

федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина»

На правах рукописи



Перевезенцев Григорий Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ ПРИ НАГРЕВЕ НАСЫПНЫХ САДОК**

Специальность: 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: д-р техн. наук, доцент

Горбунов

Владимир Александрович

Иваново-2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ТЕПЛООБМЕНА ТЕЛ, ИМЕЮЩИХ ПОРЫ В ТЕПЛО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ (ОБЗОР НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ).....	10
1.1. Тепло-технологические установки для термической обработки насыпных садок	10
1.2. Классификация тел, имеющих поры.....	12
1.3. Теплообмен в телах, имеющих поры.....	14
1.4. Фрактальная геометрия в технике. Фрактальная размерность	23
1.5. Выводы по первой главе. Постановка задач исследования	26
ГЛАВА 2. СОЗДАНИЕ МЕТОДИКИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ХАОТИЧНО РАСПОЛОЖЕННЫХ ЗАГОТОВОК С ЗАДАННОЙ ВЕЛИЧИНОЙ ПОРОЗНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФРАКТАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ.....	28
2.1. Описание модели нагрева структур, имеющих поры	28
2.2. Выбор фрактальной модели.....	33
2.3. Методика замены насыпной садки геометрической фрактальной моделью	34
2.4. Построение геометрической фрактальной модели	39
2.5. Выводы по второй главе	42
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА И ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НАСЫПНЫХ САДОК	43
3.1. Экспериментальное исследование процессов теплообмена в насыпных садках	43
3.1.1. Описание лабораторной установки и метрологическое обеспечение испытаний.....	43
3.1.2. Описание экспериментальных исследований и полученные результаты	51
3.2. Экспериментальное исследование гидродинамического сопротивления насыпной садки	79
3.2.1 Описание лабораторной установки.....	81
3.2.2. Результаты экспериментальных исследований	83
3.3. Выводы по третьей главе	89
ГЛАВА 4. ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА НАГРЕВА НАСЫПНОЙ САДКИ. 90	
4.1. Верификация процесса стационарного теплообмена геометрической фрактальной модели насыпной садки при отсутствии фильтрации	90
4.2. Верификация процесса теплообмена геометрической фрактальной модели насыпной садки при фильтрации теплоносителя.....	95
4.3. Верификация процесса нагрева геометрической фрактальной модели насыпной садки по результатам экспериментальных исследований	99
4.4. Верификация процесса фильтрации теплоносителя через насыпную садку.....	105
4.5. Выводы по четвертой главе	109
ГЛАВА 5. ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА НАГРЕВА НАСЫПНОЙ САДКИ В НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ	111
5.1. Конструкция садочной печи с дополнительными каналами.....	111

5.2. Численная модель садовой печи	113
5.3. Реализация численной модели	119
5.5. Оценка капитальных вложений, эффективности и срока окупаемости	123
5.6. Выводы по пятой главе	126
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	128
Библиографический список.....	130
ПРИЛОЖЕНИЕ	138
Приложение 1. Акт внедрения в производство.....	139
Приложение 2. Патент на полезную модель	140

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Энергоэффективность и энергосбережение входят в число стратегических направлений приоритетного технологического развития страны. Регулирование отношений по энергосбережению и повышение энергетической эффективности в Российской Федерации осуществляется на основе:

- Федерального Закона № 261 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

- Утвержденной Правительством государственной программы Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2030 года», согласно которой, одним из ключевых мероприятий является повышение энергетической эффективности и энергосбережение на энергоемких промышленных производствах.

- Энергетической стратегии России на период до 2030 года.

Основным звеном металлообрабатывающей, машиностроительной и других отраслей промышленности являются нагревательные и термические печи. Для улучшения структуры и придания заданных свойств, необходимых для конкретных данных условий производства производится термическая обработка металлов. Часто массив нагреваемых в печи заготовок представляет собой насыпные структуры, называемые насыпными садками. Сами тепловые процессы термической обработки металла состоят из последовательных циклов, включающих нагрев металла до заданной температуры, выдержку при постоянной температуре печи, охлаждение с различными скоростями до заданной температуры и другие операции. Среди всех, представленных циклов нагрев одна из самых длительных и энергоемких стадий в производстве.

Таким образом, совершенствование процессов нагрева металла в термических печах, оценка и повышение эффективности их работы – это источники резерва для экономии топлива и энергии.

Из сказанного выше можно сделать вывод что, **актуальной** является проблема повышения энергетической эффективности тепло-технологических установок при нагреве насыпных садов.

Степень разработанности темы диссертации. Проблемами повышения эффективности работы нагревательных печей при нагреве насыпных садов посвящены труды многих исследователей: Глинкова М.А., Бровкина Л.А., Крыловой Л.С., Бухмирова В.В., Соколова А.К. и др. Однако остается неизученным ряд важных аспектов, затрагиваемых темой работы. В частности: в существующих методиках при расчете процесса нагрева насыпных садов предлагается использовать эффективные теплофизические коэффициенты, для определения которых необходимо проведение натурных испытаний, отсутствуют методики замены реальной насыпной садки на структуры, имеющие схожие геометрические параметры со строгим математическим описанием.

Объектом исследования являются печи, в которых применяют нагрев насыпных садов.

Целью работы является повышение энергетической эффективности работы нагревательных печей при нагреве однородных насыпных садов.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие **задачи**:

- 1) анализ существующих методик расчета нагрева насыпных садов;
- 2) создание методики геометрического описания хаотично расположенных заготовок на подине печи с заданной величиной порозности с использованием фрактальной геометрии в 3-х мерной постановке;
- 3) проведение лабораторного эксперимента по нагреву, а также определению гидродинамического сопротивления насыпных садов состоящих из заданных элементов при различных режимах нагрева;
- 4) сравнение результатов численного моделирования с результатами, полученными другими авторами и верификация разработанной методики расчёта нагрева насыпных садов по экспериментальным данным, полученным в результате лабораторных исследований;

5) модернизация конструкции печи для нагрева насыпных садок с целью повышения энергетической эффективности;

б) разработка режима термической обработки насыпных садок модернизированной конструкции печи и определение экономической эффективности.

Научная новизна работы обусловлена следующим:

1. **Разработана методика** построения геометрической фрактальной структуры, построенной на основе фрактала «губки Менгера», которая используется при расчете теплообменных процессов в насыпных садках.

2. **Получены** новые экспериментальные данные по динамике температурных полей насыпных садок, отличающихся друг от друга величиной порозности.

3. **Разработана модель** процесса теплообмена в насыпных садках в 3-х мерной постановке с применением геометрической фрактальной структуры на основе фрактала «губки Менгера», которая позволяет учитывать значение порозности и гидродинамического сопротивления садки при различных режимах нагрева.

4. Предложен вариант **модернизации** конструкции печи с подподовыми топками, для которой разработан рациональный режим нагрева с учетом фильтрации продуктов сгорания через насыпную садку.

Теоретическая значимость работы обусловлена следующим. **Доказана** целесообразность использования геометрической фрактальной структуры при численном моделировании процессов тепло и массообмена в пористых телах.

Изложены: результаты обобщения экспериментальных данных по нагреву насыпных садок в нагревательной печи; **результаты оценки влияния** фильтрации теплоносителя на время нагрева насыпных садок; **основные положения разработанной методики** замены насыпной садки на геометрическую фрактальную структуру, построенную на основе фрактала «губка Менгера»; **способы повышения эффективности** работы нагревательной печи.

Разработана методика применения геометрической фрактальной структуры для описания насыпных садок с различной величиной порозности при численном

моделировании процессов тепло и массообмена. **Изучена** возможность замены при численном моделировании реальной насыпной садки ее фракталоподобным телом в виде «губки Менгера». **Доказаны** преимущества предложенной методики описания насыпной садки в виде геометрической фрактальной структуры по сравнению с ранее принятыми методиками, в которых рассматривается сплошное тело с эффективными теплофизическими свойствами.

Практическая значимость результатов заключается в следующем:

1. Произведено уточнение математического описания нагрева насыпных садок в термических печах. Садка, состоящая из хаотично расположенных деталей, заменена твердым телом, имеющим фрактальную структуру, построенным на основе фрактала «губки Менгера».

2. Разработанная методика расчета может быть использована при выполнении режимно-наладочных работ применительно к термическим печам с насыпными садками.

3. Получены результаты экспериментальных исследований изменения температурных полей при нагреве насыпных садок, с различной величиной порозности, при отсутствии и при наличии фильтрации теплоносителя через садку.

4. Разработана программа, при помощи которой на основе предложенной методики расчета осуществляется поиск рациональных режимов нагрева насыпных садок в термических печах.

