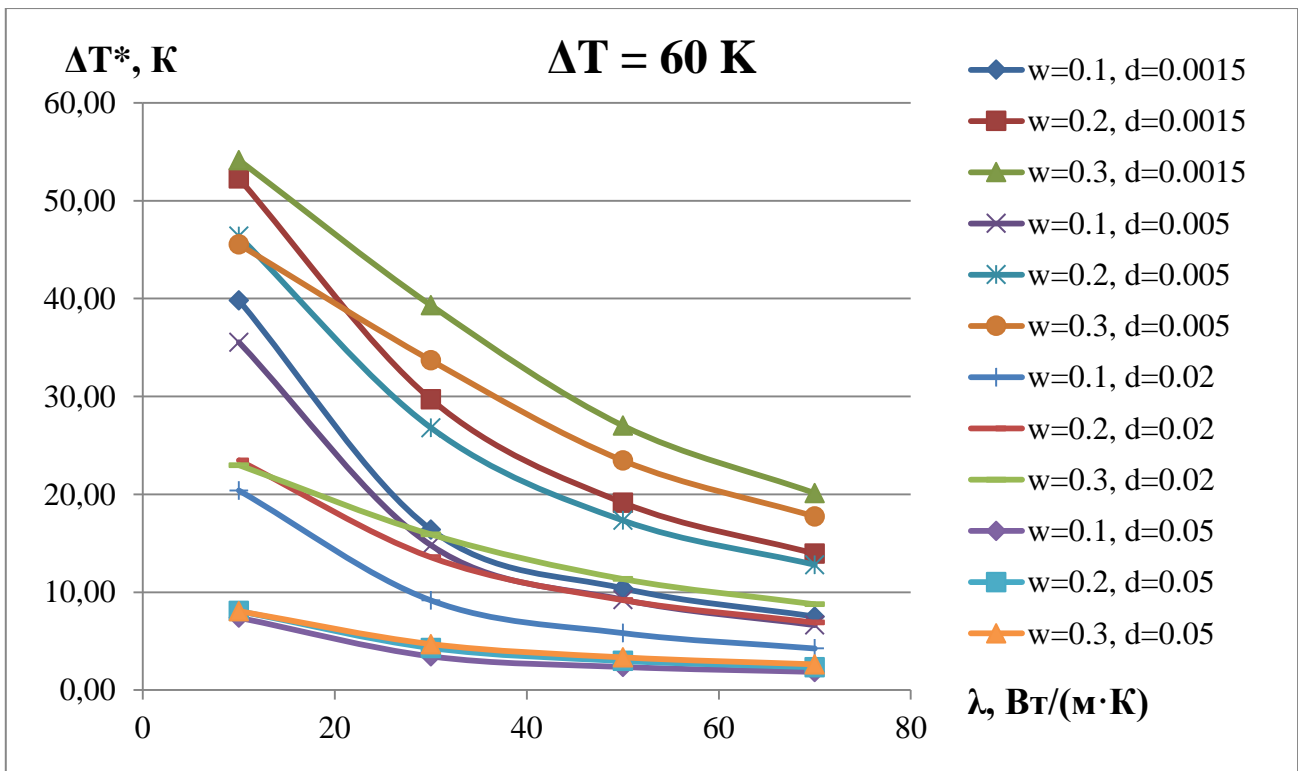


Рисунок П 3.2 – Отклонение расчетной температуры притока от истинной при указанных параметрах.



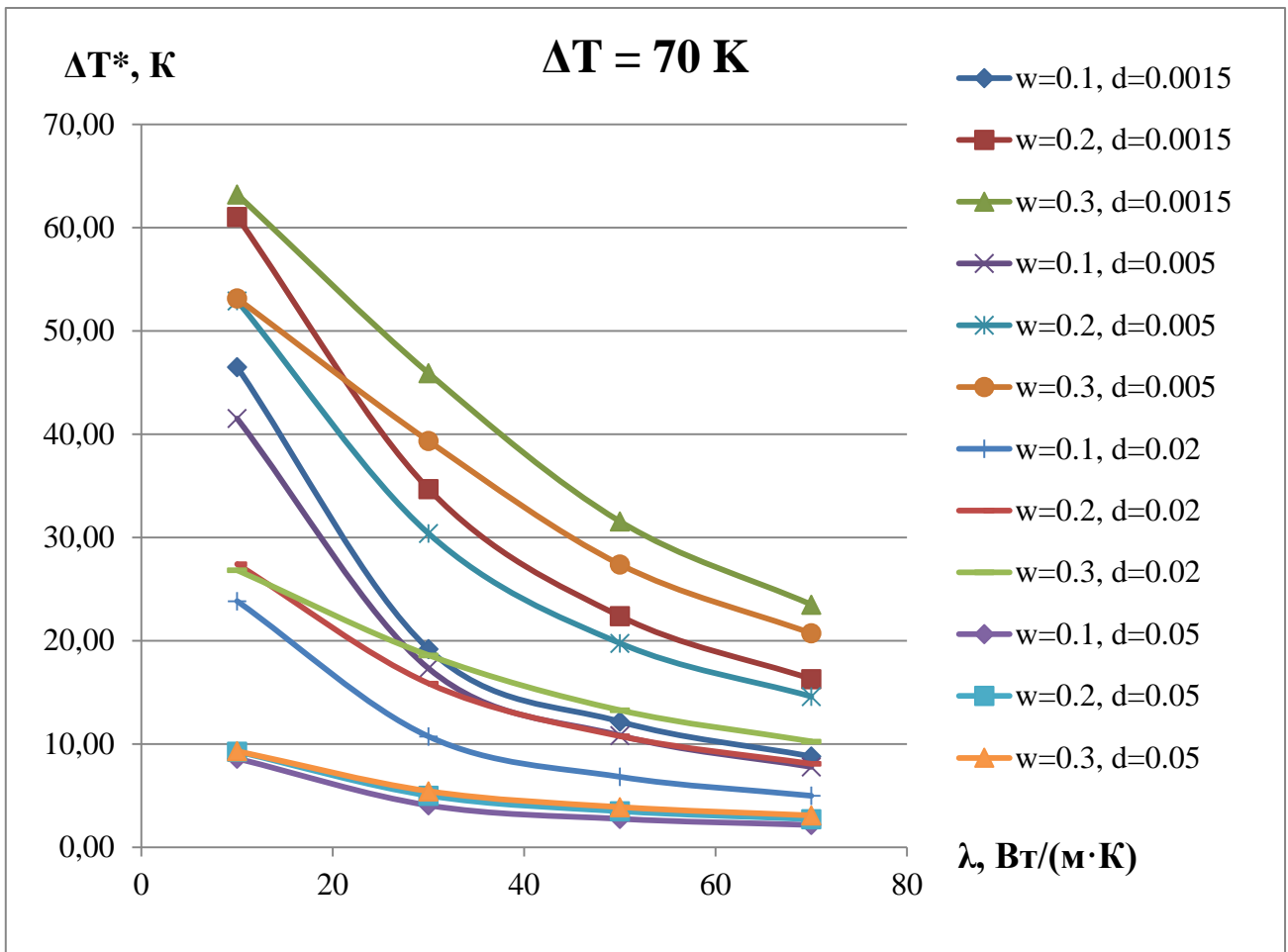


Рисунок П 3.3 – Отклонение расчетной температуры притока от истинной при указанных параметрах.

## Приложение Г

## Справка о внедрении результатов работы



ПИК-Проект

Общество с ограниченной  
ответственностью «ПИК-Проект»  
Столярный пер., д. 3, корп. 16  
эт. 4, пом. I, ч. к. 3, Москва, 123022

Тел.: +7 495 505-97-33  
E-mail: pik-proekt@pik.ru  
E-mail: ecp@pik.ru

ОКПО 77459803 ОГРН 1057746752403  
ИНН 7714599209 КПП 770301001

от 17.03.2022 г. 1007/1-597-И  
№

Куда:

на № от

Кому: автору диссертационной работы  
Кравчуку В.Ю..

Копия:

Тема: о внедрении результатов диссертационной работы

## СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационной работы Кравчука В.Ю. по теме:  
«Использование воздухопроницаемых элементов в наружных ограждениях для работы  
системы вентиляции с реверсивным движением воздуха»

Результаты диссертационной работы Кравчука В.Ю. были внедрены при проектировании воздухопроницаемых элементов в административном здании, расположенном по адресу МО, г. Красногорск, Ильинские луга, Корпус 1.11-1.12. Применение разработанной методики позволяет создавать нормативный воздухообмен в помещениях административных зданий и понижать расход тепловой энергии на вентиляцию за счёт теплоутилизации в приборной зоне наружных ограждающих конструкций.

Настоящая справка подтверждает, что результаты диссертации Кравчука В.Ю. могут быть приняты к внедрению при проектировании систем отопления и вентиляции административных зданий.

Исполнитель: Главный инженер ООО «ПИК-Проект» Тищенко И.А.  
тел. +7-495-505-97-33 доб. 66-84

Приложение Д

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018662235

Программа для расчета нестационарного  
воздушно-теплогового режима здания

Правообладатели: *Кравчук Валерий Юрьевич (RU), Рымаров Андрей  
Георгиевич (RU)*

Авторы: *Кравчук Валерий Юрьевич (RU),  
Рымаров Андрей Георгиевич (RU)*

Заявка № 2018615727

Дата поступления 29 мая 2018 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 03 октября 2018 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев

## Приложение Е

## Список опубликованных научных работ В.Ю. Кравчука

Научные статьи, опубликованные в научных изданиях, входящих в

Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

1. Рымаров, А.Г. Применение сквозных проемов с пористым наполнением для вентиляции помещений /А.Г. Рымаров, **В. Ю. Кравчук** // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2018. – №2. – С. 64-66.

2. Рымаров, А.Г. Система реверсивной вентиляции для административных зданий /А.Г. Рымаров, **В. Ю. Кравчук** // Вестник Дагестанского Государственного Технического Университета. – 2017. – Том 44. №4. – С. 161-169.

3. Рымаров, А.Г. Системы естественной вентиляции жилых зданий, оборудованных окнами с малой воздухопроницаемостью (класс "Г" и выше) /А.Г. Рымаров, **В. Ю. Кравчук** // Научное обозрение. – 2016. – № 10. – С. 23-26.

4. Рымаров, А.Г. Системы естественной вентиляции при опрокинутом движении воздуха /А.Г. Рымаров, **В. Ю. Кравчук** // Научное обозрение. – 2017. – № 16. – С. 6-9.

5. Рымаров, А.Г. Конструкционные особенности централизованной реверсивной вентиляции административных зданий /А.Г. Рымаров, **В. Ю. Кравчук** // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2017. – №12. – С. 86-88.

6. **Кравчук В.Ю.** Инженерная методика учёта влияния пористых воздухопроницаемых элементов на тепловую защиту здания / В.Ю. Кравчук, А.Г. Рымаров // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2018. – №6. – С. 66-68.

