

На правах рукописи



Кравчук Валерий Юрьевич

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

Специальность:

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

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва – 2023

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

Научный  
руководитель:

**Саргсян Самвел Володяевич**  
кандидат технических наук, доцент

Официальные  
оппоненты:

**Васильев Григорий Петрович**  
доктор технических наук,  
ОАО «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ»,  
научный руководитель

**Грановский Виктор Леонидович**  
кандидат технических наук,  
ООО «Ридан»,  
Технический директор

Ведущая  
организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)»

Защита диссертации состоится «7» июня 2023 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.339.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, (студия № 9 «Открытая сеть»).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» [www.mgsu.ru](http://www.mgsu.ru).

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Исполняющий обязанности  
учёного секретаря диссертационного совета



Орлов Владимир  
Александрович

## **Общая характеристика работы**

### **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-теплового 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-теплового 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-теплового 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 натуральных 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 алгоритмизированного 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 теплообмена, 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 теплообмена; 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 теплогазоснабжения, 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 Е 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.

#### **Основное содержание работы**

**В первой главе** диссертации сделан обзор результатов теоретических и экспериментальных работ по теории естественного воздухообмена и теории фильтрации. Приведены имеющиеся решения гибридных энергоэффективных систем вентиляции; описаны основные положения теории фильтрации и теории гидравлических сетей; приведены результаты патентного и информационного поиска.

**Во второй главе** приводится постановка задачи. Описаны общие конструктивные решения элементов системы гибридной реверсивной вентиляции; определены условия смены режимов ее работы. Приведены основные положения моделирования ВТРЗ. Выполнен предварительный расчет расхода воздуха через проницаемый элемент. Описан способ решения нелинейной сетевой задачи распределения воздушных и тепловых потоков в здании.

Система гибридной реверсивной вентиляции – это система, в которой воздух изменяет направление движения по воздуховодам, в зависимости от наружных метеорологических условий, что происходит при последовательной смене холодного и теплого периодов года. Такая система имеет два режима работы:

1. Естественный (приток воздуха с улицы в помещения через приточно-вытяжные устройства, движение воздуха в каналах или воздуховодах и удаление его в верхней части здания: на кровле, в зоне чердака или технического этажа).
2. Обратный или реверсивный режим (забор притока в верхней части здания приточной установкой, движение воздуха по каналам или воздуховодам в помещения и удаление его через приточно-вытяжные устройства).

Для нормальной работы система должна быть оборудована индивидуальными приточно-вытяжными устройствами, воздуховодами для перемещения воздуха, приточной установкой и набором регулирующих клапанов. Схемы работы системы реверсивной вентиляции представлены на рисунке 1.

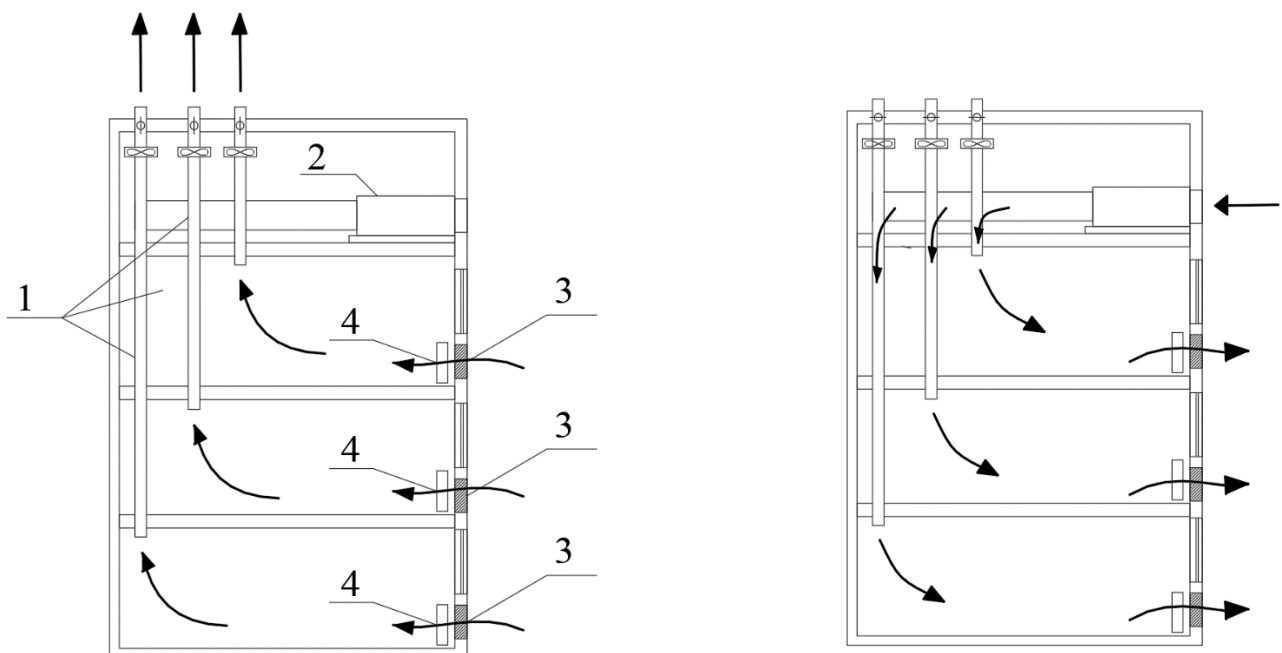
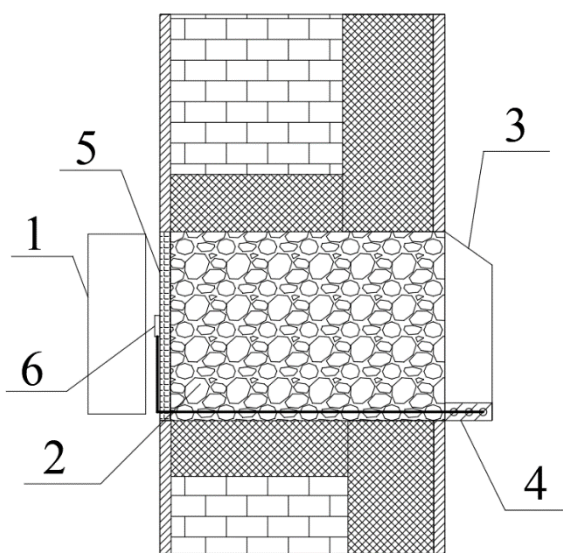


Рисунок 1 – Схема естественного (слева) и реверсивного (справа) режимов работы системы реверсивной вентиляции. 1 – вытяжные каналы, 2 – приточная установка, 3 – индивидуальные приточно-вытяжные устройства, 4 – отопительные приборы.