5. Предложена полезная модель термической печи, позволившая повысить ее эффективность при сохранении качества нагрева по сравнению с базовым вариантом. Получен акт внедрения полезной модели и патент на полезную модель.

Методология и методы исследования базируются на целях и задачах работы и направлены на повышение энергетической эффективности работы нагревательных печей. По существу, методология основывается на разработке расчетной модели нагрева насыпной садки, состоящей из хаотически расположенных элементов в нагревательной печи, при замене ее на

фракталоподобной тело, построенное на основе фрактала «губка Менгера». Основой предлагаемой модели служат экспериментальные данные, полученные в ходе физического исследования и стандартные методики теплового расчета теплотехнологических установок.

Степень достоверности полученных результатов работы подтверждается использованием апробированных методов математического моделирования; совпадением экспериментальных данных с результатами расчета показателей работы оборудования; сравнением полученных результатов с работами других авторов, использованием результатов лабораторных экспериментов, полученных с применением стандартизированных методов и аттестованных средств измерения.

Личное участие автора в получении результатов работы.

Личный вклад автора в сборе, анализе и обработке полученных экспериментальных данных; расчете показателей эффективности; разработке методики замены реальных насыпных садок геометрической фрактальной структурой, построенной на основе фрактала «губка Менгера»; верификации предложенной методики на основе сравнения с результатами, полученными в своих работах другими авторами, а также по результатам экспериментальных данных; в разработке патента на изобретение РФ №139405; разработке модели модифицированной печи; определении параметров эффективности; подготовке публикаций по тематике работы.

Положения, выносимые на защиту:

Методика расчета динамики температурного поля насыпной садки с различной величиной порозности с использованием замены реальной насыпной садки на геометрическую фрактальную структуру.

Результаты экспериментального исследования нагрева насыпных садок с различной величиной порозности в нагревательных печах при различных условиях нагрева.

Алгоритм расчета и результаты численных экспериментов по нагреву насыпных садок в термических печах при замене реальных насыпных садок на

геометрические фрактальные структуры с учетом величины порозности и их гидродинамических сопротивлений.

Реализация результатов работы подтверждена следующим:

1. Патент на полезную модель №139405, рег. 2013153798 от 04.12.2013г. Проходная термическая пламенная печь.

2. Акт внедрения полезной модели на ООО «ССМ-Тяжмаш» г. Череповец.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на: международной научно-практической конференции «Повышение энергетической эффективности энергетического оборудования-2013» (г. Москва 2013 г.); международных научно-технических конференциях «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии «Бернардосовские чтения» в ИГЭУ (г. Иваново 2015, 2017 гг.); международных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых « Энергия – 2014, 2022» (г. Иваново); VIII международной научно-практической конференции «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности» (г. Москва, 2016 г.).

Публикации. Основные материалы диссертационного исследования отражены в 12 печатных работах, в том числе в 6 статьях в рецензируемых журналах по списку ВАК, 5 тезисах и полных текстах докладов и конференций, получен 1 патент на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения по работе, списка используемых источников, состоящего из 99 наименований. Общий объем диссертации составляет 140 страниц, из них: титульный лист, содержание на 2-х страницах, основной текст - 125 страниц, содержащий 60 рисунков и 10 таблиц, список литературы на 8 страницах и приложение на 3 страницах.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ТЕПЛООБМЕНА ТЕЛ, ИМЕЮЩИХ ПОРЫ В ТЕПЛО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ (ОБЗОР НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ)

1.1. Тепло-технологические установки для термической обработки насыпных садок

При термообработке мелких изделий, загружаемых в печь, образованная ими садка получила название насыпной [12]. В качестве теплотехнологических установок для термической обработки садок используют широкий ряд печей.

Нагревательные печи

Нагревательные печи – самый распространённый класс печей, поскольку широко применяются не только в чёрной металлургии, но и в цветной металлургии, в машиностроении и т.д.

Нагревательная печь - печь для нагрева твёрдых материалов с целью повышения пластичности или изменения структуры этих материалов. В дальнейшем изложении мы будем понимать нагревательные печи как печи для нагрева материалов под обработку давлением. Нагрев материалов с целью изменения их структуры производится в термических печах.

Термическая печь – печь для термической обработки металлических изделий.

Термические печи классифицируются по:

- технологическим признакам и назначению (закалочные, отжигательные, цементационные и др.);
- по способу нагрева (электрические, пламенные);
- по среде рабочего пространства (воздух, газовая контролируемая среда, жидкая среда);
- по конструкции (камерные, колпаковые, ванны и т.д.);
- по режиму работы (периодического и непрерывного действия).

В процессе термической обработки повышается качество изделий или сообщаются дополнительные свойства.

Характерные режимы термообработки в термических печах приведены на рисунке 1.1.

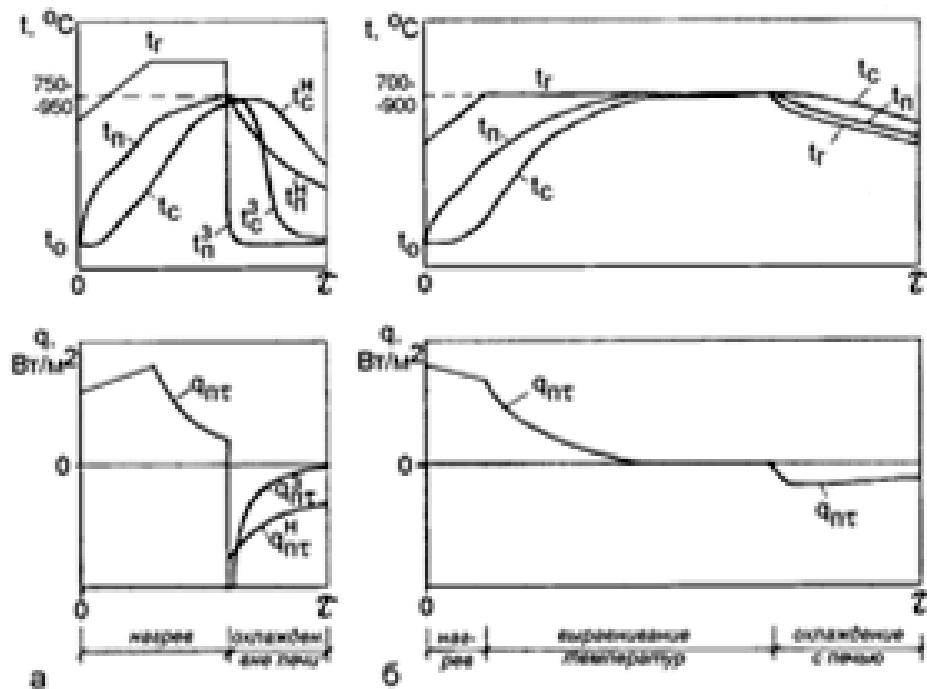


Рисунок 1.1. Характерные режимы термообработки в термических печах: а - закалка (индекс "з") и нормализация (индекс "н") в проходной печи; б - отжиг в камерной печи; t_r - температура продуктов сгорания; t_0 - начальная температура металла; t_n - температура поверхности металла; t_c - температура центра; $q_{нт}$ - плотность теплового потока на поверхности металла в процессе нагрева

Специализированная по термической обработке печь должна обеспечивать заданный технологией температурно-временной режим обработки изделия и высокую равномерность нагрева изделия.

Все материалы, загружаемые в рабочее пространство печей, как правило, представляют собой пористые структуры, а само понятие пористости определяется как доля объема пор в общем объеме тела [99].

1.2. Классификация тел, имеющих поры

Пористые материалы широко применяются во всех областях промышленности: химическое, энергетическое производство, агротехника, медицина или множество других отраслей.

В химической промышленности - это пористые губки (рисунок 1.2), фильтры, катализаторы различных типов, пористые мембраны и др. В строительной отрасли - при изготовлении теплоизоляционных материалов, ввиду их невысокого коэффициента теплопроводности.

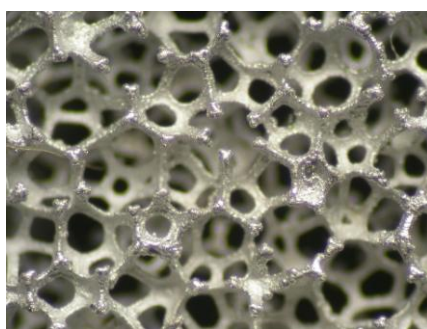


Рисунок 1.2. Пористые губки

Областью использования таких материалов в медицине являются такие направления как травматология и ортопедия, стоматология и имплантология.

В энергетической сфере пористые материалы также находят широкое применение. Это теплоизоляционные, пористые композитные (рисунок 1.3), керамические, шихтовые материалы, а также порошки. Методами порошковой металлургии из металлов и их соединений получают порошковые, пористые волокновые, пористые сетчатые, комбинированные пористые проницаемые, высокопористые ячеистые и другие материалы [6].