7. Саргсян С.В. Расчёт удельного теплового потока через стену с металлическим стаканом / С.В. Саргсян, Н.А. Парфентьева, **В.Ю. Кравчук**, Е.П. Базунов // Энергосбережение и водоподготовка. 2022. №1 (135). С. 36-39.

8. Саргсян С.В. Оптимальные теплотехнические характеристики пористой вставки в наружной стене / С.В. Саргсян, **В.Ю. Кравчук**, А.Г. Ляпинков // Энергосбережение и водоподготовка. 2022. №1 (135). С. 36-39.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах:

1. **Kravchuk, V. Yu.** The reversible ventilation for administrative buildings/ **V. Yu. Kravchuk**, A. G. Rymarov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 177. doi :10.1088/1755-1315/177/1/012030.

2. **Kravchuk, V. Yu.** An Approximate Analytical Solution to the Problem of Heat Exchange in Porous Material / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 753 (2020) 052023 doi:10.1088/1757-899X/753/5/052023

Публикации в других изданиях:

1. Рымаров, А.Г. Исследование применения воздушных клапанов в квартире жилого здания в холодный период /А.Г. Рымаров, **В. Ю. Кравчук** // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2016. – № 12 (180). – С. 70-71.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018662235. "Программа для расчета нестационарного воздушно-теплового режима здания". Правообладатели (авторы): **Кравчук Валерий Юрьевич**, Рымаров Андрей Георгиевич. Заявка № 2018615727. Дата поступления: 29 мая 2018 г. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 3 октября 2018 г.

## Приложение Ж

## Программный код алгоритма нестационарного ВТРЗ

```
global x;
global P;
global S;
t = zeros(123, 123);
tnext = zeros (1, 50);
Qh1 = zeros(1, 50);
Qint = zeros(1, 50);
Qhs = zeros(1, 50);
Qvent = zeros(1, 50);
deltat = zeros (1, 50);
Pnext = zeros (1, 37);
Qtr1 = zeros (50, 50);
Qtr = zeros (1, 50);
x0 = zeros (1, 50);

fit1 = fopen('temperature1.txt', 'w+');
fit2 = fopen('temperature2.txt', 'w+');
fit3 = fopen('temperature3.txt', 'w+');
fit4 = fopen('temperature4.txt', 'w+');
fit5 = fopen('temperature5.txt', 'w+');
fit6 = fopen('temperature6.txt', 'w+');
fit7 = fopen('temperature7.txt', 'w+');
fit8 = fopen('temperature8.txt', 'w+');
fit9 = fopen('temperature9.txt', 'w+');
fit10 = fopen('temperature10.txt', 'w+');

fit11 = fopen('temperature11.txt', 'w+');
fit12 = fopen('temperature12.txt', 'w+');
fit13 = fopen('temperature13.txt', 'w+');
fit14 = fopen('temperature14.txt', 'w+');
fit15 = fopen('temperature15.txt', 'w+');
fit16 = fopen('temperature16.txt', 'w+');
fit17 = fopen('temperature17.txt', 'w+');
fit18 = fopen('temperature18.txt', 'w+');
fit19 = fopen('temperature19.txt', 'w+');
fit20 = fopen('temperature20.txt', 'w+');

fit21 = fopen('temperature21.txt', 'w+');
fit22 = fopen('temperature22.txt', 'w+');
fit23 = fopen('temperature23.txt', 'w+');
fit24 = fopen('temperature24.txt', 'w+');
fit25 = fopen('temperature25.txt', 'w+');
fit26 = fopen('temperature26.txt', 'w+');
fit27 = fopen('temperature27.txt', 'w+');
fit28 = fopen('temperature28.txt', 'w+');
fit29 = fopen('temperature29.txt', 'w+');
fit30 = fopen('temperature30.txt', 'w+');

fit31 = fopen('temperature31.txt', 'w+');
fit32 = fopen('temperature32.txt', 'w+');
fit33 = fopen('temperature33.txt', 'w+');
fit34 = fopen('temperature34.txt', 'w+');
fit35 = fopen('temperature35.txt', 'w+');
fit36 = fopen('temperature36.txt', 'w+');
fit37 = fopen('temperature37.txt', 'w+');
fit38 = fopen('temperature38.txt', 'w+');
fit39 = fopen('temperature39.txt', 'w+');
```

```

fit40 = fopen('temperature40.txt', 'w+');

fit41 = fopen('temperature41.txt', 'w+');
fit42 = fopen('temperature42.txt', 'w+');
fit43 = fopen('temperature43.txt', 'w+');
fit44 = fopen('temperature44.txt', 'w+');
fit45 = fopen('temperature45.txt', 'w+');
fit46 = fopen('temperature46.txt', 'w+');
fit47 = fopen('temperature47.txt', 'w+');
fit48 = fopen('temperature48.txt', 'w+');
fit49 = fopen('temperature49.txt', 'w+');
fit50 = fopen('temperature50.txt', 'w+');

fiG2 = fopen('G2.txt', 'w+');
fiG3 = fopen('G3.txt', 'w+');
fiG5 = fopen('G5.txt', 'w+');
fiG6 = fopen('G6.txt', 'w+');
fiG7 = fopen('G7.txt', 'w+');
fiG10 = fopen('G10.txt', 'w+');
fiG11 = fopen('G11.txt', 'w+');
fiG13 = fopen('G13.txt', 'w+');
fiG14 = fopen('G14.txt', 'w+');
fiG15 = fopen('G15.txt', 'w+');
fiG18 = fopen('G18.txt', 'w+');
fiG19 = fopen('G19.txt', 'w+');
fiG21 = fopen('G21.txt', 'w+');
fiG22 = fopen('G22.txt', 'w+');
fiG23 = fopen('G23.txt', 'w+');
fiG26 = fopen('G26.txt', 'w+');
fiG27 = fopen('G27.txt', 'w+');
fiG29 = fopen('G29.txt', 'w+');
fiG30 = fopen('G30.txt', 'w+');
fiG31 = fopen('G31.txt', 'w+');
fiG34 = fopen('G34.txt', 'w+');
fiG35 = fopen('G35.txt', 'w+');
fiG37 = fopen('G37.txt', 'w+');
fiG38 = fopen('G38.txt', 'w+');
fiG39 = fopen('G39.txt', 'w+');
fiG42 = fopen('G42.txt', 'w+');
fiG43 = fopen('G43.txt', 'w+');
fiG45 = fopen('G45.txt', 'w+');
fiG46 = fopen('G46.txt', 'w+');
fiG47 = fopen('G47.txt', 'w+');

S = [0.001245 0.001045 0.000846 0.000646 0.000446 0.000246 0.1382 0.192
0.0001 0.001 0.00054 0.000138 0.000116 0.000094 0.000072];

t1 = [18      18.1    18.2    18.3    18.4    18.5    18.6    18.7 ...
      18.8    18.9    19      19.1    19.2    19.3    19.4    19.5 ...
      19.6    19.7    19.8    19.9    20      20.1    20.2    20.3 ...
      20.4    20.5    20.6    20.7    20.8    20.9    21      21.1 ...
      21.2    21.3    21.4    21.5    21.6    21.7    21.8    21.9 ...
      22      22.1    22.2    22.3    22.4    22.5    22.6    22.7 ...
      22.8    22.9    ...
      23      23.1    23.2    23.3 ...
      23.4    23.5    23.6    23.7 ...
      23.8    23.9    24      24.1 ...
      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
0      0      0      0      0      0 ...
      -25 -25 -25 -25 -25 -25 -25 -25 -25 -25 -25 -25 -25 -25 -25 -25 -25 -25 -25 -25
-25 -25 -25 -25 -25 -25 -25 -25 -25 -25 -25 -25 -25 -25 -25 -25 -25 -25 -25 -25];
Qh11 = [ 213  1113 1768 270  1113 983  1113 26
        141  1104 1381 141  1104 814  1104 0 ...
        141  1104 1381 141  1104 814  1104 0 ...

```

```

141 1104 1381 141 1104 814 1104 0 ...
141 1104 1381 141 1104 814 1104 0 ...
401 1624 2422 661 1624 1334 1624 254 ...
2579 5796];

```

```

Qhs1 = Qh11*1.8; %[ 213 1713 2168 270 1713 983 1513 0 ...
% 141 1704 1781 151 1704 884 1504 0 ...
% 141 1704 1781 151 1704 884 1504 0 ...
% 141 1704 1781 151 1704 884 1504 0 ...
% 141 1704 1781 151 1704 884 1504 0 ...
% 401 2224 2822 661 2024 1334 2024 0 ...
% 0 5796];
Qhs1 (8) = 0;
Qhs1 (48) = 0;
Qhs1 (49) = 0;

```

```

Qint1 = [ 0 1440 1700 0 1440 0 1440 0 ...
0 1440 1700 0 1440 0 1440 0 ...
0 1440 1700 0 1440 0 1440 0 ...
0 1440 1700 0 1440 0 1440 0 ...
0 1440 1700 0 1440 0 1440 0 ...
0 0];

```

```

Qeq = [0 450 900 0 450 0 450 0 ...
0 450 900 0 450 0 450 0 ...
0 450 900 0 450 0 450 0 ...
0 450 900 0 450 0 450 0 ...
0 450 900 0 450 0 450 0 ...
0 0];

```

```

V = [54 108 216 108 108 108 108 54 ...
54 108 216 108 108 108 108 54 ...
54 108 216 108 108 108 108 54 ...
54 108 216 108 108 108 108 54 ...
54 108 216 108 108 108 108 54 ...
865.8 865.8];

```

```

h = [19.9 19.9 19.9 19.9 19.9 19.9 ...
16.45 16.45 16.45 16.45 16.45 16.45 ...
13.45 13.45 13.45 13.45 13.45 13.45 ...
10.45 10.45 10.45 10.45 10.45 10.45 ...
7.45 7.45 7.45 7.45 7.45 7.45 ...
4.45 4.45 4.45 4.45 4.45 4.45 ...
0];

```

```

t5 = -25;
tcount = 192;
A = 5.4;
tav = -25;
tstep = 60;
m = tcount*3600;
F = [19.8, 9.9, 18, 36, 39.6, 72];
K = [0.8, 0.68];
tcurrent = 0;
Pdyn = 0;
text = A/2*sin(-pi/2+(tcurrent/3600)*pi/12)+tav;
for ii = 1:37;
P(ii) = (353/(273+tav)-353/(273+t1(ii)))*h(ii)*9.81;
switch ii
case 1 , P(ii) = P(ii) + Pdyn;