Естественный режим работы имеет место в холодный период года, когда приточный воздух поступает в помещения здания через приточно-вытяжные устройства, а после ассимиляции вредных веществ удаляется из помещений через воздуховоды под действием естественных сил. Приточная установка в данном режиме бездействует. Индивидуальные приточно-вытяжные устройства располагаются под окном в проеме наружной стены за отопительным прибором. При таком расположении приточный воздух поступает в помещение микроструями и подогревается при фильтрации. Тепловая мощность отопительного прибора подбирается так, чтобы компенсировать тепловые потери помещения за счет теплопередачи и нагревать приточный воздух до температуры, соответствующей санитарным нормам. Начало переходного периода года характеризуется среднесуточной температурой наружного воздуха  $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В этот период система отопления уже отключена и нагревание приточного воздуха невозможно, поэтому режим работы системы вентиляции изменяется на обратный (реверсивный). В этом режиме наружный воздух забирается с улицы приточной установкой, расположенной на техническом этаже помещения, обрабатывается в её секциях и подается по вентиляционным каналам в обратном направлении в помещения. При этом вытяжная шахта системы вентиляции отключается от сети воздуховодов клапанами. После ассимиляции тепло- и влагоизбытков загрязненный воздух удаляется из помещения через индивидуальные приточно-вытяжные устройства на



улицу. Предлагаемая конструкция устройства представлена на рисунке 2.

Рисунок 2 – Конструкция приточно-вытяжного устройства. 1 – отопительный прибор, 2 – пористая среда, 3 – ветроотбойный щиток, 4 – регулирующая решётка, 5 – фильтр G3, 6 – регулятор прямого действия (закрывается при понижении температуры воздуха за прибором).

Воздухопроницаемый элемент заполнен крупнозернистой засыпкой. Такое наполнение позволяет создать необходимый тепловой и аэродинамический режим, а также является лучшим (чем мелкопористые материалы)

решением с эксплуатационной точки зрения.

В третьей главе диссертации было проведено экспериментальное и теоретическое исследование фильтрации в крупнозернистых засыпках. Экспериментальное исследование проводилось с целью определения коэффициентов фильтрации, которые будут применяться далее при решении сопряженной задачи тепломассообмена в пористой среде. При сборке испытательной установки использовалась уже известная схема, предложенная Р.Е.



Брилингом. На собранной установке выполнялся ряд испытаний по определению расходов воздуха, проходящих через образцы засыпок. Проводилось несколько серий экспериментов, в которых средний диаметр зерен засыпки изменялся от 17 до 26 мм, толщина образца от 100 до 400 мм и перепад давления от 5 до 100 Па. По результатам испытаний строилась зависимость между перепадом давления на торцах образца и скоростью воздуха в порах, формирующейся при данном перепаде. Скорость в порах определялась по осредненным характеристикам. Результирующая погрешность измерений, определённая статистическими методами, составила 8 %. Все измерительные приборы имеют свидетельство о поверке.



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

Во второй части главы было выполнено моделирование фильтрации в пористой среде. Использовалось уравнение фильтрации:

$$\nabla p = C_1 \cdot \nabla w_f + C_2 \cdot \nabla w_f^2, \quad C_1 = \frac{\mu}{k}, \quad C_2 = K_{loss} \cdot \frac{\rho}{2} \quad (1)$$

где  $p$  – давление, Па,

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

$k$  – проницаемость пористой среды, м<sup>2</sup>,

$K_{loss}$  – коэффициент квадратичных потерь, кг/м<sup>4</sup>,

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

$C_{R1}$  и  $C_{R2}$  – коэффициенты фильтрации.

Полученные точки аппроксимировались зависимостью вида

$$\Delta p = a w_f + b w_f^2 \quad (2)$$

Коэффициенты фильтрации определялись по выражениям

$$C_{R1} = \frac{a}{\Delta x}; C_{R2} = \frac{b}{\Delta x} \quad (3)$$

Сравнение результатов эксперимента и моделирования по найденным коэффициентам приведено на рисунках 4-6.