Все пористые материалы характеризуются рядом параметров. С.В. Белов [6] предлагает описывать пористость следующими параметрами: количество пор и их распределение по объему материала, вид пор, просвет, форма и коэффициент извилистости пор, распределение пор по размерам, удельная поверхность пор, состояние их поверхности, проницаемость, распределение проницаемости по площади фильтрации пористого материала, вязкостный и инерционный коэффициенты, физико-механические свойства пористого материала.

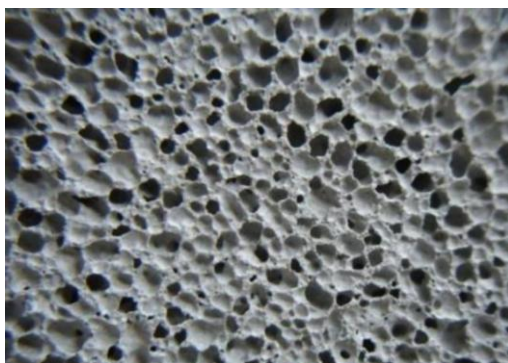


Рисунок 1.3. Структура пористого пенобетона

М. М. Дубинин [21, 22] при разделении пористых материалов за основу принимает размеры пор и механизм протекающих в них адсорбционных процессов. Так, макропористые тела имеют поры радиусом больше 100 - 200 нм, удельная поверхность макропористых тел находится в пределах 0,5 - 2 м²/г. Мезопористые тела (переходнопористые или капиллярно-пористые) имеют размеры пор в пределах от 2 до 100 - 200 нм. Микропористые тела обладают порами, соизмеримыми с размерами адсорбируемых молекул. Радиусы пор лежат в пределах от 0,5 до 1,5 - 2,0 нм. Удельная поверхность таких тел 500 - 10000 м²/г и выше.

По другой классификации, основанной на строении пористых структур, выделяют корпускулярные и губчатые системы [23]. Корпускулярные пористые тела состоят из сросшихся частиц разной формы и размера, а порами являются промежутки между этими частицами и их ансамблями. В губчатых телах (например, пористых стеклах) невозможно выделить отдельные первичные частицы, и поры в них представляют собой сеть каналов и полостей различной формы и переменного сечения.

А.Ф. Чудновский [77] предлагает деление пористых тел на грубодисперсные и тонкодисперсные материалы.

Б.П. Кауфман [35] по структурным признакам делит пористые материалы на группы:

- 1) неорганические связанные ячеистого строения;
- 2) неорганические сыпучие зернистого строения;

- 3) неорганические связанные смешанного строения;
- 4) неорганические рыхлые волокнистого строения;
- 5) органические рыхлые волокнистого строения;
- 6) органические связанные волокнистого строения.

Применительно к материалам и сплавам различают три вида пор [81]:

- открытые, сообщающиеся с поверхностями пористого тела и участвующие в фильтрации жидкости или газа;
- закрытые, не сообщающиеся с поверхностью;
- тупиковые, частично заполняющиеся, но не влияющие на проницаемость пористого материала.

1.3. Теплообмен в телах, имеющих поры

Теплообмен в пористых материалах отличается от классического теплообмена однородных сплошных сред наличием поправки на значение порозности, использование закона Фурье в таких средах является условным. Коэффициент теплопроводности, а также плотность и теплоемкость в пористых телах зависят как от величины порозности, так от структуры пор. Ученые предлагают различные подходы к определению параметров описания процессов теплообмена в пористых средах, в которых, как правило, пористая структура рассматривается как однородное тело.

Для оценки тепловых свойств пористых материалов и для понимания основных термических процессов, протекающих при различных режимах, необходимо и достаточно знание следующих коэффициентов:

- теплопроводности;
- температуропроводности;
- удельной теплоемкости.

В общем случае тепло по объему садки переносится теплопроводностью по «твердому скелету», теплопроводностью в газовой среде, заполняющей поры, с помощью излучения между стенками пор, а также конвекцией внутри пор.

Коэффициент теплопроводности, плотность, а также теплоемкость в пористых телах в значительной степени зависят и от значения порозности и от структуры пор. Одним из решений этой проблемы является поиск эффективных теплофизических свойств материалов.

Существует огромное множество методов определения эффективных коэффициентов теплопроводности, температуропроводности в пористых телах, однако, как правило, все методы можно разделить на экспериментальные и теоретические. Эффективные теплофизические коэффициенты, определенные при помощи теоретических методов, не отличаются надежностью, и, как правило, имеют некоторое расхождение со значениями коэффициентов, найденных в ходе проведения эксперимента.

Теоретические методы

В.В. Померанцев [59] пористый материал рассматривает как систему плоских, поочередно сменяющих друг друга слоев, составленных из твердого остова системы и воздуха. Коэффициент теплопроводности рассчитывается по следующей формуле:

$$\lambda_p = \lambda_2 \cdot \frac{100}{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}(100-f) + f} . \quad (1.1)$$

где f – пористость слоя.

По К.Ф. Фокину [75] пористая структура рассматривается как система пластин, уложенная в шахматном порядке, коэффициент теплопроводности рассчитывается следующим образом:

$$\text{Для } p \leq 50\% \quad \lambda_p = \lambda_2 \cdot \left[\frac{4 \cdot f}{1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1}} + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} (1 - 2 \cdot f) \right], \quad (1.2)$$

$$\text{Для } p \geq 50\% \quad \lambda_p = \lambda_2 \cdot \left[\frac{4 \cdot (1-f)}{1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1}} + 2 \cdot (f-1) \right]. \quad (1.3)$$

По формуле Русселя [4] коэффициент теплопроводности для непрерывного твердого тела с равномерно распределенными порами имеет следующий вид:

$$\lambda_p = \frac{\lambda_1 \cdot f + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} (1 - f^{\frac{2}{3}})}{f - f^{\frac{2}{3}} + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} (1 - f^{\frac{2}{3}} + f)}, \quad (1.4)$$

где f - значение порозности системы; λ_p - результирующий коэффициент теплопроводности, $\frac{Вт}{м \cdot град}$; λ_1 - коэффициент теплопроводности первой среды, $\frac{Вт}{м \cdot град}$; λ_2 - коэффициент теплопроводности второй среды, $\frac{Вт}{м \cdot град}$.

И. С. Каммерер, О. В. Пугачев и др. [34, 60, 61] полагают, что пористое тело представляет собой систему шарообразных частиц, уложенных различным способом с той или иной плотностью.

Коэффициент теплопроводности для неподвижного воздуха с равномерно распределенной твердой фазой имеет следующий вид [4]:

$$\lambda_p = \frac{\lambda_1 \cdot (1 - f)^{\frac{2}{3}} + 1 - (1 - f)^{\frac{2}{3}}}{\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cdot \left[(1 - f)^{\frac{2}{3}} - 1 + f \right] + \left[2 - (1 - f)^{\frac{2}{3}} - f \right]}, \quad (1.5)$$

где f - пористость системы; λ_p - результирующий коэффициент теплопроводности, $\frac{Вт}{м \cdot град}$; λ_1 - коэффициент теплопроводности первой среды,

$\frac{Вт}{м \cdot град}$; λ_2 - коэффициент теплопроводности второй среды, $\frac{Вт}{м \cdot град}$. Описать

немного подругому потомук что похоже на предъидущее а идет речь про разное

Ф. В. Пелевин в работе [46] проводил исследование эффективности теплообмена в зависимости от числа Рейнольдса, относительного пути движения теплоносителя, значения порозности, теплопроводности и разновидности сети в пористом сетчатом металле, полученном диффузионной сваркой металлических тканых сеток в вакууме.

Процесс излучения в теплопередаче пористых сред наиболее сложный и менее изученный.

Самым распространенным является подход, при котором теплообмен между двумя соседними зернами пористого тела сводится к процессу радиационного теплообмена между двумя параллельными бесконечными пластинами, имеющими те же температуры, что и у зерен [23].

А. Русселем [4] при замене реальных пористых тел идеальными структурами с правильно расположенными сферическими зернами, теплопроводность которых бесконечно велика по сравнению с теплопроводностью между промежутками, получена следующая зависимость эффективного коэффициента теплопроводности:

$$\lambda_p = 4 \cdot \sigma \cdot R \cdot T^4 \cdot S, \quad (1.6)$$

где S - площадь поперечного сечения поры в относительных единицах; R - размер поры, m ; T - температура, K ; σ - постоянная Стефана - Больцмана, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$.

Определение эффективной теплопроводности по формуле Лоба имеет следующий вид:

$$\lambda_p = 4 \cdot \sigma \cdot d \cdot \varepsilon \cdot T^6, \quad (1.7)$$

где ε - поглощательная способность пор; d - коэффициент формы.