```



```

case 2 , P(ii) = P(ii) + Pdyn;
case 7 , P(ii) = P(ii) + Pdyn;
case 8 , P(ii) = P(ii) + Pdyn;
case 13 , P(ii) = P(ii) + Pdyn;
case 14 , P(ii) = P(ii) + Pdyn;
case 18 , P(ii) = P(ii) + Pdyn;
case 19 , P(ii) = P(ii) + Pdyn;
case 25 , P(ii) = P(ii) + Pdyn;
case 26 , P(ii) = P(ii) + Pdyn;
case 31 , P(ii) = P(ii) + Pdyn;
case 32 , P(ii) = P(ii) + Pdyn;

end;
end;
for ii = 1:86;
    if ii <= 8;
        x0(ii) = P(1)-0.2*P(1)-0.01*ii;
    elseif ii <= 16;
        x0(ii) = P(7)-0.2*P(7)-0.01*ii;
    elseif ii <= 24;
        x0(ii) = P(13)-0.2*P(13)-0.001*ii;
    elseif ii <= 32;
        x0(ii) = P(19)-0.2*P(19)-0.001*ii;
    elseif ii <= 40;
        x0(ii) = P(25)-0.2*P(25)-0.001*ii;
    elseif ii <= 48;
        x0(ii) = P(31)-0.2*P(31)-0.001*ii;
    elseif ii <= 50;
        x0(ii) = P(7)-0.2*P(7)-0.001*ii;
    elseif ii <= 54;
        x0(ii) = P(1)-0.2*P(1)-0.001*ii;
    elseif ii <= 58;
        x0(ii) = P(7)-0.2*P(7)-0.001*ii;
    elseif ii <= 62;
        x0(ii) = P(13)-0.2*P(13)-0.001*ii;
    else
        x0(ii) = 0.0001;
    end
end
end

Qtr1 (1, 2) = F(1)*K(1);
Qtr1 (1, 7) = F(1)*K(1);
Qtr1 (1, 8) = F(2)*K(1);
Qtr1 (1, 9) = F(3)*K(2);
Qtr1 (2, 10) = F(4)*K(2);
Qtr1 (2, 49) = F(1)*K(1);
Qtr1 (3, 4) = F(5)*K(1);
Qtr1 (3, 11) = F(6)*K(2);
Qtr1 (3, 49) = F(1)*K(1);
Qtr1 (4, 5) = F(1)*K(1);
Qtr1 (4, 6) = F(1)*K(1);
Qtr1 (4, 8) = F(2)*K(1);
Qtr1 (4, 12) = F(4)*K(2);
Qtr1 (5, 6) = F(1)*K(1);
Qtr1 (5, 13) = F(4)*K(2);
Qtr1 (6, 14) = F(4)*K(2);
Qtr1 (6, 50) = F(1)*K(1);
Qtr1 (7, 15) = F(4)*K(2);
Qtr1 (7, 50) = F(1)*K(1);
Qtr1 (8, 16) = F(3)*K(2);
Qtr1 (8, 49) = F(1)*K(1);
Qtr1 (8, 50) = F(1)*K(1);

Qtr1 (9, 10) = F(1)*K(1);

```

Qtrl (9, 15) = F(1)\*K(1);  
 Qtrl (9, 16) = F(2)\*K(1);  
 Qtrl (9, 17) = F(3)\*K(2);  
 Qtrl (10, 18) = F(4)\*K(2);  
 Qtrl (10, 49) = F(1)\*K(1);  
 Qtrl (11, 12) = F(5)\*K(1);  
 Qtrl (11, 19) = F(6)\*K(2);  
 Qtrl (11, 49) = F(1)\*K(1);  
 Qtrl (12, 13) = F(1)\*K(1);  
 Qtrl (12, 14) = F(1)\*K(1);  
 Qtrl (12, 16) = F(2)\*K(1);  
 Qtrl (12, 20) = F(4)\*K(2);  
 Qtrl (13, 14) = F(1)\*K(1);  
 Qtrl (13, 21) = F(4)\*K(2);  
 Qtrl (14, 22) = F(4)\*K(2);  
 Qtrl (14, 50) = F(1)\*K(1);  
 Qtrl (15, 23) = F(4)\*K(2);  
 Qtrl (15, 50) = F(1)\*K(1);  
 Qtrl (16, 24) = F(3)\*K(2);  
 Qtrl (16, 49) = F(1)\*K(1);  
 Qtrl (16, 50) = F(1)\*K(1);

Qtrl (17, 18) = F(1)\*K(1);  
 Qtrl (17, 23) = F(1)\*K(1);  
 Qtrl (17, 24) = F(2)\*K(1);  
 Qtrl (17, 25) = F(3)\*K(2);  
 Qtrl (18, 26) = F(4)\*K(2);  
 Qtrl (18, 49) = F(1)\*K(1);  
 Qtrl (19, 20) = F(5)\*K(1);  
 Qtrl (19, 27) = F(6)\*K(2);  
 Qtrl (19, 49) = F(1)\*K(1);  
 Qtrl (20, 21) = F(1)\*K(1);  
 Qtrl (20, 22) = F(1)\*K(1);  
 Qtrl (20, 24) = F(2)\*K(1);  
 Qtrl (20, 28) = F(4)\*K(2);  
 Qtrl (21, 22) = F(1)\*K(1);  
 Qtrl (21, 29) = F(4)\*K(2);  
 Qtrl (22, 30) = F(4)\*K(2);  
 Qtrl (22, 50) = F(1)\*K(1);  
 Qtrl (23, 31) = F(4)\*K(2);  
 Qtrl (23, 50) = F(1)\*K(1);  
 Qtrl (24, 32) = F(3)\*K(2);  
 Qtrl (24, 49) = F(1)\*K(1);  
 Qtrl (24, 50) = F(1)\*K(1);

Qtrl (25, 26) = F(1)\*K(1);  
 Qtrl (25, 31) = F(1)\*K(1);  
 Qtrl (25, 32) = F(2)\*K(1);  
 Qtrl (25, 33) = F(3)\*K(2);  
 Qtrl (26, 34) = F(4)\*K(2);  
 Qtrl (26, 49) = F(1)\*K(1);  
 Qtrl (27, 28) = F(5)\*K(1);  
 Qtrl (27, 35) = F(6)\*K(2);  
 Qtrl (27, 49) = F(1)\*K(1);  
 Qtrl (28, 29) = F(1)\*K(1);  
 Qtrl (28, 30) = F(1)\*K(1);  
 Qtrl (28, 32) = F(2)\*K(1);  
 Qtrl (28, 36) = F(4)\*K(2);  
 Qtrl (29, 30) = F(1)\*K(1);  
 Qtrl (29, 37) = F(4)\*K(2);  
 Qtrl (30, 38) = F(4)\*K(2);  
 Qtrl (30, 50) = F(1)\*K(1);  
 Qtrl (31, 39) = F(4)\*K(2);  
 Qtrl (31, 50) = F(1)\*K(1);

```

Qtr1 (32, 40) = F(3)*K(2);
Qtr1 (32, 49) = F(1)*K(1);
Qtr1 (32, 50) = F(1)*K(1);

```

```

Qtr1 (33, 34) = F(1)*K(1);
Qtr1 (33, 39) = F(1)*K(1);
Qtr1 (33, 40) = F(2)*K(1);
Qtr1 (33, 41) = F(3)*K(2);
Qtr1 (34, 42) = F(4)*K(2);
Qtr1 (34, 49) = F(1)*K(1);
Qtr1 (35, 36) = F(5)*K(1);
Qtr1 (35, 43) = F(6)*K(2);
Qtr1 (35, 49) = F(1)*K(1);
Qtr1 (36, 37) = F(1)*K(1);
Qtr1 (36, 38) = F(1)*K(1);
Qtr1 (36, 40) = F(2)*K(1);
Qtr1 (36, 44) = F(4)*K(2);
Qtr1 (37, 38) = F(1)*K(1);
Qtr1 (37, 45) = F(4)*K(2);
Qtr1 (38, 46) = F(4)*K(2);
Qtr1 (38, 50) = F(1)*K(1);
Qtr1 (39, 47) = F(4)*K(2);
Qtr1 (39, 50) = F(1)*K(1);
Qtr1 (40, 48) = F(3)*K(2);
Qtr1 (40, 49) = F(1)*K(1);
Qtr1 (40, 50) = F(1)*K(1);

```

```

Qtr1 (41, 42) = F(1)*K(1);
Qtr1 (41, 47) = F(1)*K(1);
Qtr1 (41, 48) = F(2)*K(1);
Qtr1 (42, 49) = F(1)*K(1);
Qtr1 (43, 44) = F(5)*K(1);
Qtr1 (43, 49) = F(1)*K(1);
Qtr1 (44, 45) = F(1)*K(1);
Qtr1 (44, 46) = F(1)*K(1);
Qtr1 (44, 48) = F(2)*K(1);
Qtr1 (45, 46) = F(1)*K(1);
Qtr1 (46, 50) = F(1)*K(1);
Qtr1 (47, 50) = F(1)*K(1);
Qtr1 (48, 49) = F(1)*K(1);
Qtr1 (48, 50) = F(1)*K(1);

```

```

for ii = 1:50;
    for jj = ii:50;
        Qtr1 (jj, ii) = Qtr1 (ii, jj);
    end;
end;
Qtr2 = sparse(Qtr1);
for tcurrent=0:tstep:m;
    k = ceil(tcurrent/24/3600);
    k1 = ceil(tcurrent/24/3600/7);
    text=A/2*sin(-pi/2+(tcurrent/3600)*pi/12)+tav;
    options = optimoptions('fsolve','FunctionTolerance',0.00000001,
'MaxFunctionEvaluations', 40000, 'StepTolerance',1.0000e-10, 'MaxIterations',
1000);
    x = fsolve(@eqns,x0,options);

```

```

G1 (1, 2) = sqrt(abs(x(1)-x(2))/S(7))*sign(x(1)-x(2));
G1 (1, 7) = sqrt(abs(x(1)-x(7))/S(7))*sign(x(1)-x(7));
G1 (1, 8) = sqrt(abs(x(1)-x(8))/S(7))*sign(x(1)-x(8));
G1 (2, 87) = sqrt(abs(x(2)-P(1))/S(1))*sign(x(2)-P(1));
G1 (2, 52) = sqrt(abs(x(2)-x(52))/S(9))*sign(x(2)-x(52));
G1 (3, 88) = sqrt(abs(x(3)-P(2))/S(1))*sign(x(3)-P(2));
G1 (3, 4) = sqrt(abs(x(3)-x(4))/S(7))*sign(x(3)-x(4));