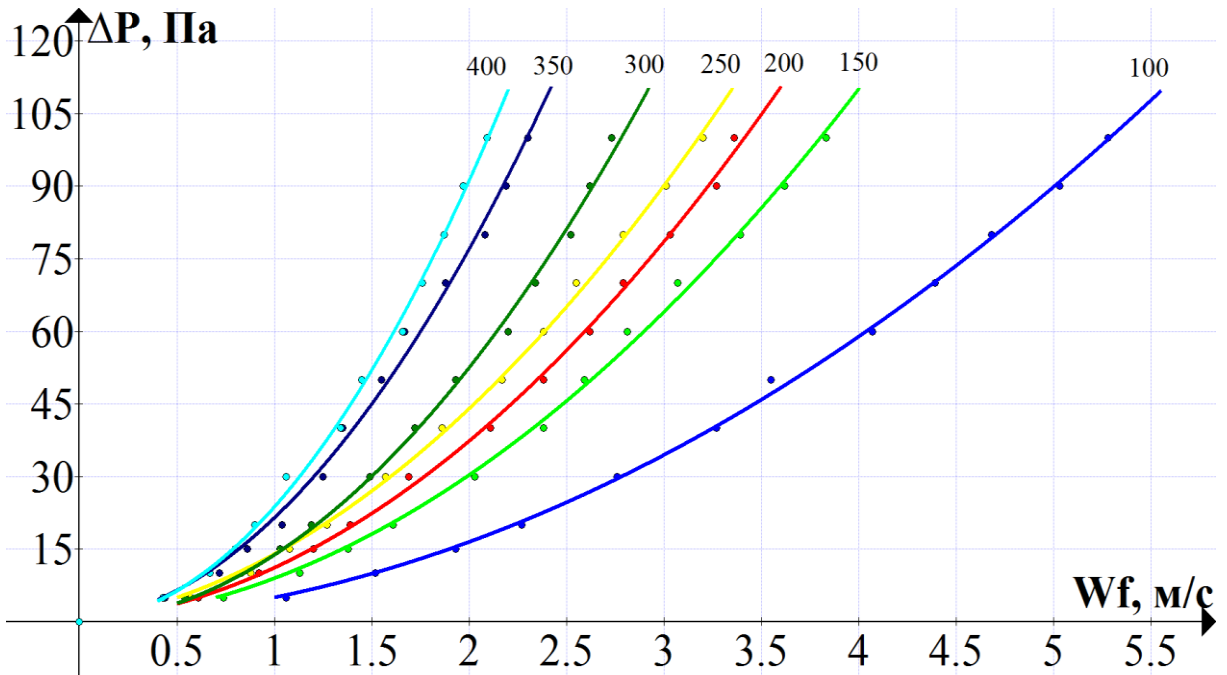


Рисунок 4 – Результаты расчета и опыта для образца с диаметром зерна 17 мм.

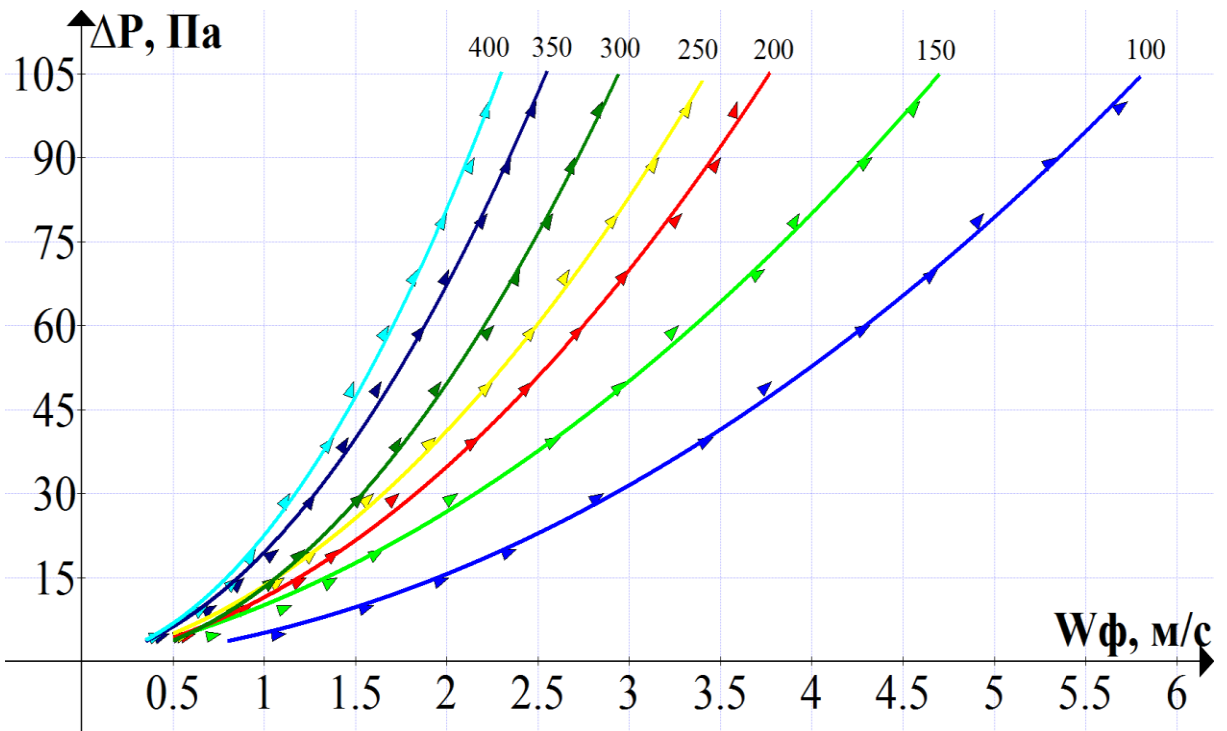


Рисунок 5 – Результаты расчета и опыта для образца с диаметром зерна 21.5 мм.