Г. Н. Дульневым, Ю. П. Заричняк [23] для практических расчетов предлагается формула, учитывающая угловое распределение излучения, степень черноты поверхности пор.

$$\lambda_p = 4 \cdot \varepsilon^2 \cdot T^3 \cdot h, \quad (1.8)$$

где h - поправка на угловое распределение излучения.

В последнее время изучению конвекции газа в пористых средах посвящается большое количество работ. В частности, изучением особенностей естественной конвекции в структурах, ограниченных твердыми стенками конечной толщины, занимались А. Аль-Амири, М. Мобеди, К. Нан, К. Вафай, и другие [82, 89, 90, 92, 93].

К. Вафай [93] изучил влияние твердой стенки и инерционных сил на течение и теплоперенос в пористых средах. В работе показано, что воздействие наиболее существенно в средах с высокой проницаемостью, также в областях с пограничным слоем вблизи передней кромки обтекаемых тел.

А. Аль-Амири [82] подробно на основе численного моделирования исследовал стационарную естественную конвекцию в заполненной пористым материалом двумерной области, состоящей из двух изолированных горизонтальных стенок конечной толщины, и двух вертикальных стенок с постоянной и различной температурой. Установлено влияние числа Релея, относительного коэффициента теплопроводности, значения порозности тела и геометрических параметров на конечное решение.

Влияние на режимы естественной конвекции в пористых средах теплопроводных горизонтальных стенок конечной толщины рассмотрено в работе М. Мобеди [89]. В ней исследуется сопряженный естественный теплообмен в квадратном кожухе с конечной толщиной стенки. В работе показано, что среднее число Нуссельта увеличивается либо за счет увеличения числа Релея, либо коэффициента теплопроводности, однако число Нуссельта уменьшается при увеличении толщины стенки.

$$Nu = 0.1269D^{-0.2155} Kr^{0.3228} Ra^{0.2118}, \quad (1.9)$$

где Kr - соотношение коэффициентов теплопроводности материала стенки и газа; Ra - число Рэлея; D - безразмерная толщина стенки.

Соотношение коэффициентов теплопроводности стенки и газа определяется по формуле:

$$Kr = \frac{\lambda_w}{\lambda_f}, \quad (1.10)$$

где λ_w - коэффициент теплопроводности материала стенки, $\frac{Вт}{м \cdot град}$;

λ_f - коэффициент теплопроводности газа, $\frac{Вт}{м \cdot град}$.

Н. Х. Саид решает двумерную стационарную сопряженную задачу естественной конвекции в пористой среде, ограниченной вертикальными стенками [91].

В [23] Дульневым Г. Н. в зависимости от величины воздушных прослоек при низких температурах получены критериальные зависимости эффективных коэффициентов теплопроводности и теплопроводности для наиболее распространенной конвекции - естественной, возникающей под действием температурного градиента. Приведена формула для расчета эффективного коэффициента теплопроводности пористых материалов через кладку зерен кубической формы.

В. С. Зарубин, Г. Н. Кувыркин, И. Ю. Савельева [24] получили расчетные зависимости эффективного коэффициента теплопроводности однонаправленного волокнистого композита.

В своих работах Н. Ю. Тайц [71] предлагает для нахождения эффективного коэффициента теплопроводности использовать формулу

$$\lambda_3 = \lambda_m \cdot \frac{1 - f^{k-1} \cdot (1 - \Lambda)}{1 - f^{k-1} \cdot (1 - \Lambda) \cdot (1 - f)}, \quad (1.11)$$

где k - коэффициент формы мелкого тела, входящего в садку; Λ - относительный перенос тепла через пору, без учета конвекции, определяемый по формуле:

$$\Lambda = \frac{\lambda_2 + \alpha \cdot S}{\lambda_m}, \quad (1.12)$$

где S - определяющий размер поры, м; α - приведенный коэффициент

теплоотдачи излучением в пору, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$; f - значение порозности.

Л. А. Бровкин [12] предлагает для определения эффективного коэффициента теплопроводности использовать формулу

$$\lambda_3 = \lambda_m \cdot [(k_1 \cdot k_2 \cdot (1 - f) + \Lambda \cdot f)] , \quad (1.13)$$

где k_1 - коэффициент, дающий поправку на удлинение траектории тепловых потоков при обтекании пор; k_2 - коэффициент, дающий поправку на разрывы

скелета в местах контакта отдельных тел; λ_m - коэффициент теплопроводности материала, $\frac{Вт}{м \cdot К}$.

Экспериментальные методы

С. В. Белов [6] предлагает измерять теплопроводность пористого материала через тепловой поток, выделяемый в образце, при прохождении через него электрического заряда.

Результаты экспериментальных методов расчета насыпных садок из порошковых материалов приведены Скрыбиным В. А. [67].

М. Ю. Погосбемян, Ю. М. Погосбемян, С. Е. Шухарев [57] исследовали влияние толщины образца и состава смеси на технологические параметры насыпной садки.

Изучение гидродинамики и теплообмена при течении теплоносителя в цилиндрическом слое шаровых засыпок приводят А. В. Бороздин, А. Н. Варава, А. В. Дедов и другие в [9].

Тепловые процессы, происходящие в волокнистых высокопористых материалах рассмотрели А. В. Зуев, П. В. Просунцов, И. А. Майорова [32].

Экспериментально-теоретическое исследование процессов теплообмена в высокопористых материалах и в пеноматериалах проводили О. М. Алифанов, С. А. Будник, А. В. Ненарокомов [2].

На основе расчетно-аналитических и экспериментальных исследований температурного поля в пористых оболочках различной структуры в потоках газа вблизи них А. Ф. Поляков [58] разработал рекомендации по расчету теплообмена.

Методом инфракрасной термографии М. И. Низовцев, А. Н. Стерлягов, В. И. Терехов [45] рассматривали тепловой эффект в пористых средах при различных условиях увлажнения, на основе, которого определялась величина теплового эффекта в пористом материале при различных условиях увлажнения.

Применение методики *численного эксперимента* помогает избегать поиска эффективных свойств, при решении задачи «в лоб», применяя теплофизические свойства материалов, участвующих в теплообмене.

В работе Х. Бринкман [84] автором рассматривается применение модели на основе уравнений Бринкмана.

Математическое моделирование сопряженной естественной конвекции в пористой среде, ограниченной теплопроводными стенками конечной толщины, при наличии локального источника тепла постоянной температуры в условиях неоднородного теплообмена с окружающей средой рассмотрено Саидом Н. Х. [92].

В. С. Зарубин, Г. Н. Кувыкин, И. Ю. Савельева [24] исследовали физическую модель переноса тепловой энергии в композите с включениями шаровой формы, а также ими получена величина эффективного коэффициента теплопроводности для аналогичного материала.

О. В. Пугачев и З. Т. Хан [60] рассмотрели решение задачи теплопроводности и получили эффективный коэффициент теплопроводности композита при помощи моделирования диффузионных процессов. Поиск эффективной теплопроводности предлагается вести через объемные удельные теплопроводности c_1 и c_2 и в соответствии с объемом композита α , занимаемой включениями.

$$\lambda_3 = \hat{\alpha} \cdot [c_1 \cdot (1 - \alpha) + c_2 \cdot \alpha] , \quad (1.14)$$

где $\hat{\alpha}$ - эффективная температуропроводность, $\frac{m^2}{c}$; c_1 и c_2 - объемные теплоемкости композитов 1 и 2, $\frac{Дж}{m^3 \cdot град}$; α - доля объема композита, занимаемая включениями.

Н. Н. Гоповин, В. С. Зарубин, А. П. Янковский и другие [15, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 60, 61, 81, 84, 90] провели оценку эффективного коэффициента теплопроводности материала с включениями определенной формы (шаровой, эллипсоидальной и сфероидальной) из другого материала с применением новых подходов, а также методов вариационного исчисления при рассмотрении упрощенной модели окрестности включения.

При численном исследовании пористое тело заменяется различными структурами, некоторые из которых описываются элементами канонической формы.

В работах российских ученых более 40 лет назад была распространена модель Ребиндера - Щукина - Марголис [64], при которой пористое тело представлялось в виде регулярных упаковок монодисперсных сфер.

В рассмотренном исследовании [84] автором рассматривается применение модели на основе уравнений Бринкмана.

Н. П. Гусенкова [17] предлагает математическую модель насыпной садки, в которой структура садки заменяется на изотропную, пористую призму с эффективными теплофизическими свойствами.

В. С. Зарубин, Г. Н. Кувыкин, И. Ю. Савальева [25] исследовали модель переноса тепловой энергии в композите с включениями шаровой формы.