```

```

G1 (3, 52) = sqrt(abs(x(3)-x(52))/S(9))*sign(x(3)-x(52));
G1 (4, 8) = sqrt(abs(x(4)-x(8))/S(7))*sign(x(4)-x(8));
G1 (4, 5) = sqrt(abs(x(4)-x(5))/S(7))*sign(x(4)-x(5));
G1 (4, 6) = sqrt(abs(x(4)-x(6))/S(7))*sign(x(4)-x(6));
G1 (5, 89) = sqrt(abs(x(5)-P(3))/S(1))*sign(x(5)-P(3));
G1 (5, 54) = sqrt(abs(x(5)-x(54))/S(9))*sign(x(5)-x(54));
G1 (6, 90) = sqrt(abs(x(6)-P(4))/S(8))*sign(x(6)-P(4));
G1 (6, 123) = sqrt(abs(x(6)-P(37))/S(12))*sign(x(6)-P(37));
G1 (7, 92) = sqrt(abs(x(7)-P(6))/S(1))*sign(x(7)-P(6));
G1 (7, 51) = sqrt(abs(x(7)-x(51))/S(9))*sign(x(7)-x(51));
G1 (8, 49) = sqrt(abs(x(8)-x(49))/S(7))*sign(x(8)-x(49));
G1 (8, 50) = sqrt(abs(x(8)-x(50))/S(7))*sign(x(8)-x(50));

G1 (9, 10) = sqrt(abs(x(9)-x(10))/S(7))*sign(x(9)-x(10));
G1 (9, 16) = sqrt(abs(x(9)-x(16))/S(7))*sign(x(9)-x(16));
G1 (9, 15) = sqrt(abs(x(9)-x(15))/S(7))*sign(x(9)-x(15));
G1 (10, 93) = sqrt(abs(x(10)-P(7))/S(2))*sign(x(10)-P(7));
G1 (10, 52) = sqrt(abs(x(10)-x(52))/x(63))*sign(x(10)-x(52));
G1 (11, 94) = sqrt(abs(x(11)-P(8))/S(2))*sign(x(11)-P(8));
G1 (11, 12) = sqrt(abs(x(11)-x(12))/S(7))*sign(x(11)-x(12));
G1 (11, 53) = sqrt(abs(x(11)-x(53))/x(64))*sign(x(11)-x(53));
G1 (12, 13) = sqrt(abs(x(12)-x(13))/S(7))*sign(x(12)-x(13));
G1 (12, 14) = sqrt(abs(x(12)-x(14))/S(7))*sign(x(12)-x(14));
G1 (12, 16) = sqrt(abs(x(12)-x(16))/S(7))*sign(x(12)-x(16));
G1 (13, 95) = sqrt(abs(x(13)-P(9))/S(2))*sign(x(13)-P(9));
G1 (13, 54) = sqrt(abs(x(13)-x(54))/x(65))*sign(x(13)-x(54));
G1 (14, 96) = sqrt(abs(x(14)-P(10))/S(8))*sign(x(14)-P(10));
G1 (14, 123) = sqrt(abs(x(14)-P(37))/S(13))*sign(x(14)-P(37));
G1 (15, 98) = sqrt(abs(x(15)-P(12))/S(2))*sign(x(15)-P(12));
G1 (15, 51) = sqrt(abs(x(15)-x(51))/x(66))*sign(x(15)-x(51));
G1 (16, 49) = sqrt(abs(x(16)-x(49))/S(7))*sign(x(16)-x(49));
G1 (16, 50) = sqrt(abs(x(16)-x(50))/S(7))*sign(x(16)-x(50));

G1 (17, 18) = sqrt(abs(x(17)-x(18))/S(7))*sign(x(17)-x(18));
G1 (17, 23) = sqrt(abs(x(17)-x(23))/S(7))*sign(x(17)-x(23));
G1 (17, 24) = sqrt(abs(x(17)-x(24))/S(7))*sign(x(17)-x(24));
G1 (18, 99) = sqrt(abs(x(18)-P(13))/S(3))*sign(x(18)-P(13));
G1 (18, 56) = sqrt(abs(x(18)-x(56))/x(67))*sign(x(18)-x(56));
G1 (19, 100) = sqrt(abs(x(19)-P(14))/S(3))*sign(x(19)-P(14));
G1 (19, 20) = sqrt(abs(x(19)-x(20))/S(7))*sign(x(19)-x(20));
G1 (19, 57) = sqrt(abs(x(19)-x(57))/x(68))*sign(x(19)-x(57));
G1 (20, 21) = sqrt(abs(x(20)-x(21))/S(7))*sign(x(20)-x(21));
G1 (20, 22) = sqrt(abs(x(20)-x(22))/S(7))*sign(x(20)-x(22));
G1 (20, 24) = sqrt(abs(x(20)-x(24))/S(7))*sign(x(20)-x(24));
G1 (21, 101) = sqrt(abs(x(21)-P(15))/S(3))*sign(x(21)-P(15));
G1 (21, 58) = sqrt(abs(x(21)-x(58))/x(69))*sign(x(21)-x(58));
G1 (22, 102) = sqrt(abs(x(22)-P(16))/S(8))*sign(x(22)-P(16));
G1 (22, 123) = sqrt(abs(x(22)-P(37))/S(14))*sign(x(22)-P(37));
G1 (23, 104) = sqrt(abs(x(23)-P(18))/S(3))*sign(x(23)-P(18));
G1 (23, 55) = sqrt(abs(x(23)-x(55))/x(70))*sign(x(23)-x(55));
G1 (24, 49) = sqrt(abs(x(24)-x(49))/S(7))*sign(x(24)-x(49));
G1 (24, 50) = sqrt(abs(x(24)-x(50))/S(7))*sign(x(24)-x(50));

G1 (25, 26) = sqrt(abs(x(25)-x(26))/S(7))*sign(x(25)-x(26));
G1 (25, 31) = sqrt(abs(x(25)-x(31))/S(7))*sign(x(25)-x(31));
G1 (25, 32) = sqrt(abs(x(25)-x(32))/S(7))*sign(x(25)-x(32));
G1 (26, 105) = sqrt(abs(x(26)-P(19))/S(4))*sign(x(26)-P(19));
G1 (26, 60) = sqrt(abs(x(26)-x(60))/x(71))*sign(x(26)-x(60));
G1 (27, 106) = sqrt(abs(x(27)-P(20))/S(4))*sign(x(27)-P(20));
G1 (27, 28) = sqrt(abs(x(27)-x(28))/S(7))*sign(x(27)-x(28));
G1 (27, 61) = sqrt(abs(x(27)-x(61))/x(72))*sign(x(27)-x(61));
G1 (28, 29) = sqrt(abs(x(28)-x(29))/S(7))*sign(x(28)-x(29));
G1 (28, 30) = sqrt(abs(x(28)-x(30))/S(7))*sign(x(28)-x(30));
G1 (28, 32) = sqrt(abs(x(28)-x(32))/S(7))*sign(x(28)-x(32));
G1 (29, 107) = sqrt(abs(x(29)-P(21))/S(4))*sign(x(29)-P(21));

```

```

G1 (29, 62) = sqrt(abs(x(29)-x(62))/x(73))*sign(x(29)-x(62));
G1 (30, 108) = sqrt(abs(x(30)-P(22))/S(8))*sign(x(30)-P(22));
G1 (30, 123) = sqrt(abs(x(30)-P(37))/S(15))*sign(x(30)-P(37));
G1 (31, 110) = sqrt(abs(x(31)-P(24))/S(4))*sign(x(31)-P(24));
G1 (31, 59) = sqrt(abs(x(31)-x(59))/x(74))*sign(x(31)-x(59));
G1 (32, 49) = sqrt(abs(x(32)-x(49))/S(7))*sign(x(32)-x(49));
G1 (32, 50) = sqrt(abs(x(32)-x(50))/S(7))*sign(x(32)-x(50));

G1 (33, 34) = sqrt(abs(x(33)-x(34))/S(7))*sign(x(33)-x(34));
G1 (33, 39) = sqrt(abs(x(33)-x(39))/S(7))*sign(x(33)-x(39));
G1 (33, 40) = sqrt(abs(x(33)-x(40))/S(7))*sign(x(33)-x(40));
G1 (34, 111) = sqrt(abs(x(34)-P(25))/S(5))*sign(x(34)-P(25));
G1 (34, 123) = sqrt(abs(x(34)-P(37))/S(10))*sign(x(34)-P(37));
G1 (35, 112) = sqrt(abs(x(35)-P(26))/S(5))*sign(x(35)-P(26));
G1 (35, 36) = sqrt(abs(x(35)-x(36))/S(7))*sign(x(35)-x(36));
G1 (35, 123) = sqrt(abs(x(35)-P(37))/S(10))*sign(x(35)-P(37));
G1 (36, 37) = sqrt(abs(x(36)-x(37))/S(7))*sign(x(36)-x(37));
G1 (36, 38) = sqrt(abs(x(36)-x(38))/S(7))*sign(x(36)-x(38));
G1 (36, 40) = sqrt(abs(x(36)-x(40))/S(7))*sign(x(36)-x(40));
G1 (37, 113) = sqrt(abs(x(37)-P(27))/S(5))*sign(x(37)-P(27));
G1 (37, 123) = sqrt(abs(x(37)-P(37))/S(10))*sign(x(37)-P(37));
G1 (38, 114) = sqrt(abs(x(38)-P(28))/S(8))*sign(x(38)-P(28));
G1 (38, 123) = sqrt(abs(x(38)-P(37))/S(10))*sign(x(38)-P(37));
G1 (39, 116) = sqrt(abs(x(39)-P(30))/S(5))*sign(x(39)-P(30));
G1 (39, 123) = sqrt(abs(x(39)-P(37))/S(10))*sign(x(39)-P(37));
G1 (40, 49) = sqrt(abs(x(40)-x(49))/S(7))*sign(x(40)-x(49));
G1 (40, 50) = sqrt(abs(x(40)-x(50))/S(7))*sign(x(40)-x(50));

G1 (41, 42) = sqrt(abs(x(41)-x(42))/S(7))*sign(x(41)-x(42));
G1 (41, 47) = sqrt(abs(x(41)-x(47))/S(7))*sign(x(41)-x(47));
G1 (41, 48) = sqrt(abs(x(41)-x(48))/S(7))*sign(x(41)-x(48));
G1 (42, 117) = sqrt(abs(x(42)-P(31))/S(6))*sign(x(42)-P(31));
G1 (42, 123) = sqrt(abs(x(42)-P(37))/S(11))*sign(x(42)-P(37));
G1 (43, 118) = sqrt(abs(x(43)-P(32))/S(6))*sign(x(43)-P(32));
G1 (43, 44) = sqrt(abs(x(43)-x(44))/S(7))*sign(x(43)-x(44));
G1 (43, 123) = sqrt(abs(x(43)-P(37))/S(11))*sign(x(43)-P(37));
G1 (44, 45) = sqrt(abs(x(44)-x(45))/S(7))*sign(x(44)-x(45));
G1 (44, 46) = sqrt(abs(x(44)-x(46))/S(7))*sign(x(44)-x(46));
G1 (44, 48) = sqrt(abs(x(44)-x(48))/S(7))*sign(x(44)-x(48));
G1 (45, 119) = sqrt(abs(x(45)-P(33))/S(6))*sign(x(45)-P(33));
G1 (45, 123) = sqrt(abs(x(45)-P(37))/S(11))*sign(x(45)-P(37));
G1 (46, 120) = sqrt(abs(x(46)-P(34))/S(8))*sign(x(46)-P(34));
G1 (46, 123) = sqrt(abs(x(46)-P(37))/S(11))*sign(x(46)-P(37));
G1 (47, 122) = sqrt(abs(x(47)-P(36))/S(6))*sign(x(47)-P(36));
G1 (47, 123) = sqrt(abs(x(47)-P(37))/S(11))*sign(x(47)-P(37));
G1 (48, 49) = sqrt(abs(x(48)-x(49))/S(7))*sign(x(48)-x(49));
G1 (48, 50) = sqrt(abs(x(48)-x(50))/S(7))*sign(x(48)-x(50));

G1 (49, 123) = sqrt(abs(x(49)-P(37))/2/S(7))*sign(x(49)-P(37));
G1 (50, 91) = sqrt(abs(x(49)-P(5))/S(8)*2)*sign(x(49)-P(5));
G1 (50, 97) = sqrt(abs(x(49)-P(11))/S(8)*2)*sign(x(49)-P(11));
G1 (50, 103) = sqrt(abs(x(49)-P(17))/S(8)*2)*sign(x(49)-P(17));
G1 (50, 109) = sqrt(abs(x(49)-P(23))/S(8)*2)*sign(x(49)-P(23));
G1 (50, 115) = sqrt(abs(x(49)-P(29))/S(8)*2)*sign(x(49)-P(29));
G1 (50, 121) = sqrt(abs(x(49)-P(35))/S(8)*2)*sign(x(49)-P(35));
G1 (50, 123) = sqrt(abs(x(50)-P(37))/S(8)*2)*sign(x(50)-P(37));

G1 (51, 55) = sqrt(abs(x(51)-x(55))/x(78))*sign(x(51)-x(55));
G1 (52, 56) = sqrt(abs(x(52)-x(56))/x(75))*sign(x(52)-x(56));
G1 (53, 57) = sqrt(abs(x(53)-x(57))/x(76))*sign(x(53)-x(57));
G1 (54, 58) = sqrt(abs(x(54)-x(58))/x(77))*sign(x(54)-x(58));
G1 (55, 59) = sqrt(abs(x(55)-x(59))/x(82))*sign(x(55)-x(59));
G1 (56, 60) = sqrt(abs(x(56)-x(60))/x(79))*sign(x(56)-x(60));
G1 (57, 61) = sqrt(abs(x(57)-x(61))/x(80))*sign(x(57)-x(61));
G1 (58, 62) = sqrt(abs(x(58)-x(62))/x(81))*sign(x(58)-x(62));