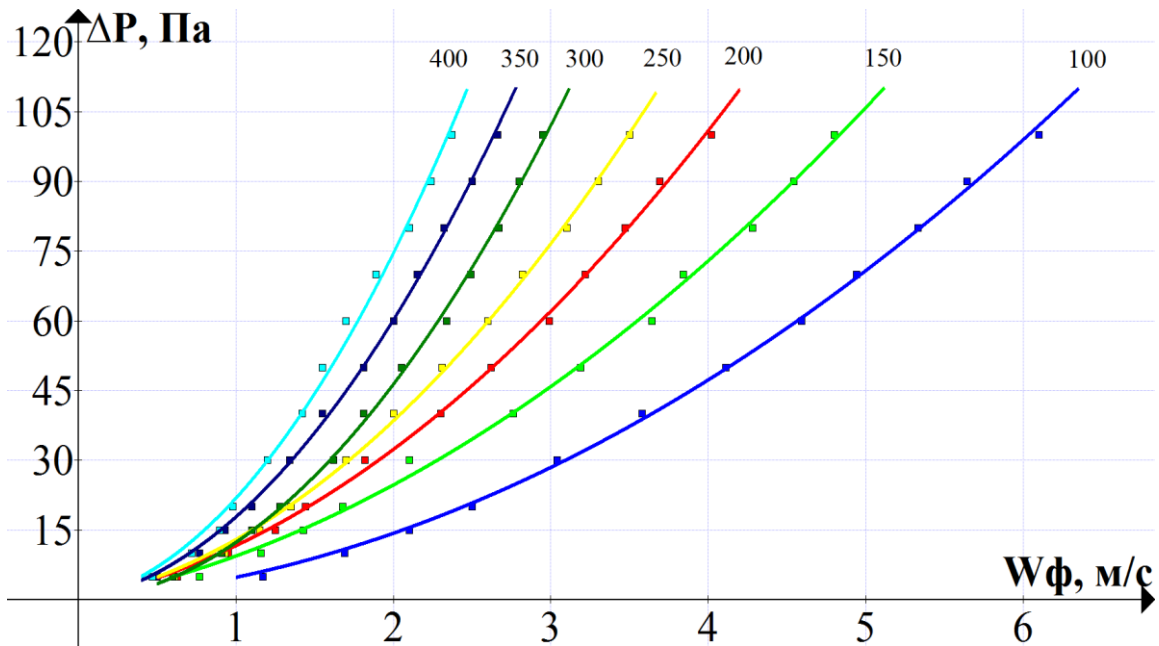


Рисунок 6 – результаты расчета и опыта для образца с диаметром зерна 26 мм.

На графиках по вертикали откладывается созданный на торцах образца перепад давления, по горизонтали – средняя скорость движения воздуха в порах среды. Серии точек одного цвета соответствуют образцам одной толщины. Толщина образца указана в миллиметрах в верхней части графика. Сплошными линиями представлена аппроксимация уравнением фильтрации.

Проведённый эксперимент валидирует математическую модель фильтрации, предлагаемую программным комплексом ANSYS CFX для случая зернистых материалов с фракцией от 17 до 26 мм.

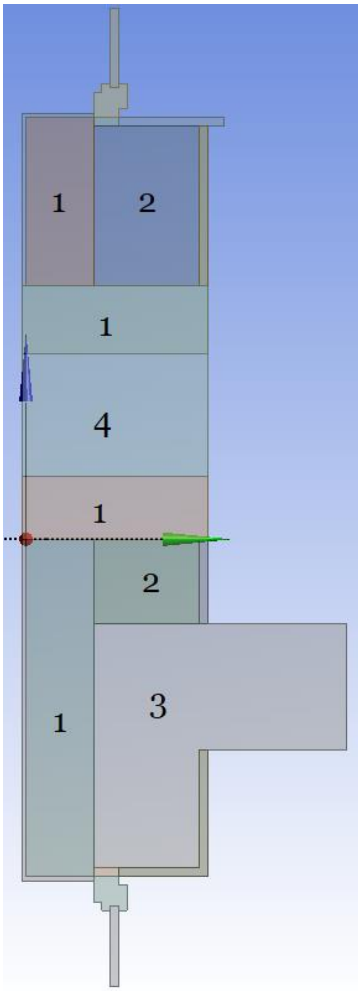
**Четвертая глава** диссертации условно поделена на два раздела. В первом рассматривается движение воздуха в пористой вставке; здесь изучению подлежит теплообмен в пористой среде при различных краевых условиях. Во втором разделе рассматривается задача теплообмена в конкретном здании с системой гибридной реверсивной вентиляции. Результаты первого раздела учитываются во втором, где дополнительное охлаждение стены вследствие фильтрации холодного воздуха учитывается в тепловом балансе помещений в соответствии с методикой, приведенной в главе 5 диссертации. Разрез рассчитываемого ограждения представлен на рисунке 7. Система дифференциальных уравнений, решаемых в рамках параграфа следующая:

1. Уравнение движения воздуха, приведенное ранее при экспериментально определенных коэффициентах.

2. Уравнение энтальпии воздуха

$$\frac{\partial \rho H}{\partial \tau} = -\nabla(w \cdot \rho \cdot H) + S_k + \frac{Q_{fs}}{\gamma}, \quad (4)$$

где  $\gamma$  – пористость среды,



$\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>,  
 $H$  – энтальпия воздуха, Дж/кг,  
 $S_k$  – интенсивность источников тепла в воздухе, Вт/м<sup>3</sup>,  
 $Q_{fs}$  – тепловой поток от воздуха к твердому скелету материала, Вт/м<sup>3</sup>.

Рисунок 7 – Схема ограждения. 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 слои ( $\lambda=0,76$  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)).

3. Уравнение теплообмена для структуры пористой среды

$$\frac{\partial \rho_s C_s t_s}{\partial \tau} = \nabla(\lambda \cdot \nabla t_s) + S_s + \frac{Q_{sf}}{1 - \gamma}, \quad (5)$$

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

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

$t_s$  – температура материала, К,

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала,

Вт/(м·К),

$Q_{sf}$  – тепловой поток от твердого скелета материала к воздуху, Вт/м<sup>3</sup>.

Моделирование выполняется при переменных параметрах, влияющих на формирование температурных полей. Результаты предварительных расчетов приведены на рисунке 8.