В настоящее время методы моделирования различных структур на основе фрактальной геометрии получают все большее распространение. Фрактальное моделирование используется в различных отраслях промышленности, так как методы математического моделирования на основе фрактальной структуры позволяют унифицировать и точно описать геометрическую топологию внутреннего пространства пористых структур.

С. В. Кочергин, А. В. Кобелев, Н. А. Хебтов [38] фрактальное моделирование используют для моделирования электронных систем.

В работах С. В. Кочергина, К. Ф. Фокина, А. П. Янковского и других [38, 75, 81] фрактальные методы применяются для моделирования истечений, а также построения модели шероховатости.

Процесс исследования углеродных сыпучих материалов на основе аэродинамического метода с использованием модели «губка Менгера» рассмотрена в работе А. В. Медведевой [44].

Ф. В. Пелевин [46] применяет метод фрактального анализа для исследования структуры металлических материалов.

С. В. Федосеев, В. А. Горбунов [74] на основе пространственного аналога квадратного ковра Серпинского, исследуют процессы фильтрации слоя ТБО.

1.4. Фрактальная геометрия в технике. Фрактальная размерность

Бенуа Мандельброт в 1975 году [86, 87, 88] открыл объекты, для описания которых необходимо введение нецелочисленных, дробноразмерных пространств - фракталы. Для описания различных природных образований необходимо использовать понятия новой фрактальной геометрии. Фрактальная геометрия изучает закономерности, проявляемые в структуре природных объектов, процессов и явлений, обладающих явно выраженной фрагментарностью, изломанностью и искривленностью. Методы фрактальной геометрии широко применяются в различных отраслях естествознания и техники. Дробную размерность новых объектов стали называть фрактальной размерностью, которая и служит количественной мерой определения самих фракталов [3]. Фрактальные объекты имеют свойство самоподобия, т.е. любые их участки обладают одной и той же фрактальной размерностью, что и объект в целом.

В. П. Тихомиров [72] разделяет фракталы на несколько видов:

- геометрические фракталы, строящиеся на основе исходной фигуры (линии, многоугольника или многогранника) путем ее дробления, и выполнения различных преобразований полученных фрагментов;
- алгебраические фракталы - строятся на основе алгебраических формул;
- стохастические фракталы, получающиеся, если в итерационном процессе случайным образом изменять какие-либо параметры.

Характеристика и обзор фрактальной геометрии

При решении различных задач бывает удобным использовать различные математические формулировки основных положений фрактальной геометрии. На практике, имея реальный объект, фрактальную размерность находят после необходимых тщательных измерений. Но для алгебраических и геометрических иерархических структур их размерность можно вычислить.

Для триадной кривой Коха [87], представленной на рисунке 1.4, фрактальная размерность $D > 1$. Для n -го построения получаем $\chi_n = \frac{1}{3}^n$ и $N_n = 4^n$, откуда [87]

$$D = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln N}{\ln \frac{1}{\chi_n}} = \frac{\ln 4}{\ln 3} = 1,26, \quad (1.15)$$

где N – число получаемых элементов, $e\partial$; χ – коэффициент масштаба.

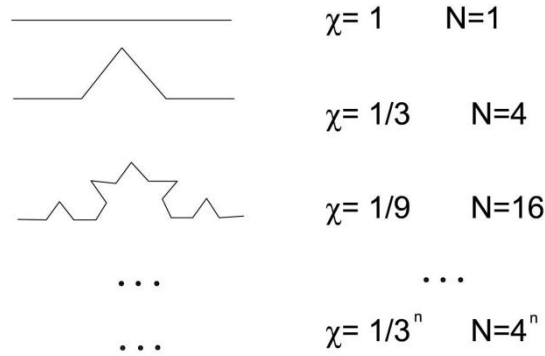


Рисунок 1.4. Тριάдная кривая Коха

Для кривой Гивена (рис. 1.5), процесс построения которой аналогичен процессу построения кривой Коха, за исключением того, что вместо треугольной шляпки строится прямоугольная, фрактальная размерность будет выглядеть следующим образом [73]:

$$D = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln 8^n}{\ln 4^n} = 1,5 \quad (1.16)$$

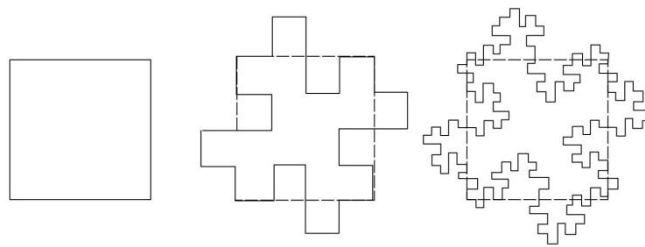


Рисунок 1.5. Кривая Гивена

Для канторова множества, представленного на рисунке 1.6, фрактальная размерность находится следующим образом [73]:

$$D = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln N}{\ln \frac{1}{\chi}} = \frac{\ln 2}{\ln 3} = 0,63 \quad (1.17)$$

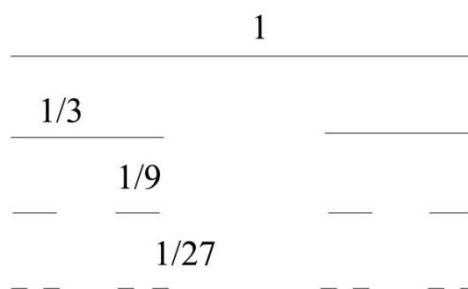


Рисунок 1.6. Канторовское множество

Аналогично тому, как кривая Коха является примером одномерного фрактального объекта, так ковры Серпинского (рис. 1.7) являются примером двумерного фрактального объекта.

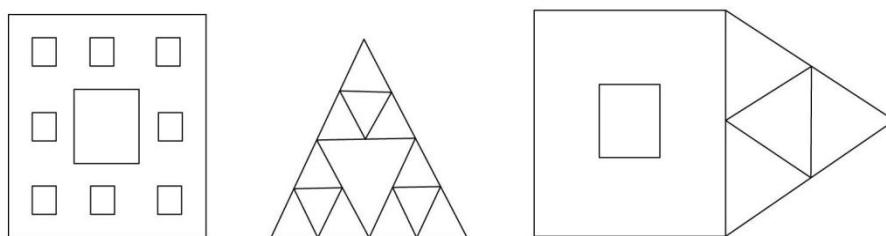


Рисунок 1.7. Ковры Серпинского

Фрактальная размерность для квадратного ковра Серпинского [73]:

$$D(\text{квадр.}) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln N_n}{\ln \frac{1}{\chi_n}} = \frac{\ln 8}{\ln 3} = 1,839. \quad (1.18)$$

Для треугольного ковра Серпинского [73]:

$$D(\text{треуг.}) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln N_n}{\ln \frac{1}{\chi_n}} = \frac{\ln 3}{\ln 2} = 1,585. \quad (1.19)$$

1.5. Выводы по первой главе. Постановка задач исследования

Исследованиям процессов протекающих в теплотехнологических установках посвящены работы многих ученых [2, 4, 8, 12, 15, 16, 17, 23, 24-31, 32, 38, 40, 44, 45, 46, 57, 58, 60, 61, 63, 67, 70, 74, 81, 82, 83, 85, 89, 90, 91, 92, 93]. Серьезные требования к составлению и ведению режима тепловой обработки, от которого зависит качество итогового продукта. Они диктуют точное определение параметров тепло и массообмена в обрабатываемых материалах. В процессе анализа современного состояния решения задач теплообмена и массообмена в пористых телах были проанализированы современные методы определения эффективных теплофизических свойств в насыпных садках с различной внутренней структурой. Проведен обзор литературы с решением задач моделирования пористых тел различной конфигурации. Были рассмотрены различные численные модели, применяемые при решении задачи теплообмена в телах, имеющих поры. По результатам анализа рассмотренных источников можно сделать следующие выводы:

1. При расчете нагрева авторы приводят пористые тела к условному квазиоднородному изотропному телу с использованием эффективных теплофизических свойств. Для решения этих задач для каждого типа тел, имеющих поры, необходимо знать эффективные теплофизические свойства.

2. Отсутствует удобный метод нахождения эффективных теплофизических свойств. Учеными приводятся методики нахождения эффективных теплофизических коэффициентов, характерных для определенных структур садков, формируемых элементами тел простой формы.

3. Численное описание тел, имеющих поры вызывает ряд затруднений, связанных с описанием их внутренней структуры.

4. В процессе нагрева теплопередача в пористом теле осуществляется через твердый скелет теплопроводностью, теплопроводностью через среду заполняющую поры, излучением через поверхности пор, а также конвекцией при движении газа в порах. Для решения этой задачи сложно выделить структуру

самого тела, так как пористое тело состоит из элементов разной формы, хаотично расположенных друг к другу.