```

```

G1 (59, 123) = sqrt(abs(x(59)-P(37))/x(86))*sign(x(59)-P(37));
G1 (60, 123) = sqrt(abs(x(60)-P(37))/x(83))*sign(x(60)-P(37));
G1 (61, 123) = sqrt(abs(x(61)-P(37))/x(84))*sign(x(61)-P(37));
G1 (62, 123) = sqrt(abs(x(62)-P(37))/x(85))*sign(x(62)-P(37));

for ii = 1:123;
    for jj = ii:123;
        G1 (jj, ii) = -G1 (ii, jj);
    end;
end;

for ii = 1:123;
    for jj = 1:123;
        if G1 (ii, jj) < 0;
            G1 (ii, jj) = 0;
        end;
    end;
end;

G = sparse(G1);

for ii=63:123;
    if ii<=86;
        t1(ii)=0;
    else
        t1(ii)=text;
    end;
end;

for ii=1:123;
    for jj=1:123;
        t(ii, jj) = t1(ii)-t1(jj);
    end;
end;

Q1=G*t;

    for ii=1:50;
        jj=ii;
        Qvent(ii) = Q1(ii,jj)*1005/3600*tstep;
    end;

for ii=1:50;
    if ((k1-1)*7+6)*24*3600<=tcurrent && (tcurrent<=((k1-1)*7+7)*24*3600);
        Qint(ii)=0;
    else
        if ((8+(k-1)*24)*3600<=tcurrent) && (tcurrent<=((17+(k-1)*24)*3600
            if t1(ii) <= 20;
                Qint(ii) = Qint1(ii)*tstep;
            elseif t1(ii) >= 36.6;
                Qint(ii) = Qeq(ii)*tstep;
            else
                Qint(ii) = (Qeq(ii)+(Qint1(ii)-Qeq(ii))*(t1(ii)-
20)/16.6)*tstep;
            end;
        else Qint(ii)=0;
        end;
    end;

Qh1(ii) = Qh11(ii)*(t1(ii)-text)/(t1(ii)-t5)*tstep;
    if t1(ii) >= 26;
        Qhs(ii) = 0;
    else
        Qhs(ii) = Qhs1(ii)*(t1(ii)-text)/(t1(ii)-t5)*tstep;
    end;
end;

```

```

        end;
end;

deltaTtr = t (1:50, 1:50);

Qtr3 = Qtr2*deltaTtr;

for ii=1:50;
    jj=ii;
    Qtr(ii) = Qtr3(ii,jj)*tstep;
end;

Q=-Qhl+Qhs+Qtr+Qint+Qvent;

for ii=1:50;
deltat(ii)=Q(ii)/1216/V(ii);

tnext(ii)=t1(ii)+deltat(ii);
end;

Pnext (1)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(2)))*h(1)*9.81 + Pdyn;
Pnext (2)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(3)))*h(2)*9.81 + Pdyn;
Pnext (3)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(5)))*h(3)*9.81;
Pnext (4)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(6)))*h(4)*9.81;
Pnext (5)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(50)))*h(5)*9.81;
Pnext (6)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(7)))*h(6)*9.81;

Pnext (7)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(10)))*h(7)*9.81 + Pdyn;
Pnext (8)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(11)))*h(8)*9.81 + Pdyn;
Pnext (9)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(13)))*h(9)*9.81;
Pnext (10)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(14)))*h(10)*9.81;
Pnext (11)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(50)))*h(11)*9.81;
Pnext (12)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(15)))*h(12)*9.81;

Pnext (13)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(18)))*h(13)*9.81 + Pdyn;
Pnext (14)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(19)))*h(14)*9.81 + Pdyn;
Pnext (15)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(21)))*h(15)*9.81;
Pnext (16)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(22)))*h(16)*9.81;
Pnext (17)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(50)))*h(17)*9.81;
Pnext (18)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(23)))*h(18)*9.81;

Pnext (19)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(26)))*h(19)*9.81 + Pdyn;
Pnext (20)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(27)))*h(20)*9.81 + Pdyn;
Pnext (21)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(29)))*h(21)*9.81;
Pnext (22)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(30)))*h(22)*9.81;
Pnext (23)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(50)))*h(23)*9.81;
Pnext (24)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(31)))*h(24)*9.81;

Pnext (25)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(34)))*h(25)*9.81 + Pdyn;
Pnext (26)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(35)))*h(26)*9.81 + Pdyn;
Pnext (27)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(37)))*h(27)*9.81;
Pnext (28)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(38)))*h(28)*9.81;
Pnext (29)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(50)))*h(29)*9.81;
Pnext (30)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(39)))*h(30)*9.81;

Pnext (31)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(42)))*h(31)*9.81 + Pdyn;
Pnext (32)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(43)))*h(32)*9.81 + Pdyn;
Pnext (33)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(45)))*h(33)*9.81;
Pnext (34)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(46)))*h(34)*9.81;
Pnext (35)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(50)))*h(35)*9.81;
Pnext (36)=(353/(273+text)-353/(273+tnext(47)))*h(36)*9.81;

```

```

Pnext(37)=0;

time = tcurrent/3600

hold on;
figure (1);
plot(time,t1 (1), 'bx',time,t1 (2), 'rx',time,t1 (3)
, 'cx',time,t1(4), 'm+',time,t1(5), 'gx',time,t1(6), 'yx',time,t1(7), 'kx',time,t1(8)
), 'ko');
axis( [ 0, 192, 15, 35 ] );
grid on;

hold on;
figure (2);
plot(time,t1(9), 'bx',time,t1(10), 'rx',time,t1(11), 'cx',time,t1(12), 'm+',time,t1
(13), 'gx',time,t1(14), 'yx',time,t1(15), 'kx',time,t1(16), 'ko');
axis( [ 0, 192, 15, 35 ] );
grid on;

hold on;
figure (3);
plot(time,t1(17), 'bx',time,t1(18), 'rx',time,t1(19), 'cx',time,t1(20), 'm+',time,t
1(21), 'gx',time,t1(22), 'yx',time,t1(23), 'kx',time,t1(24), 'ko');
axis( [ 0, 192, 15, 35 ] );
grid on;

hold on;
figure (4);
plot(time,t1(25), 'bx',time,t1(26), 'rx',time,t1(27), 'cx',time,t1(28), 'm+',time,t
1(29), 'gx',time,t1(30), 'yx',time,t1(31), 'kx',time,t1(32), 'ko');
axis( [ 0, 192, 15, 35 ] );
grid on;

hold on;
figure (5);
plot(time,t1(33), 'bx',time,t1(34), 'rx',time,t1(35), 'cx',time,t1(36), 'm+',time,t
1(37), 'gx',time,t1(38), 'yx',time,t1(39), 'kx',time,t1(40), 'ko');
axis( [ 0, 192, 15, 35 ] );
grid on;

hold on;
figure (6);
plot(time,t1(41), 'bx',time,t1(42), 'rx',time,t1(43), 'cx',time,t1(44), 'm+',time,t
1(45), 'gx',time,t1(46), 'yx',time,t1(47), 'kx',time,t1(48), 'ko');
axis( [ 0, 192, 15, 35 ] );
grid on;

hold on;
figure (7);
plot(time,t1(49), 'bx',time,t1(50), 'rx');
axis( [ 0, 192, 5, 35 ] );
grid on;

% hold on;
% figure (8);
% plot(time, G (87, 2), 'rx',time, G (88, 3), 'rx',time, G (89, 5),
'rx',time, G (90, 6), 'rx',time, G (92, 7), 'rx', ...