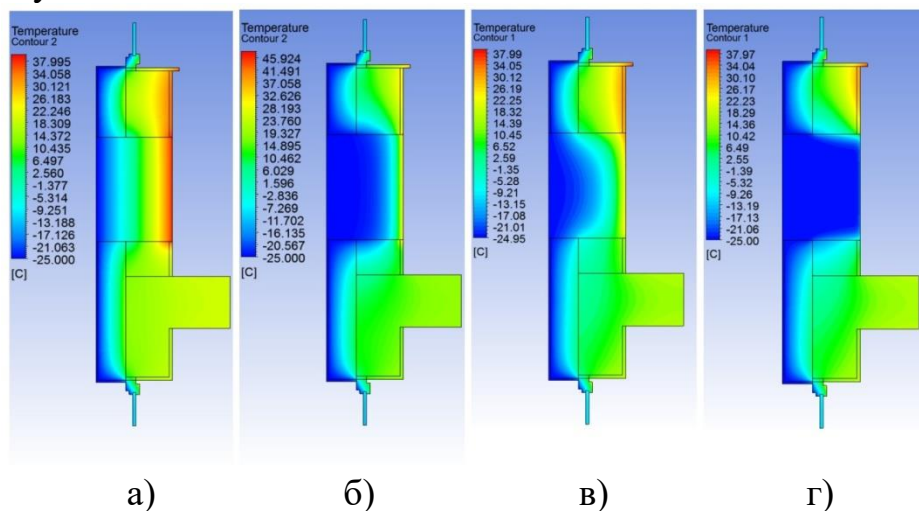


Рисунок 8 – результаты физико-математического моделирования. а)  $w_f=0,1$  м/с;  $\lambda_s=70$  Вт/(м·К);  $\Delta T=70$  °С;  $d=0,0015$  м; б)  $w_f=0,3$  м/с;  $\lambda_s=10$  Вт/(м·К);  $\Delta T=45$  °С;  $d=0,05$  м; в)  $w_f=0,3$  м/с;  $\lambda_s=70$  Вт/(м·К);  $\Delta T=70$  °С;  $d=0,0015$  м; г)  $w_f=0,3$  м/с;  $\lambda_s=10$  Вт/(м·К);  $\Delta T < 45$  °С;  $d=0,05$  м.

В общем случае 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 выражать 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

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

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

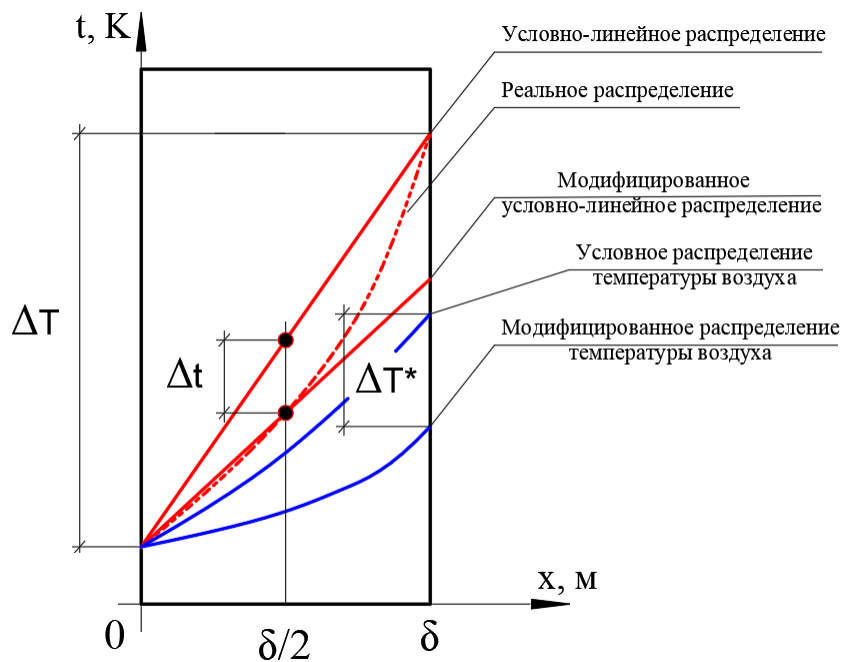
Коэффициент теплоотдачи можно поставить в зависимость от других параметров в соответствии с критериальным уравнением, полученным М.Э. Аэровым и О.М. Годесом. Число Прандтля можно осреднить по температуре, тогда  $t_s, t_f = f(\lambda_s, w_f, \Delta T, d)$ , что значительно упрощает задачу.

Температурное поле имеет достаточно сложный характер, и описать его аналитически – трудно. Поэтому для определения температуры следует использовать упрощённое аналитическое выражение (7), которое было получено линеаризацией распределения температуры по структуре пористой среды.

$$t_n = t_n - \Delta T \left( a \cdot e^{-\frac{1}{a}} \cdot \left( e^{\frac{1}{a}} - 1 \right) + 1 \right) + \Delta T^*, \quad (7)$$

Теперь необходимо выявить сочетания параметров  $\lambda_s, w_f, \Delta T, d$ , при которых в засыпке возникает близкое к линейному температурное поле, а также определить область применения и погрешность, возникающую в случае замены нелинейного поля линейным. Эта формула даёт некоторое отклонение  $\Delta T^*$  от реально наблюдаемого значения, компенсировать которую можно разработав схему замены температурных полей (рисунок 9). С учётом этого отклонения температуру притока можно рассчитать настолько точно, насколько это только позволяют современные методы математического моделирования.

Для вычисления  $\Delta T^*$  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.

Рисунок 9. Схема замены нелинейного температурного поля структуры на линейное.

По результатам расчета и анализа более чем 2000 распределений температур,

возникающих в данном диапазоне параметров, построены графики, представленные в приложении Б диссертации. 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 9).

Графики отклонений  $\Delta T^*$  расчетной температуры притока от действительной представлены в приложении В диссертации. Правила использования графиков при проектировании будут показаны далее.

Во втором разделе четвертой главы решается внутренняя задача воздушно-теплового режима здания. По математической классификации это нелинейная сетевая задача, параметры узлов которой находятся из системы уравнений, содержащей балансовые значения расходов для этих узлов. Был написан программный код, приведенный в приложении Г диссертации, на который получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ (приложение Ж диссертации). В запрограммированном алгоритме впервые применялся адаптивный временной шаг и матричные операции. Результаты работы алгоритма представлены на рисунке 11. На рисунке 10 представлена расчетная тепломассообменная схема рассматриваемого здания.