Проведенный анализ опубликованных данных позволяет сформулировать задачи, решение которых необходимо для достижения цели диссертации:

1. Анализ существующих методик расчета нагрева насыпных садов;
2. Создание методики геометрического описания хаотично расположенных заготовок на подине печи с заданной величиной порозности с использованием фрактальной геометрии в 3-х мерной постановке;
3. Проведение лабораторного эксперимента по нагреву, а также определению гидродинамического сопротивления насыпных садов состоящих из заданных элементов при различных режимах нагрева;
4. Сравнение результатов численного моделирования с результатами, полученными другими авторами и верификация разработанной методики расчёта нагрева насыпных садов по экспериментальным данным, полученным в результате лабораторных исследований;
5. Модернизация конструкции печи для нагрева насыпных садов с целью повышения энергетической эффективности;
6. Разработка режима термической обработки насыпных садов модернизированной конструкции печи и определение экономической эффективности.

ГЛАВА 2. СОЗДАНИЕ МЕТОДИКИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ХАОТИЧНО РАСПОЛОЖЕННЫХ ЗАГОТОВОК С ЗАДАННОЙ ВЕЛИЧИНОЙ ПОРОЗНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФРАКТАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Расчет процессов теплообмена в насыпных садках, как правило, сводится к поиску эффективных теплофизических свойств, к приведению тела к условно однородному с эффективными теплофизическими свойствами. Поиск эффективной плотности и теплоемкости не доставляет проблем, тогда как определение эффективной теплопроводности является затруднительным.

Применение методики численного эксперимента помогает избегать поиска эффективных свойств, помогая решать задачу «в лоб», применяя теплофизические свойства материалов, участвующих в теплообмене.

2.1. Описание модели нагрева структур, имеющих поры

Перенос теплоты в насыпных садках обусловлен теплопроводностью по твердому скелету и газу, заполняющему поры, излучением между стенками пор и конвекцией газа в порах. Для разработки более точных и совершенных режимов нагрева садок необходим так же более качественный учет влияния фильтрации газа через поры садки. Известные аналитические решения для расчета температурного поля пористого тела в форме пластины с фильтрацией теплоносителя, полученные Д.П. Волковым, В.Л. Мальтером, О.Л. Рудых [13, 42, 65] громоздки и их использование в инженерной практике затруднительно.

Как известно, существует два основных подхода к описанию закономерностей теплообмена в телах, имеющих поры.

Первый подход предполагает замену реальной пористой структуры ее моделью – условным квазиоднородным изотропным телом с усредненными величинами порозности, температуры, давления и т. д. Такому условному телу приписывают непрерывное температурное поле и условные эффективные теплофизические коэффициенты: эффективный коэффициент удельной теплоемкости, c_* , и эффективный коэффициент теплопроводности, λ_* . Полагают, что температура

газа в порах и материала мало отличаются друг от друга, и ее принимают одинаковой.

Уравнение Фурье-Кирхгофа описывает перенос теплоты в теле.

$$c_3 \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = -\vec{w}_r \cdot f \cdot \rho_r \cdot c_r \cdot \nabla T + \text{div}(\lambda_3 \cdot \nabla T), \quad (2.1)$$

где w_r - скорость фильтрации газа, $\frac{м}{с}$; f - значение порозности; c_r - удельная теплоемкость газа, $\frac{Дж}{кг \cdot град}$; ρ_r - плотность газа, $\frac{кг}{м^3}$; c_3 - эффективный коэффициент теплоемкости, $\frac{Дж}{м^3 \cdot град}$; λ_3 - эффективный коэффициент теплопроводности, $\frac{Вт}{м \cdot К}$.

Решением системы уравнений неразрывности и Навье-Стокса определяется поле давлений и скоростей:

$$\frac{\partial \rho_r(T, p)}{\partial \tau} + \nabla \rho_r(T, p) \cdot \vec{\omega}_r(T, p) = 0 \quad (2.2)$$

$$\rho_r(T, p) \cdot \frac{d\vec{\omega}_r(T, p)}{d\tau} = \rho_r(T, p) \cdot \vec{g} - \nabla p + \mu \cdot \nabla^2 \vec{\omega}_r(T, p) \quad (2.3)$$

где p - давление, Па; μ - динамическая вязкость, Па·с.

При втором подходе теплообмен описывают системой дифференциальных уравнений для твердого элемента тела простейшей формы:

$$c_m \cdot (T_m) \cdot \rho_m(T_m) \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{x^k} \cdot \frac{\partial}{\partial x} (\lambda(T_m) \cdot x^k \cdot \frac{\partial T}{\partial x}) + q_w, \quad (2.4)$$

и баланса тепла газов

$$c_r(T_r) \cdot \rho_r(T_r) \cdot \frac{\partial T_r}{\partial \tau} - w_r(\tau) \cdot c_r(T_r) \cdot \rho_r(T_r) \cdot \frac{\partial T_r}{\partial x} = \alpha(T_r - T_m) \cdot F, \quad (2.5)$$

где x - координата, м; m ; w_r - скорость фильтрации газа, $\frac{м}{с}$; k - коэффициент формы тела; T_r, T_m - температуры газа и материала соответственно, К; c_m - удельная теплоемкость материала, $\frac{Дж}{кг \cdot град}$; c_r - удельная теплоемкость газа, $\frac{Дж}{кг \cdot град}$; ρ_m - плотность материала, $\frac{кг}{м^3}$; ρ_r - плотность газа, $\frac{кг}{м^3}$;

α - приведенный коэффициент теплоотдачи между газом и стенками $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$;

F - площадь поверхности материала, участвующая в теплообмене, $м^2$,

q_w - внутренний источник тепловой энергии, $Вт$.

Использование при расчете температурных полей тел, имеющих поры, как первого, так и второго подходов вызывает ряд затруднений. Прежде всего, это проведение численного эксперимента по расчету самой структуры пористого тела. Обычно при проведении численного эксперимента исходят из того, что твердый «скелет» состоит из тел простейшей формы (шаров, цилиндров и т.д.). Отклонения от известных форм учитывают введением всевозможных поправок, которые на практике бывает трудно оценить [36].

При использовании описанных подходов для расчета насыпных садок необходимо применять эффективные теплофизические свойства, нахождение которых вызывает определенные трудности.

Эффективные плотность и теплоемкость можно определить исходя из принципа аддитивности, по известным свойствам нагреваемого материала и газа, заполняющего поры насыпной садки:

$$\rho_{эф} = \rho_m \cdot (1 - f) + \rho_r \cdot f, \quad (2.6)$$

$$c_{эф} = c \cdot (1 - f) + c_r \cdot f. \quad (2.7)$$

Определение же эффективного коэффициента теплопроводности необходимо осуществлять по известным формулам (1.1-1.15), описанным в главе 1. Однако применение методик нахождения эффективного коэффициента теплопроводности связано с рядом допущений, что может приводить к значительным расхождениям в итоговых расчетах. В свою очередь применение рассмотренных в 1 главе методик связано с конкретными случаями расчета теплопередачи, будь то насыпные садки, сформированные из шарообразных деталей, или садки, состоящие из тонких пластин.

В промышленной практике применяются насыпные садки, формируемые из деталей различной формы и размеров, вдобавок имеющих значительные отличия от рассматриваемых в главе 1.

На практике принято использовать экспериментальные и расчетно-экспериментальные методы обратных задач теплопроводности для определения эффективных теплофизических свойств. Это требует проведения большого количества опытов и получения широкого ряда зависимостей для различных вариантов пористых структур. Для того, чтобы отказаться от определения эффективных теплофизических свойств, необходимо использовать методику расчета теплообмена в пористых телах, при которой определение температурных полей осуществляется отдельно для твердой структуры и газовой среды.

Решение задачи нахождения температурного поля насыпной садки при наличии фильтрации через поры является нестационарной, нелинейной задачей. Решение подобной задачи при помощи классических методов вызывает множество затруднений. Наилучшим способом решения является численный метод.

Численный метод подразумевает описание исследуемой математической модели. Построение показанной на рисунке 2.1 насыпной садки вызывает сложности, главной из которых является математическое описание каждой детали. Так, при изменении параметров наполнения нагреваемой садки требуется построение новой модели. При определении режимов нагрева таких садок, у которых может меняться насыпная плотность, высота наполнения контейнера и система упаковки деталей внутри контейнера будут возникать большие сложности. Поэтому именно замена таких пористых тел на тела с фракталоподобной структурой, имеющих свойства самоподобия, позволит эффективнее решать задачи определения температурных полей насыпных садок.