```



```

%     time, G (93, 10), 'go',time, G (94, 11), 'go',time, G (95, 13),
'go',time, G (96, 14), 'go',time, G (98, 15), 'go', ...
%     time, G (99, 18), 'b*',time, G (100, 19), 'b*',time, G (101, 21),
'b*',time, G (102, 22), 'b*',time, G (104, 23), 'b*', ...
%     time, G (105, 26), 'c+',time, G (106, 27), 'c+',time, G (107, 29),
'c+',time, G (108, 30), 'c+',time, G (110, 31), 'c+', ...
%     time, G (111, 34), 'y.',time, G (112, 35), 'y.',time, G (113, 37),
'y.',time, G (114, 38), 'y.',time, G (116, 39), 'y.', ...
%     time, G (117, 42), 'ko',time, G (118, 43), 'ko',time, G (119, 45),
'ko',time, G (120, 46), 'ko',time, G (122, 47), 'ko');
%     axis( [ 0, 192, 0, 220 ] );
%     grid on;

%hold on
%plot (time, tstep, 'k+');
%grid on;
%axis( [ 0, 288, 0, 110 ] );
for ii=1:48;
    if t1 (ii) >= 24;
        tstep = 30;
        break;
    else
        tstep = 100
    end;
end;
t1 = tnext;
P = Pnext;
x0=x;
Qw1 = sum(sum(Qhs))/sum(sum(Qhl));
end;
fclose(fit1);
fclose(fit2);
fclose(fit3);
fclose(fit4);
fclose(fit5);
fclose(fit6);
fclose(fit7);
fclose(fit8);
fclose(fit9);
fclose(fit10);

fclose(fit11);
fclose(fit12);
fclose(fit13);
fclose(fit14);
fclose(fit15);
fclose(fit16);
fclose(fit17);
fclose(fit18);
fclose(fit19);
fclose(fit20);

fclose(fit21);
fclose(fit22);
fclose(fit23);
fclose(fit24);
fclose(fit25);
fclose(fit26);
fclose(fit27);
fclose(fit28);
fclose(fit29);
fclose(fit30);

fclose(fit31);

```

```
fclose (fit32);
fclose (fit33);
fclose (fit34);
fclose (fit35);
fclose (fit36);
fclose (fit37);
fclose (fit38);
fclose (fit39);
fclose (fit40);
```

```
fclose (fit41);
fclose (fit42);
fclose (fit43);
fclose (fit44);
fclose (fit45);
fclose (fit46);
fclose (fit47);
fclose (fit48);
fclose (fit49);
fclose (fit50);
```

```
fclose (fiG2);
fclose (fiG3);
fclose (fiG5);
fclose (fiG6);
fclose (fiG7);
fclose (fiG10);
fclose (fiG11);
fclose (fiG13);
fclose (fiG14);
fclose (fiG15);
fclose (fiG18);
fclose (fiG19);
fclose (fiG21);
fclose (fiG22);
fclose (fiG23);
fclose (fiG26);
fclose (fiG27);
fclose (fiG29);
fclose (fiG30);
fclose (fiG31);
fclose (fiG34);
fclose (fiG35);
fclose (fiG37);
fclose (fiG38);
fclose (fiG39);
fclose (fiG42);
fclose (fiG43);
fclose (fiG45);
fclose (fiG46);
fclose (fiG47);
```

### Подпрограмма «eqns»:

```
function F = eqns (x)
global P;
global S;
F = [
    sqrt (abs (x (1) - x (2)) / S (7)) * sign (x (1) - x (2)) + sqrt (abs (x (1) -
x (7)) / S (7)) * sign (x (1) - x (7)) + sqrt (abs (x (1) - x (8)) / S (7)) * sign (x (1) - x (8));
    sqrt (abs (x (2) - P (1)) / S (1)) * sign (x (2) - P (1)) + sqrt (abs (x (2) -
x (1)) / S (7)) * sign (x (2) - x (1)) + sqrt (abs (x (2) - x (52)) / S (9)) * sign (x (2) - x (52));
    sqrt (abs (x (3) - P (2)) / S (1)) * sign (x (3) - P (2)) + sqrt (abs (x (3) -
x (4)) / S (7)) * sign (x (3) - x (4)) + sqrt (abs (x (3) - x (52)) / S (9)) * sign (x (3) - x (52));
```

$\sqrt{\text{abs}(x(4)-x(3))/S(7)} * \text{sign}(x(4)-x(3)) + \sqrt{\text{abs}(x(4)-x(8))/S(7)} * \text{sign}(x(4)-x(8)) + \sqrt{\text{abs}(x(4)-x(5))/S(7)} * \text{sign}(x(4)-x(5)) + \sqrt{\text{abs}(x(4)-x(6))/S(7)} * \text{sign}(x(4)-x(6));$   
 $\sqrt{\text{abs}(x(5)-P(3))/S(1)} * \text{sign}(x(5)-P(3)) + \sqrt{\text{abs}(x(5)-x(4))/S(7)} * \text{sign}(x(5)-x(4)) + \sqrt{\text{abs}(x(5)-x(54))/S(9)} * \text{sign}(x(5)-x(54));$   
 $\sqrt{\text{abs}(x(6)-P(4))/S(8)} * \text{sign}(x(6)-P(4)) + \sqrt{\text{abs}(x(6)-x(4))/S(7)} * \text{sign}(x(6)-x(4)) + \sqrt{\text{abs}(x(6)-P(37))/S(12)} * \text{sign}(x(6)-P(37));$   
 $\sqrt{\text{abs}(x(7)-P(6))/S(1)} * \text{sign}(x(7)-P(6)) + \sqrt{\text{abs}(x(7)-x(1))/S(7)} * \text{sign}(x(7)-x(1)) + \sqrt{\text{abs}(x(7)-x(51))/S(9)} * \text{sign}(x(7)-x(51));$   
 $\sqrt{\text{abs}(x(8)-x(1))/S(7)} * \text{sign}(x(8)-x(1)) + \sqrt{\text{abs}(x(8)-x(4))/S(7)} * \text{sign}(x(8)-x(4)) + \sqrt{\text{abs}(x(8)-x(49))/S(7)} * \text{sign}(x(8)-x(49)) + \sqrt{\text{abs}(x(8)-x(50))/S(7)} * \text{sign}(x(8)-x(50));$

$\sqrt{\text{abs}(x(9)-x(10))/S(7)} * \text{sign}(x(9)-x(10)) + \sqrt{\text{abs}(x(9)-x(16))/S(7)} * \text{sign}(x(9)-x(16)) + \sqrt{\text{abs}(x(9)-x(15))/S(7)} * \text{sign}(x(9)-x(15));$   
 $\sqrt{\text{abs}(x(10)-P(7))/S(2)} * \text{sign}(x(10)-P(7)) + \sqrt{\text{abs}(x(10)-x(9))/S(7)} * \text{sign}(x(10)-x(9)) + \sqrt{\text{abs}(x(10)-x(52))/x(63)} * \text{sign}(x(10)-x(52));$   
 $\sqrt{\text{abs}(x(11)-P(8))/S(2)} * \text{sign}(x(11)-P(8)) + \sqrt{\text{abs}(x(11)-x(12))/S(7)} * \text{sign}(x(11)-x(12)) + \sqrt{\text{abs}(x(11)-x(53))/x(64)} * \text{sign}(x(11)-x(53));$   
 $\sqrt{\text{abs}(x(12)-x(11))/S(7)} * \text{sign}(x(12)-x(11)) + \sqrt{\text{abs}(x(12)-x(13))/S(7)} * \text{sign}(x(12)-x(13)) + \sqrt{\text{abs}(x(12)-x(14))/S(7)} * \text{sign}(x(12)-x(14)) + \sqrt{\text{abs}(x(12)-x(16))/S(7)} * \text{sign}(x(12)-x(16));$   
 $\sqrt{\text{abs}(x(13)-P(9))/S(2)} * \text{sign}(x(13)-P(9)) + \sqrt{\text{abs}(x(13)-x(12))/S(7)} * \text{sign}(x(13)-x(12)) + \sqrt{\text{abs}(x(13)-x(54))/x(65)} * \text{sign}(x(13)-x(54));$   
 $\sqrt{\text{abs}(x(14)-P(10))/S(8)} * \text{sign}(x(14)-P(10)) + \sqrt{\text{abs}(x(14)-x(12))/S(7)} * \text{sign}(x(14)-x(12)) + \sqrt{\text{abs}(x(14)-P(37))/S(13)} * \text{sign}(x(14)-P(37));$   
 $\sqrt{\text{abs}(x(15)-P(12))/S(2)} * \text{sign}(x(15)-P(12)) + \sqrt{\text{abs}(x(15)-x(9))/S(7)} * \text{sign}(x(15)-x(9)) + \sqrt{\text{abs}(x(15)-x(51))/x(66)} * \text{sign}(x(15)-x(51));$   
 $\sqrt{\text{abs}(x(16)-x(9))/S(7)} * \text{sign}(x(16)-x(9)) + \sqrt{\text{abs}(x(16)-x(12))/S(7)} * \text{sign}(x(16)-x(12)) + \sqrt{\text{abs}(x(16)-x(49))/S(7)} * \text{sign}(x(16)-x(49)) + \sqrt{\text{abs}(x(16)-x(50))/S(7)} * \text{sign}(x(16)-x(50));$   
 $\sqrt{\text{abs}(x(17)-x(18))/S(7)} * \text{sign}(x(17)-x(18)) + \sqrt{\text{abs}(x(17)-x(23))/S(7)} * \text{sign}(x(17)-x(23)) + \sqrt{\text{abs}(x(17)-x(24))/S(7)} * \text{sign}(x(17)-x(24));$   
 $\sqrt{\text{abs}(x(18)-P(13))/S(3)} * \text{sign}(x(18)-P(13)) + \sqrt{\text{abs}(x(18)-x(17))/S(7)} * \text{sign}(x(18)-x(17)) + \sqrt{\text{abs}(x(18)-x(56))/x(67)} * \text{sign}(x(18)-x(56));$   
 $\sqrt{\text{abs}(x(19)-P(14))/S(3)} * \text{sign}(x(19)-P(14)) + \sqrt{\text{abs}(x(19)-x(20))/S(7)} * \text{sign}(x(19)-x(20)) + \sqrt{\text{abs}(x(19)-x(57))/x(68)} * \text{sign}(x(19)-x(57));$   
 $\sqrt{\text{abs}(x(20)-x(19))/S(7)} * \text{sign}(x(20)-x(19)) + \sqrt{\text{abs}(x(20)-x(21))/S(7)} * \text{sign}(x(20)-x(21)) + \sqrt{\text{abs}(x(20)-x(22))/S(7)} * \text{sign}(x(20)-x(22)) + \sqrt{\text{abs}(x(20)-x(24))/S(7)} * \text{sign}(x(20)-x(24));$   
 $\sqrt{\text{abs}(x(21)-P(15))/S(3)} * \text{sign}(x(21)-P(15)) + \sqrt{\text{abs}(x(21)-x(20))/S(7)} * \text{sign}(x(21)-x(20)) + \sqrt{\text{abs}(x(21)-x(58))/x(69)} * \text{sign}(x(21)-x(58));$   
 $\sqrt{\text{abs}(x(22)-P(16))/S(8)} * \text{sign}(x(22)-P(16)) + \sqrt{\text{abs}(x(22)-x(20))/S(7)} * \text{sign}(x(22)-x(20)) + \sqrt{\text{abs}(x(22)-P(37))/S(14)} * \text{sign}(x(22)-P(37));$   
 $\sqrt{\text{abs}(x(23)-P(18))/S(3)} * \text{sign}(x(23)-P(18)) + \sqrt{\text{abs}(x(23)-x(17))/S(7)} * \text{sign}(x(23)-x(17)) + \sqrt{\text{abs}(x(23)-x(55))/x(70)} * \text{sign}(x(23)-x(55));$   
 $\sqrt{\text{abs}(x(24)-x(17))/S(7)} * \text{sign}(x(24)-x(17)) + \sqrt{\text{abs}(x(24)-x(20))/S(7)} * \text{sign}(x(24)-x(20)) + \sqrt{\text{abs}(x(24)-x(49))/S(7)} * \text{sign}(x(24)-x(49)) + \sqrt{\text{abs}(x(24)-x(50))/S(7)} * \text{sign}(x(24)-x(50));$