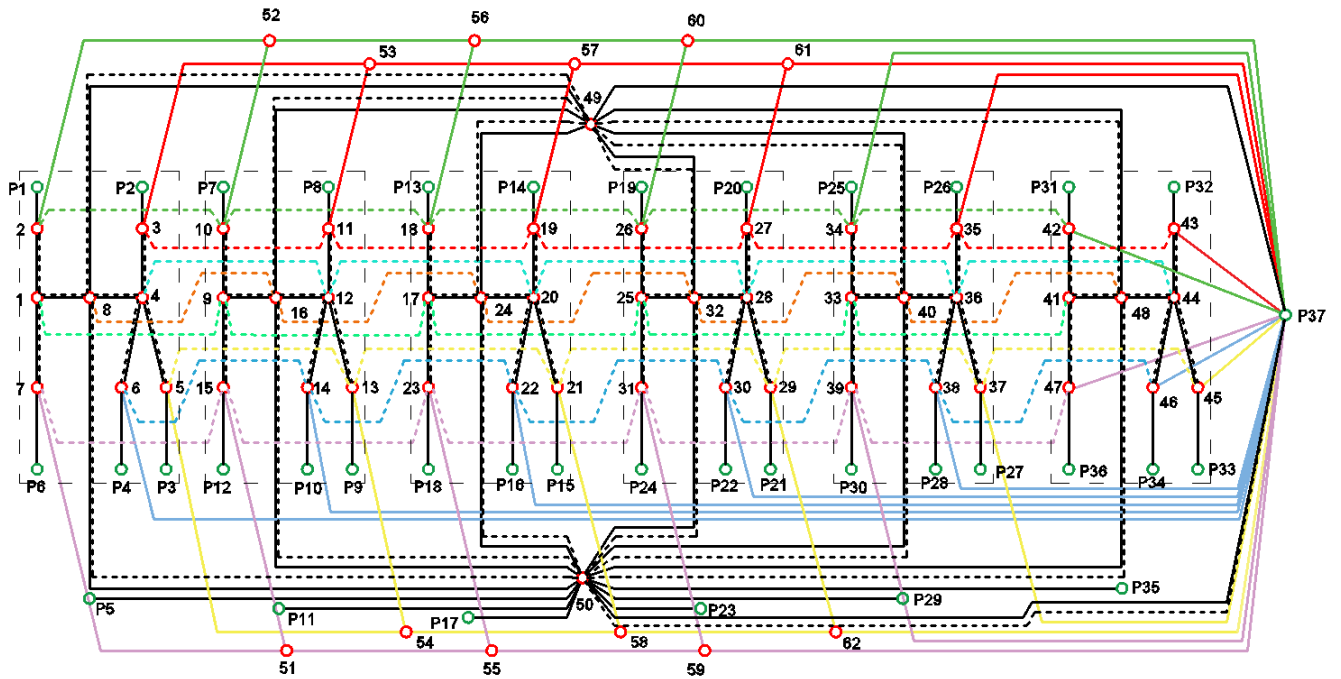


Рисунок 10 – Общая расчетная схема нестационарного воздушно-теплового режима рассматриваемого объекта. Пунктирами обозначены теплообменные связи, сплошными линиями – аэродинамические. Узлы красного цвета – внутренние, зеленые – граничные.

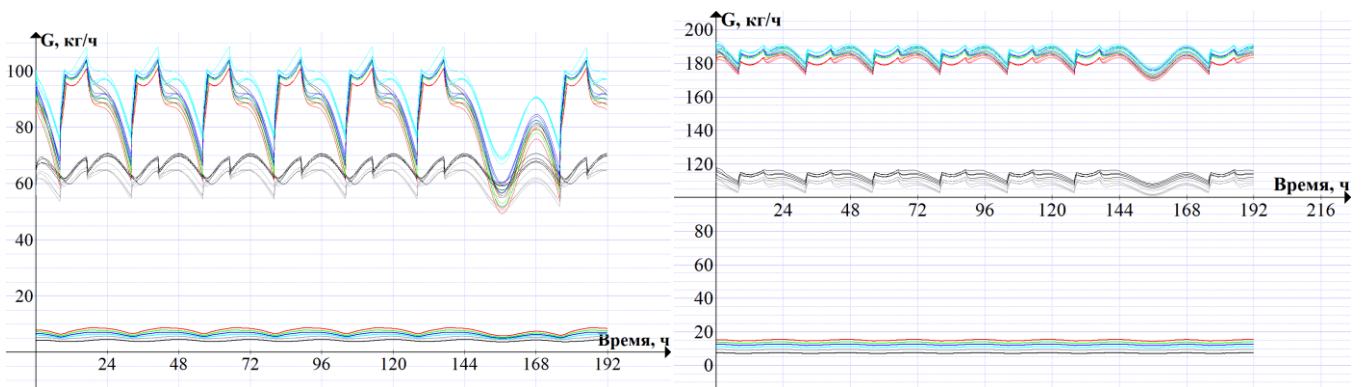


Рисунок 11 – Массовые расходы воздуха по вентилируемым помещениям на всех этажах при  $t_n = +8^\circ\text{C}$  (слева) и  $t_n = -25^\circ\text{C}$  (справа).

Более полные результаты расчетов по данной программе приведены в приложении Д диссертации. На графиках линии одного цвета соответствуют помещениям одного этажа. Цветные линии в верхней части графиков описывают изменение расхода в обитаемых помещениях 1-4 этажей; серые и черные линии – 5 и 6 этажей. Линии в нижней части графиков соответствуют санузлам. Заметно, что колебания расхода воздуха в обитаемых помещениях при температуре наружного воздуха  $+8^\circ\text{C}$  происходят вблизи значения  $82\text{ кг/ч}$ , что совпадает с требуемым значением расхода, заданного по санитарным нормам (задавался исходя из норм площади на человека). Заполнение воздухопроницаемых вставок выбиралось по методике, предложенной в главе 5 диссертации. Обеспечение требуемых

воздухообменов говорит о том, что разработанная методика (приведена в главе 5) компетентна и прошла валидацию.