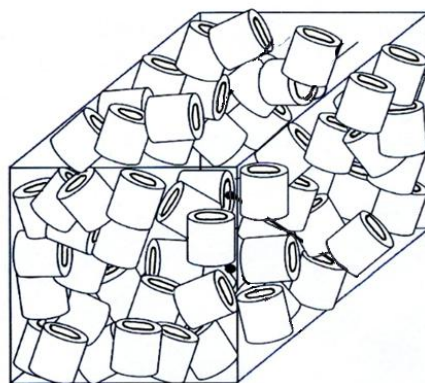


Рисунок 2.1. Контейнер с насыпной садкой

Одним из наиболее распространенных методов, применяемых для решения подобных задач, является конечно-разностный метод, называемый также методом сеток.

Современные программно-расчетные комплексы позволяют производить расчет теплообмена и массообмена в телах любой структуры. Однако основная сложность заключается в точном воспроизведении неоднородности структуры геометрической модели насыпной садки и ее теплофизических характеристик при ее построении в САЕ-пакете.

В последнее время при проведении численных экспериментов по расчету физических процессов повышенное внимание уделяется концепции построения фракталоподобных моделей [74]. Эффективность применения данной концепции заключается в том, что подобные модели дают возможность унифицировать математическое моделирование температурных полей в пористых структурах.

Для унификации насыпных садок сложных форм предлагается применять геометрическую модель садки, построенную на основе структуры фрактальной геометрии, в частности «губка Менгера».

К достоинствам использования геометрической фрактальной структуры, построенной на основе фрактала «губка Менгера» можно отнести:

1. Возможность расчета процессов тепло-массообмена в структурах без применения эффективных теплофизических коэффициентов.
2. Возможность строгого геометрического описания насыпных садок, состоящих из различных элементов, хаотично расположенных в контейнере.
3. Возможность описания в заданном диапазоне величин порозности пористого тела при его геометрическом представлении в виде фрактальной структуры.

Отсутствие тупиковых пор, влияющих на характер протекания тепломассообменных процессов, можно считать недостатком предложенного фрактального описания структуры пористого тела.

2.2. Выбор фрактальной модели

Фрактальные модели, как видно из вышесказанного, могут описывать достаточно широкий круг пористых тел, однако для точного описания необходимо подобрать ранг разбиения. Ранг разбиения для геометрической фигуры, построенной на основе фрактала «губка Менгера» это, в соответствии с правилами построения, порядковый номер подмножества кубов, удаляемых из фигуры.

Для начала заменим реальное пористое тело фрактальной структурой, построенной на основе фрактала «губка Менгера» [71]. В соответствии с реальным значением порозности насыпной садки в данной работе предлагается не рассматривать 1-й ранг разбиения фрактала, а начинать со второго ранга (рисунок 2.2). Уход от классической модели фрактала «губка Менгера» обусловлен более точным приближение к реальной геометрии исследуемой насыпной садки с размерами 100 x 100 x 250 мм.

Общий вид предлагаемой фрактальной модели представлен на рисунке 2.2.

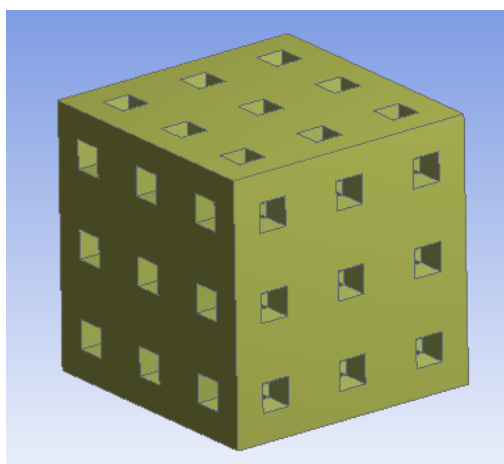


Рисунок 2.2. Фрактальная модель 2 ранга разбиения

Подобная структура фрактальной модели позволяет проводить численные эксперименты процессов, происходящих в насыпных садках, со значением порозности лежащим в пределах от 0,17 до 0,9 и погрешностью определения температурного поля отличающегося от реального объекта не более 8 %.

2.3. Методика замены насыпной садки геометрической фрактальной моделью

Для замены реальной пористой структуры эквивалентной фрактальной моделью необходимо определить требуемое значение ранга фрактального разбиения. Очевидно, что он будет зависеть от величины порозности структуры, f . Искомая зависимость представлена на рисунке 2.3.

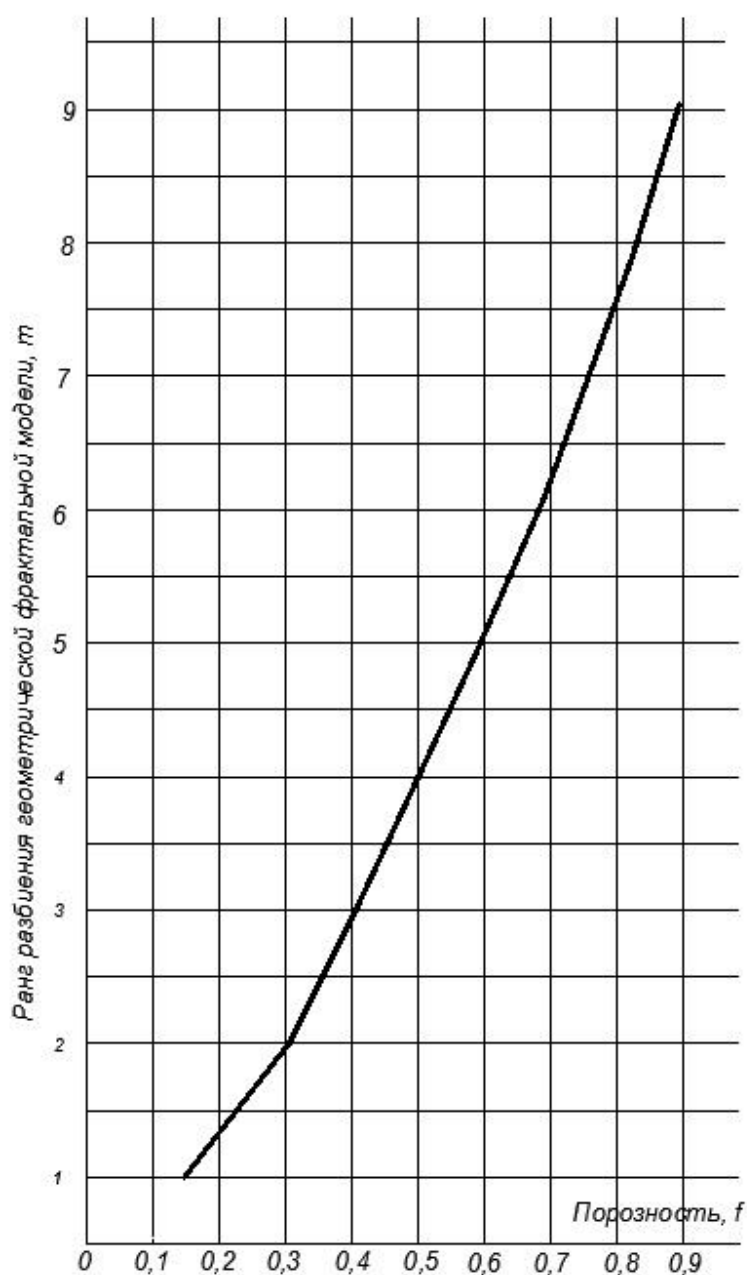


Рисунок 2.3. График зависимости выбора ранга разбиения от величины порозности

График показывает, что, например, при значении порозности тела, равной 0,38, не получается целого значения ранга разбиения ($m=2,5$), следовательно при замене реальной пористой структуры фрактальной моделью можно выбрать, как модель 2-го, так и 3-го ранга разбиения. Иными словами, при выборе эквивалентной модели реальной структуры одной этой зависимости недостаточно. В связи с этим необходимо ввести параметр, который учитывал бы степень развития поверхности пор, приближая, таким образом, модель к реальной структуре. В качестве такого параметра примем эффективный размер пор - R_v , который представляет собой отношение объема тела к общей поверхности пор, заключенной в этот объем.

$$R_v = \frac{V}{F_{пор}} \quad (2.8)$$

В тепловом отношении предложенный параметр R_v будет определять эффективность пористой структуры (максимальная поверхность теплообмена заключена в минимальном объеме).

Для учета геометрии и структуры садов, значение порозности которых отличается от вариативного ряда, характерного для классической фрактальной структуры, предлагается ввести понятие коэффициента модификации геометрической модели структуры тела.

$$k_m = \frac{a}{h} \quad (2.9)$$

где h - высота прямоугольного элемента во фрактальной модели, a - ширина прямоугольного элемента во фрактальной модели, m .