$\sqrt{\text{abs}(x(25)-x(26))/S(7)} * \text{sign}(x(25)-x(26)) + \sqrt{\text{abs}(x(25)-x(31))/S(7)} * \text{sign}(x(25)-x(31)) + \sqrt{\text{abs}(x(25)-x(32))/S(7)} * \text{sign}(x(25)-x(32));$   
 $\sqrt{\text{abs}(x(26)-P(19))/S(4)} * \text{sign}(x(26)-P(19)) + \sqrt{\text{abs}(x(26)-x(25))/S(7)} * \text{sign}(x(26)-x(25)) + \sqrt{\text{abs}(x(26)-x(60))/x(71)} * \text{sign}(x(26)-x(60));$   
 $\sqrt{\text{abs}(x(27)-P(20))/S(4)} * \text{sign}(x(27)-P(20)) + \sqrt{\text{abs}(x(27)-x(28))/S(7)} * \text{sign}(x(27)-x(28)) + \sqrt{\text{abs}(x(27)-x(61))/x(72)} * \text{sign}(x(27)-x(61));$   
 $\sqrt{\text{abs}(x(28)-x(27))/S(7)} * \text{sign}(x(28)-x(27)) + \sqrt{\text{abs}(x(28)-x(29))/S(7)} * \text{sign}(x(28)-x(29)) + \sqrt{\text{abs}(x(28)-x(30))/S(7)} * \text{sign}(x(28)-x(30)) + \sqrt{\text{abs}(x(28)-x(32))/S(7)} * \text{sign}(x(28)-x(32));$   
 $\sqrt{\text{abs}(x(29)-P(21))/S(4)} * \text{sign}(x(29)-P(21)) + \sqrt{\text{abs}(x(29)-x(28))/S(7)} * \text{sign}(x(29)-x(28)) + \sqrt{\text{abs}(x(29)-x(62))/x(73)} * \text{sign}(x(29)-x(62));$   
 $\sqrt{\text{abs}(x(30)-P(22))/S(8)} * \text{sign}(x(30)-P(22)) + \sqrt{\text{abs}(x(30)-x(28))/S(7)} * \text{sign}(x(30)-x(28)) + \sqrt{\text{abs}(x(30)-P(37))/S(15)} * \text{sign}(x(30)-P(37));$   
 $\sqrt{\text{abs}(x(31)-P(24))/S(4)} * \text{sign}(x(31)-P(24)) + \sqrt{\text{abs}(x(31)-x(25))/S(7)} * \text{sign}(x(31)-x(25)) + \sqrt{\text{abs}(x(31)-x(59))/x(74)} * \text{sign}(x(31)-x(59));$

$$\begin{aligned} & \sqrt{\text{abs}(x(32)-x(25))/S(7)} * \text{sign}(x(32)-x(25)) + \sqrt{\text{abs}(x(32)-x(28))/S(7)} * \text{sign}(x(32)-x(28)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(32)-x(49))/S(7)} * \text{sign}(x(32)-x(49)) + \sqrt{\text{abs}(x(32)-x(50))/S(7)} * \text{sign}(x(32)-x(50)); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sqrt{\text{abs}(x(33)-x(34))/S(7)} * \text{sign}(x(33)-x(34)) + \sqrt{\text{abs}(x(33)-x(39))/S(7)} * \text{sign}(x(33)-x(39)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(33)-x(40))/S(7)} * \text{sign}(x(33)-x(40)); \\ & \sqrt{\text{abs}(x(34)-P(25))/S(5)} * \text{sign}(x(34)-P(25)) + \sqrt{\text{abs}(x(34)-x(33))/S(7)} * \text{sign}(x(34)-x(33)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(34)-P(37))/S(10)} * \text{sign}(x(34)-P(37)); \\ & \sqrt{\text{abs}(x(35)-P(26))/S(5)} * \text{sign}(x(35)-P(26)) + \sqrt{\text{abs}(x(35)-x(36))/S(7)} * \text{sign}(x(35)-x(36)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(35)-P(37))/S(10)} * \text{sign}(x(35)-P(37)); \\ & \sqrt{\text{abs}(x(36)-x(35))/S(7)} * \text{sign}(x(36)-x(35)) + \sqrt{\text{abs}(x(36)-x(37))/S(7)} * \text{sign}(x(36)-x(37)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(36)-x(38))/S(7)} * \text{sign}(x(36)-x(38)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(36)-x(40))/S(7)} * \text{sign}(x(36)-x(40)); \\ & \sqrt{\text{abs}(x(37)-P(27))/S(5)} * \text{sign}(x(37)-P(27)) + \sqrt{\text{abs}(x(37)-x(36))/S(7)} * \text{sign}(x(37)-x(36)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(37)-P(37))/S(10)} * \text{sign}(x(37)-P(37)); \\ & \sqrt{\text{abs}(x(38)-P(28))/S(8)} * \text{sign}(x(38)-P(28)) + \sqrt{\text{abs}(x(38)-x(36))/S(7)} * \text{sign}(x(38)-x(36)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(38)-P(37))/S(10)} * \text{sign}(x(38)-P(37)); \\ & \sqrt{\text{abs}(x(39)-P(30))/S(5)} * \text{sign}(x(39)-P(30)) + \sqrt{\text{abs}(x(39)-x(33))/S(7)} * \text{sign}(x(39)-x(33)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(39)-P(37))/S(10)} * \text{sign}(x(39)-P(37)); \\ & \sqrt{\text{abs}(x(40)-x(33))/S(7)} * \text{sign}(x(40)-x(33)) + \sqrt{\text{abs}(x(40)-x(36))/S(7)} * \text{sign}(x(40)-x(36)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(40)-x(49))/S(7)} * \text{sign}(x(40)-x(49)) + \sqrt{\text{abs}(x(40)-x(50))/S(7)} * \text{sign}(x(40)-x(50)); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sqrt{\text{abs}(x(41)-x(42))/S(7)} * \text{sign}(x(41)-x(42)) + \sqrt{\text{abs}(x(41)-x(47))/S(7)} * \text{sign}(x(41)-x(47)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(41)-x(48))/S(7)} * \text{sign}(x(41)-x(48)); \\ & \sqrt{\text{abs}(x(42)-P(31))/S(6)} * \text{sign}(x(42)-P(31)) + \sqrt{\text{abs}(x(42)-x(41))/S(7)} * \text{sign}(x(42)-x(41)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(42)-P(37))/S(11)} * \text{sign}(x(42)-P(37)); \\ & \sqrt{\text{abs}(x(43)-P(32))/S(6)} * \text{sign}(x(43)-P(32)) + \sqrt{\text{abs}(x(43)-x(44))/S(7)} * \text{sign}(x(43)-x(44)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(43)-P(37))/S(11)} * \text{sign}(x(43)-P(37)); \\ & \sqrt{\text{abs}(x(44)-x(43))/S(7)} * \text{sign}(x(44)-x(43)) + \sqrt{\text{abs}(x(44)-x(45))/S(7)} * \text{sign}(x(44)-x(45)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(44)-x(46))/S(7)} * \text{sign}(x(44)-x(46)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(44)-x(48))/S(7)} * \text{sign}(x(44)-x(48)); \\ & \sqrt{\text{abs}(x(45)-P(33))/S(6)} * \text{sign}(x(45)-P(33)) + \sqrt{\text{abs}(x(45)-x(44))/S(7)} * \text{sign}(x(45)-x(44)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(45)-P(37))/S(11)} * \text{sign}(x(45)-P(37)); \\ & \sqrt{\text{abs}(x(46)-P(34))/S(8)} * \text{sign}(x(46)-P(34)) + \sqrt{\text{abs}(x(46)-x(44))/S(7)} * \text{sign}(x(46)-x(44)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(46)-P(37))/S(11)} * \text{sign}(x(46)-P(37)); \\ & \sqrt{\text{abs}(x(47)-P(36))/S(6)} * \text{sign}(x(47)-P(36)) + \sqrt{\text{abs}(x(47)-x(41))/S(7)} * \text{sign}(x(47)-x(41)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(47)-P(37))/S(11)} * \text{sign}(x(47)-P(37)); \\ & \sqrt{\text{abs}(x(48)-x(41))/S(7)} * \text{sign}(x(48)-x(41)) + \sqrt{\text{abs}(x(48)-x(44))/S(7)} * \text{sign}(x(48)-x(44)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(48)-x(49))/S(7)} * \text{sign}(x(48)-x(49)) + \sqrt{\text{abs}(x(48)-x(50))/S(7)} * \text{sign}(x(48)-x(50)); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sqrt{\text{abs}(x(49)-x(8))/S(7)} * \text{sign}(x(49)-x(8)) + \sqrt{\text{abs}(x(49)-x(16))/S(7)} * \text{sign}(x(49)-x(16)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(49)-x(24))/S(7)} * \text{sign}(x(49)-x(24)) + \sqrt{\text{abs}(x(49)-x(32))/S(7)} * \text{sign}(x(49)-x(32)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(49)-x(40))/S(7)} * \text{sign}(x(49)-x(40)) + \sqrt{\text{abs}(x(49)-x(48))/2/S(7)} * \text{sign}(x(49)-x(48)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(49)-P(37))/2/S(7)} * \text{sign}(x(49)-P(37)); \\ & \sqrt{\text{abs}(x(50)-x(8))/S(7)} * \text{sign}(x(50)-x(8)) + \sqrt{\text{abs}(x(50)-x(16))/S(7)} * \text{sign}(x(50)-x(16)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(50)-x(24))/S(7)} * \text{sign}(x(50)-x(24)) + \sqrt{\text{abs}(x(50)-x(32))/S(7)} * \text{sign}(x(50)-x(32)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(50)-x(40))/S(7)} * \text{sign}(x(50)-x(40)) + \sqrt{\text{abs}(x(50)-x(48))/2/S(7)} * \text{sign}(x(50)-x(48)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(50)-P(5))/2/S(7)} * \text{sign}(x(50)-P(5)) + \sqrt{\text{abs}(x(50)-P(11))/2/S(7)} * \text{sign}(x(50)-P(11)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(50)-P(17))/2/S(7)} * \text{sign}(x(50)-P(17)) + \sqrt{\text{abs}(x(50)-P(23))/2/S(7)} * \text{sign}(x(50)-P(23)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(50)-P(29))/2/S(7)} * \text{sign}(x(50)-P(29)) + \sqrt{\text{abs}(x(50)-P(35))/2/S(7)} * \text{sign}(x(50)-P(35)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(50)-P(37))/2/S(7)} * \text{sign}(x(50)-P(37)); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sqrt{\text{abs}(x(51)-x(7))/S(9)} * \text{sign}(x(51)-x(7)) + \sqrt{\text{abs}(x(51)-x(15))/x(66)} * \text{sign}(x(51)-x(15)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(51)-x(55))/x(78)} * \text{sign}(x(51)-x(55)); \\ & \sqrt{\text{abs}(x(52)-x(2))/S(9)} * \text{sign}(x(52)-x(2)) + \sqrt{\text{abs}(x(52)-x(10))/x(63)} * \text{sign}(x(52)-x(10)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(52)-x(56))/x(75)} * \text{sign}(x(52)-x(56)); \\ & \sqrt{\text{abs}(x(53)-x(3))/S(9)} * \text{sign}(x(53)-x(3)) + \sqrt{\text{abs}(x(53)-x(11))/x(64)} * \text{sign}(x(53)-x(11)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(53)-x(57))/x(76)} * \text{sign}(x(53)-x(57)); \\ & \sqrt{\text{abs}(x(54)-x(5))/S(9)} * \text{sign}(x(54)-x(5)) + \sqrt{\text{abs}(x(54)-x(13))/x(65)} * \text{sign}(x(54)-x(13)) \\ & + \sqrt{\text{abs}(x(54)-x(58))/x(77)} * \text{sign}(x(54)-x(58)); \end{aligned}$$

```

sqrt(abs(x(55)-x(51))/x(78))*sign(x(55)-x(51))+sqrt(abs(x(55)-
x(23))/x(70))*sign(x(55)-x(23))+sqrt(abs(x(55)-x(59))/x(82))*sign(x(55)-x(59));
sqrt(abs(x(56)-x(52))/x(75))*sign(x(56)-x(52))+sqrt(abs(x(56)-
x(18))/x(67))*sign(x(56)-x(18))+sqrt(abs(x(56)-x(60))/x(79))*sign(x(56)-x(60));
sqrt(abs(x(57)-x(53))/x(76))*sign(x(57)-x(53))+sqrt(abs(x(57)-
x(19))/x(68))*sign(x(57)-x(19))+sqrt(abs(x(57)-x(61))/x(80))*sign(x(57)-x(61));
sqrt(abs(x(58)-x(54))/x(77))*sign(x(58)-x(54))+sqrt(abs(x(58)-
x(21))/x(69))*sign(x(58)-x(21))+sqrt(abs(x(58)-x(62))/x(81))*sign(x(58)-x(62));