В пятой главе работы изложена инженерная методика применения воздухопроницаемых элементов в наружных ограждениях и приведен расчет удельных тепловых потоков через такие элементы, а также даны рекомендации к проектированию гибридной реверсивной вентиляции. Допустимо не рассматривать вставку, как плоский элемент наружного ограждения и считать, что изменение температурного поля вблизи нее происходит только из-за наличия области стыка с ограждением. В такой постановке откос вставки классифицируется, как совокупность линейных и точечных элементов (рисунок 12).

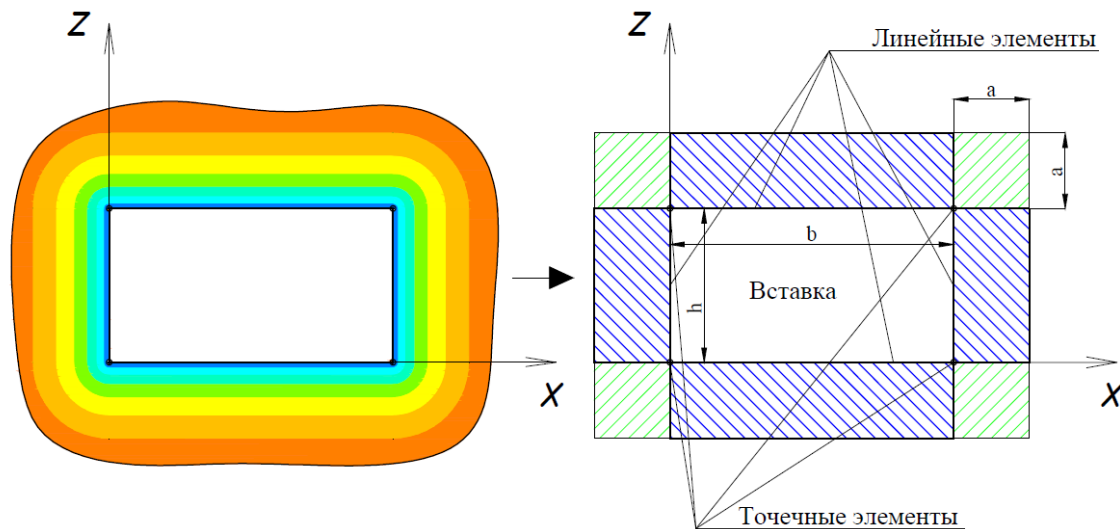


Рисунок 12 – Схема разбивки наружного ограждения на зоны для расчета теплопотерь.

Для линейных элементов рассчитывались двумерные температурные поля, для точечных - трехмерные (рисунок 13).

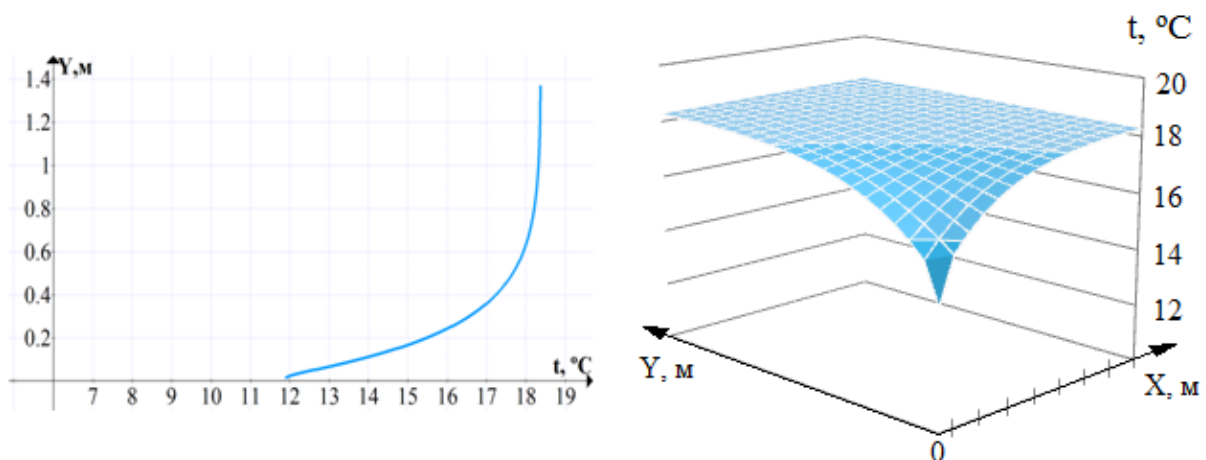


Рисунок 13 – Примеры расчетов двух- и трехмерных температурных полей.



По результатам расчетов были определены зависимости между величинами удельных тепловых потоков через рассматриваемые зоны и скоростью движения воздуха во вставке (рисунок 14).

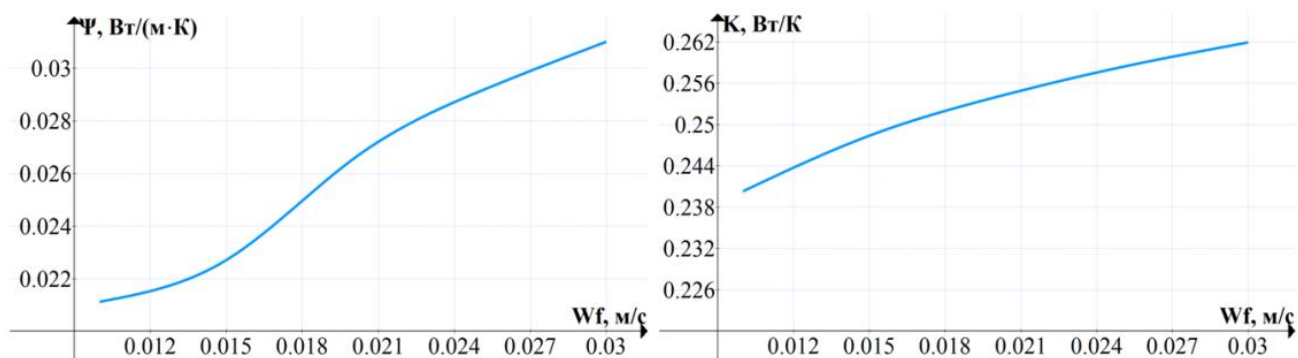


Рисунок 14 – Зависимости рассчитанных величин удельных тепловых потоков от скорости воздуха в порах фильтрующего материала.

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 необходимый воздухообмен под действием естественных сил при температуре наружного воздуха  $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 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. Для решения аэродинамической задачи предложен графоаналитический метод, суть которого в следующем:

1. для каждого этажа проектируемого объекта определяется располагаемое давление при температуре наружного воздуха  $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,
2. из располагаемых давлений вычитаются потери в вентиляционной сети от помещения до устья вытяжной шахты. Долю потерь, приходящуюся на преодоление сопротивления вставки, необходимо принимать как можно большей в целях повышения гидравлической устойчивости системы.
3. Результирующие давления откладываются по оси перепадов давлений в системе координат  $L-\Delta p$  (см. рисунок 15).
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. Выбираются материалы, засыпки из которых имеют зависимость  $L(\Delta p)$ , проходящую через точку 1 или над ней 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).

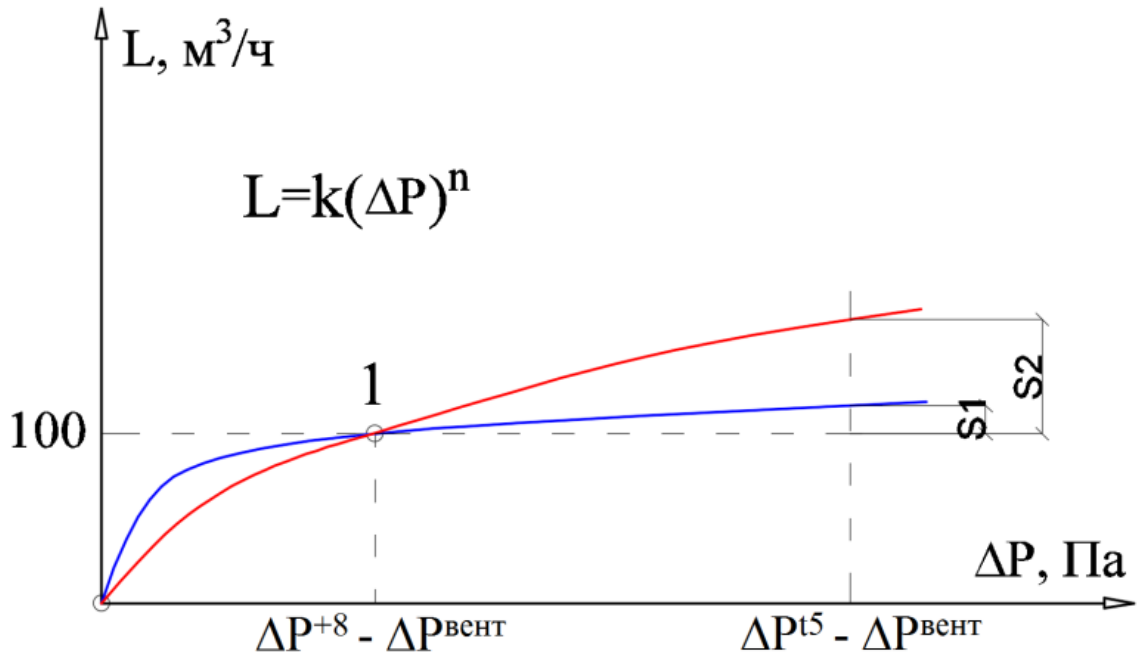


Рисунок 15 – Иллюстрация к графоаналитическому методу.

Положение характеристики сопротивления засыпки в осях  $L-\Delta p$  зависит от диаметра пор, который принимается равным диаметру сфер засыпки. 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 сфер, при котором характеристика сопротивления пройдет через точку 1 или выше нее. Через расход воздуха (определяемый по санитарной норме), площадь пористой вставки и пористость материала, определяется скорость воздуха в порах

$$w_f = \frac{G}{3600A\gamma\rho} \quad (8)$$

Теплотехническая задача решается с использованием графиков из приложений Б и В диссертации. Следует задаться значениями  $d$ ,  $w$ ,  $\Delta T$  и  $\lambda$  и с применением графиков из приложения В и определить значение  $\Delta T^*$ . Для выбранных значений рассчитывается температура приточного воздуха по формуле 6. Графики приложения Б позволяют оценить кривизну температурного поля структуры и, изменяя параметры и пересчитывая температуры, сделать его более благоприятным для окружающих слоёв стены. 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, предложенной для расчета удельных тепловых потоков через периметр вставки.

## 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. Благодаря применению матричных операций, особого способа хранения больших данных и адаптивного временного шага кратно повышена скорость работы программы, моделирующей нестационарный воздушно-тепловой режим здания.
3. Сравнением экспериментальных и теоретических данных подтверждена применимость уравнений фильтрации для описания течений в зернистых средах в диапазоне фракций от 17 до 26 мм.
4. Разработан метод расчета удельных тепловых потоков для случая воздухопроницаемых теплопроводных включений.

### 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 работ, опубликованных автором по теме диссертации:

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. 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.
2. Рымаров, А.Г. Система реверсивной вентиляции для административных зданий /А.Г. Рымаров, **В. Ю. Кравчук** // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2017. – Том 44. №4. – С. 161-169.
3. Рымаров, А.Г. Системы естественной вентиляции при опрокинутом движении воздуха /А.Г. Рымаров, **В. Ю. Кравчук** // Научное обозрение. – 2017. – № 16. – С. 6-9
4. Рымаров, А.Г. Конструкционные особенности централизованной реверсивной вентиляции административных зданий /А.Г. Рымаров, **В. Ю. Кравчук** // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2017. – №12. – С. 78-80.

5. 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.
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. Баунов // 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. (2018) 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 Conference 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:

2. 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.