```

```

sqrt(abs(x(59)-x(55))/x(82))*sign(x(59)-x(55))+sqrt(abs(x(59)-
x(31))/x(74))*sign(x(59)-x(31))+sqrt(abs(x(59)-P(37))/x(86))*sign(x(59)-P(37));
sqrt(abs(x(60)-x(56))/x(79))*sign(x(60)-x(56))+sqrt(abs(x(60)-
x(26))/x(71))*sign(x(60)-x(26))+sqrt(abs(x(60)-P(37))/x(83))*sign(x(60)-P(37));
sqrt(abs(x(61)-x(57))/x(80))*sign(x(61)-x(57))+sqrt(abs(x(61)-
x(27))/x(72))*sign(x(61)-x(27))+sqrt(abs(x(61)-P(37))/x(84))*sign(x(61)-P(37));
sqrt(abs(x(62)-x(58))/x(81))*sign(x(62)-x(58))+sqrt(abs(x(62)-
x(29))/x(73))*sign(x(62)-x(29))+sqrt(abs(x(62)-P(37))/x(85))*sign(x(62)-P(37));

```

```

3.44*10^(-6)*(4.78+2.1*log(sqrt(abs(((x(10)-x(52))/x(52)-
x(56)))*x(75)/x(63))))-x(63);
3.44*10^(-6)*(4.78+2.1*log(sqrt(abs(((x(11)-x(53))/x(53)-
x(57)))*x(76)/x(64))))-x(64);
3.44*10^(-6)*(4.78+2.1*log(sqrt(abs(((x(13)-x(54))/x(54)-
x(58)))*x(77)/x(65))))-x(65);
3.44*10^(-6)*(4.78+2.1*log(sqrt(abs(((x(15)-x(51))/x(51)-
x(55)))*x(78)/x(66))))-x(66);
3.44*10^(-6)*(4.78+2.1*log(sqrt(abs(((x(18)-x(56))/x(56)-
x(60)))*x(79)/x(67))))-x(67);
3.44*10^(-6)*(4.78+2.1*log(sqrt(abs(((x(19)-x(57))/x(57)-
x(61)))*x(80)/x(68))))-x(68);
3.44*10^(-6)*(4.78+2.1*log(sqrt(abs(((x(21)-x(58))/x(58)-
x(62)))*x(81)/x(69))))-x(69);
3.44*10^(-6)*(4.78+2.1*log(sqrt(abs(((x(23)-x(55))/x(55)-
x(59)))*x(82)/x(70))))-x(70);
3.44*10^(-6)*(4.78+2.1*log(sqrt(abs(((x(26)-x(60))/x(60)-
P(37)))*x(83)/x(71))))-x(71);
3.44*10^(-6)*(4.78+2.1*log(sqrt(abs(((x(27)-x(61))/x(61)-
P(37)))*x(84)/x(72))))-x(72);
3.44*10^(-6)*(4.78+2.1*log(sqrt(abs(((x(29)-x(62))/x(62)-
P(37)))*x(85)/x(73))))-x(73);
3.44*10^(-6)*(4.78+2.1*log(sqrt(abs(((x(31)-x(59))/x(59)-
P(37)))*x(86)/x(74))))-x(74);

```

```

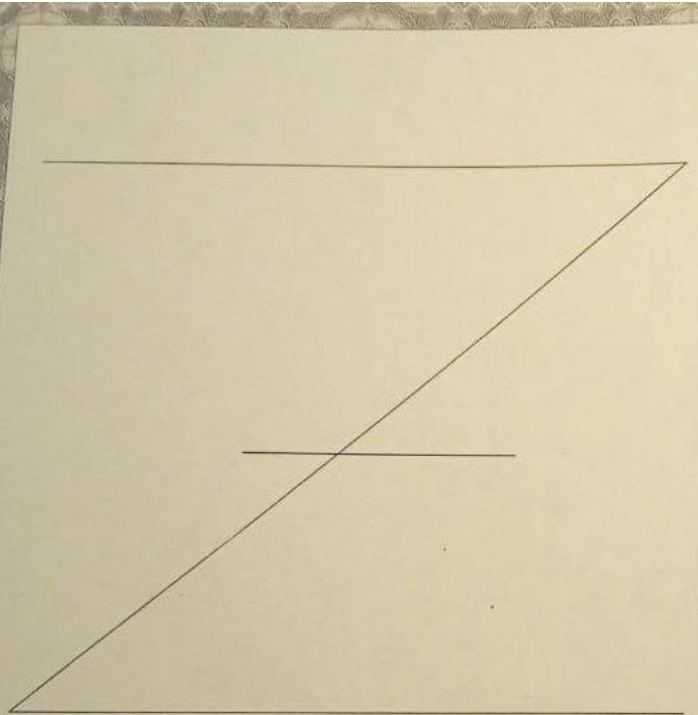
7.784*10^(-8)*(11.25+92.2^(sqrt(abs(((x(10)-x(52))/x(52)-
x(56)))*x(75)/x(63))))-x(75);
7.784*10^(-8)*(11.25+92.2^(sqrt(abs(((x(11)-x(53))/x(53)-
x(57)))*x(76)/x(64))))-x(76);
7.784*10^(-8)*(11.25+92.2^(sqrt(abs(((x(13)-x(54))/x(54)-
x(58)))*x(77)/x(65))))-x(77);
7.784*10^(-8)*(11.25+92.2^(sqrt(abs(((x(15)-x(51))/x(51)-
x(55)))*x(78)/x(66))))-x(78);
7.784*10^(-8)*(11.25+92.2^(sqrt(abs(((x(18)-x(56))/x(56)-
x(60)))*x(79)/x(67))))-x(79);
7.784*10^(-8)*(11.25+92.2^(sqrt(abs(((x(19)-x(57))/x(57)-
x(61)))*x(80)/x(68))))-x(80);
7.784*10^(-8)*(11.25+92.2^(sqrt(abs(((x(21)-x(58))/x(58)-
x(62)))*x(81)/x(69))))-x(81);
7.784*10^(-8)*(11.25+92.2^(sqrt(abs(((x(23)-x(55))/x(55)-
x(59)))*x(82)/x(70))))-x(82);
7.784*10^(-8)*(11.25+92.2^(sqrt(abs(((x(26)-x(60))/x(60)-
P(37)))*x(83)/x(71))))-x(83);
7.784*10^(-8)*(11.25+92.2^(sqrt(abs(((x(27)-x(61))/x(61)-
P(37)))*x(84)/x(72))))-x(84);

```

```
7.784*10^(-8)*(11.25+92.2^(sqrt(abs((x(29)-x(62))/(x(62)-
P(37)))*x(85)/x(73)))))-x(85);
7.784*10^(-8)*(11.25+92.2^(sqrt(abs((x(31)-x(59))/(x(59)-
P(37)))*x(86)/x(74)))))-x(86);]
end
```

## Приложение 3

## Свидетельство о поверке измерительного оборудования

	<p>ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И ИСПЫТАНИЙ В Г. МОСКВЕ, (ФБУ - РОСТЕСТ - МОСКВА-)</p>
	<p><b>СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ</b></p> <p>№ СП 0455145</p>
	<p>Действительно до « 04 » июля 2015 г.</p>
	<p>Эталон (средство измерений) <u>Измеритель комбинированный Testo 425</u> <small>изменение, тип (если в состав средства измерений входит несколько автономных блоков,</small></p>
	<p><u>диапазон измерений температуры (-20...70) °С</u> <small>то приводит их перечню)</small></p>
	<p>Серия и номер клейма предыдущей поверки (если такие серия и номер имеются) <u>отсутствуют</u></p>
	<p>заводской номер (номера) <u>02753817/403</u></p>
	<p>принадлежащее <u>ООО Фармацевтическая Компания</u> <small>наименование юридического (физического) лица, ИП/И</small></p>
	<p><u>"Новые Технологии", ИНН 5042065150</u></p>
	<p>поверено в соответствии с <u>МП РТ 1574-2011</u> <small>наименование и номер документа на методику поверки</small></p>
	<p>с применением эталонов: <u>Регистрационные номера:</u> <small>наименование, заводской номер, разряд, класс или погрешность</small> <u>3.1.ZMA.0165.2013, 3.1.ZMA.0156.2013</u></p>
	<p>при следующих значениях влияющих факторов: <u>t=20,5 °С; RH=55 %;</u> <small>приводит перечень</small></p>
	<p><u>Ратм =750 мм рт. ст.</u> <small>влияющих факторов, нормированных в документе на методику поверки, с указанием их значений и на основании результатов <u>первичной (периодической) поверки</u> признано пригодным к применению.</small></p>
	<p>Поверительное клеймо</p>
	<p>Начальник лаборатории №442 <u>С.Н. Ненашев</u> <small>должность руководителя подразделения</small> <small>подпись</small> <small>инициалы, фамилия</small></p>
	<p>Поверитель <u>О.Ю. Афонина</u> <small>подпись</small> <small>инициалы, фамилия</small></p>
	<p>« 04 » июля 2014 г.</p>
<p>117418 Москва, Нахимовский пр., 31 Call-Центр: 495-544-00-00 тел. 499-129-19-11 факс: 499-124-99-96 Email: info@rostest.ru, www.rostest.ru</p> <p style="font-size: 2em; font-weight: bold;">77</p>	
	