Для классической модели губки Менгера $k_m=1$.

Графическое отображение фрактальной модели 1 ранга при разбиении в соответствии с коэффициентом модификации, равном 1, 2 и 3, показано на рисунке 2.4.

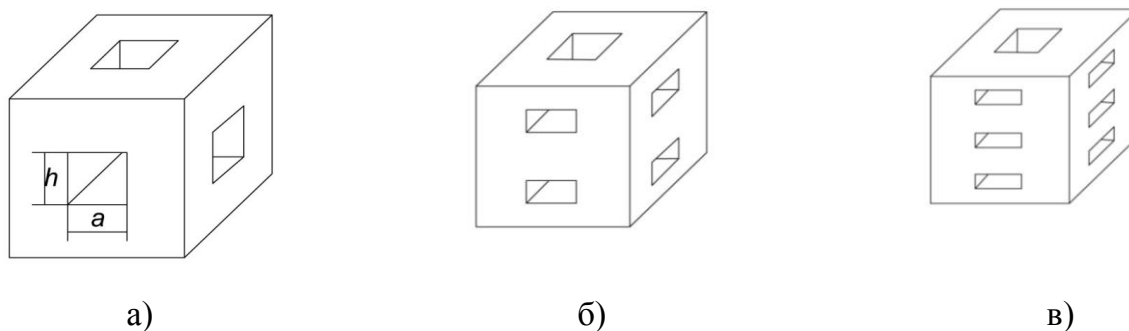


Рисунок 2.4. Фрактальная модель первого ранга разбиения при коэффициенте модификации равном: 1 - (а), 2 - (б), 3 - (в)

Графическая связь между эффективным размером пор, R_v и числом разбиений исходного рангового элемента фрактальной модели, т.е. коэффициентом модификации, k_m приведена на рисунке 2.5, на котором представлена зависимость R_v от k_m для пяти рангов фрактального разбиения m .

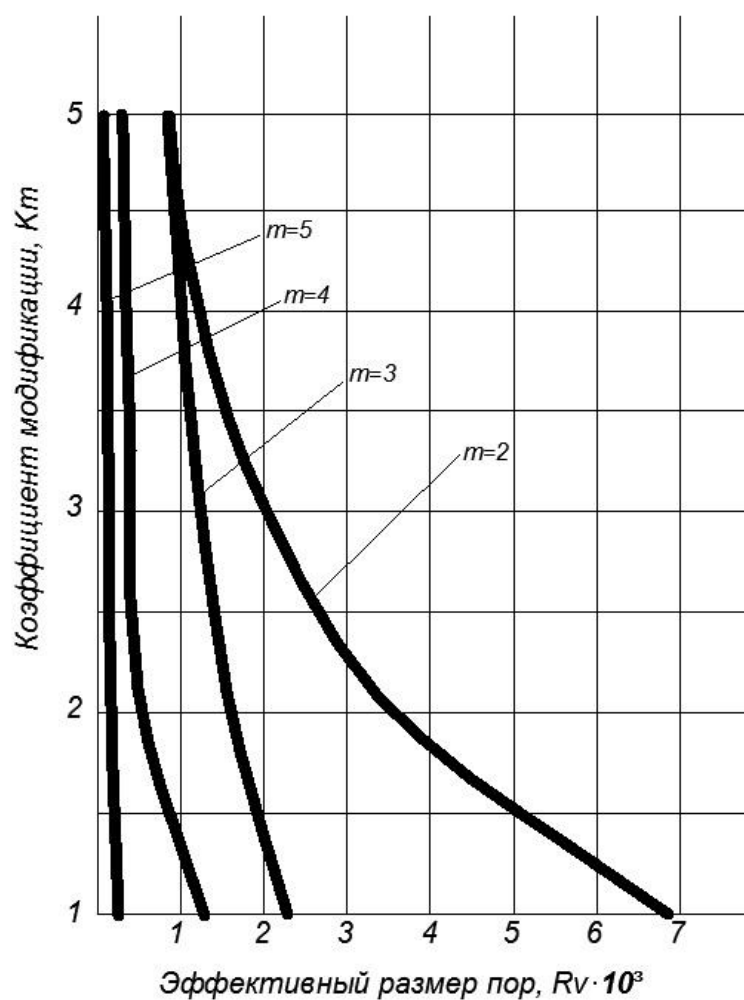


Рисунок 2.5. Зависимость R_v от k_m

Объем фрактальной фигуры первого ранга при коэффициенте модификации равном $k_m = 1$, можно определить как

$$V_1 = 1 - \frac{a}{3} \cdot \frac{b}{3} \cdot \frac{c}{3} \cdot 7, \quad (2.10)$$

для второго ранга

$$V_2 = 1 - \frac{a}{3} \cdot \frac{b}{3} \cdot \frac{c}{3} \cdot 7 - \frac{a}{3 \cdot 3} \cdot \frac{b}{3 \cdot 3} \cdot \frac{c}{3 \cdot 3} \cdot 7 \cdot 20, \quad (2.11)$$

для третьего ранга

$$V_3 = 1 - \frac{a}{3} \cdot \frac{b}{3} \cdot \frac{c}{3} \cdot 7 - \frac{a}{3 \cdot 3} \cdot \frac{b}{3 \cdot 3} \cdot \frac{c}{3 \cdot 3} \cdot 7 \cdot 20 - \frac{a}{3 \cdot 3 \cdot 3} \cdot \frac{b}{3 \cdot 3 \cdot 3} \cdot \frac{c}{3 \cdot 3 \cdot 3} \cdot 7 \cdot 20 \cdot 20. \quad (2.12)$$

Для любого ранга объем фрактальной фигуры можно определить по следующей формуле

$$V_m = 1 - \sum_{\infty}^{m-1} \frac{a}{3^m} \cdot \frac{b}{3^m} \cdot \frac{c}{3^m} \cdot 7 \cdot 20^{(m-1)}. \quad (2.13)$$

Общую площадь поверхности пор, заключенную в объем фрактально структуры первого ранга при коэффициенте модификации равном k_m , можно найти следующим образом

$$F_1 = \left(2 \cdot \frac{a}{3} \cdot \frac{b/k_m}{3} + 2 \cdot \frac{a}{3} \cdot \frac{c}{3} + 2 \cdot \frac{b/k_m}{3} \cdot \frac{c}{3} \right) \cdot 7 \cdot k_m, \quad (2.14)$$

для второго ранга

$$F_2 = F_1 + \left(2 \cdot \frac{a}{3 \cdot 3} \cdot \frac{b/k_m}{3 \cdot 3} + 2 \cdot \frac{a}{3 \cdot 3} \cdot \frac{c}{3 \cdot 3} + 2 \cdot \frac{b/k_m}{3 \cdot 3} \cdot \frac{c}{3 \cdot 3} \right) \cdot 7 \cdot 20 \cdot k_m, \quad (2.15)$$

для третьего ранга

$$F_3 = F_2 + \left(2 \cdot \frac{a}{3 \cdot 3 \cdot 3} \cdot \frac{b/k_m}{3 \cdot 3 \cdot 3} + 2 \cdot \frac{a}{3 \cdot 3 \cdot 3} \cdot \frac{c}{3 \cdot 3 \cdot 3} + 2 \cdot \frac{b/k_m}{3 \cdot 3 \cdot 3} \cdot \frac{c}{3 \cdot 3 \cdot 3} \right) \cdot 7 \cdot 20 \cdot 20 \cdot k_m. \quad (2.16)$$

В общем случае площадь поверхности пор фрактальной фигуры можно определить по следующей формуле

$$F_m = \sum_{\infty}^{m-1} \left(2 \cdot \frac{a}{3^m} \cdot \frac{b}{3^m} + 2 \cdot \frac{a}{3^m} \cdot \frac{c}{3^m} + 2 \cdot \frac{b}{3^m} \cdot \frac{c}{3^m} \right) \cdot 7 \cdot 20^{(m-1)}. \quad (2.17)$$

Таким образом,

$$R_v^{fp} = \frac{\lim_{m \rightarrow \infty} \left(\frac{a}{3^m} \cdot \frac{b}{3^m} \cdot \frac{c}{3^m} \cdot 7 \cdot 20^{(m-1)} \right)}{\lim_{m \rightarrow \infty} \left(2 \cdot \left(\frac{a}{3^m} \cdot \frac{b/k_m}{3^m} + \frac{a}{3^m} \cdot \frac{c}{3^m} + \frac{b/k_m}{3^m} \cdot \frac{c}{3^m} \right) \cdot 7 \cdot 20^{(m-1)} \cdot k_m \right)} \quad (2.18)$$

где a, b, c - длины сторон фрактальной модели, m ; t - номер ранга модификации фрактальной модели.

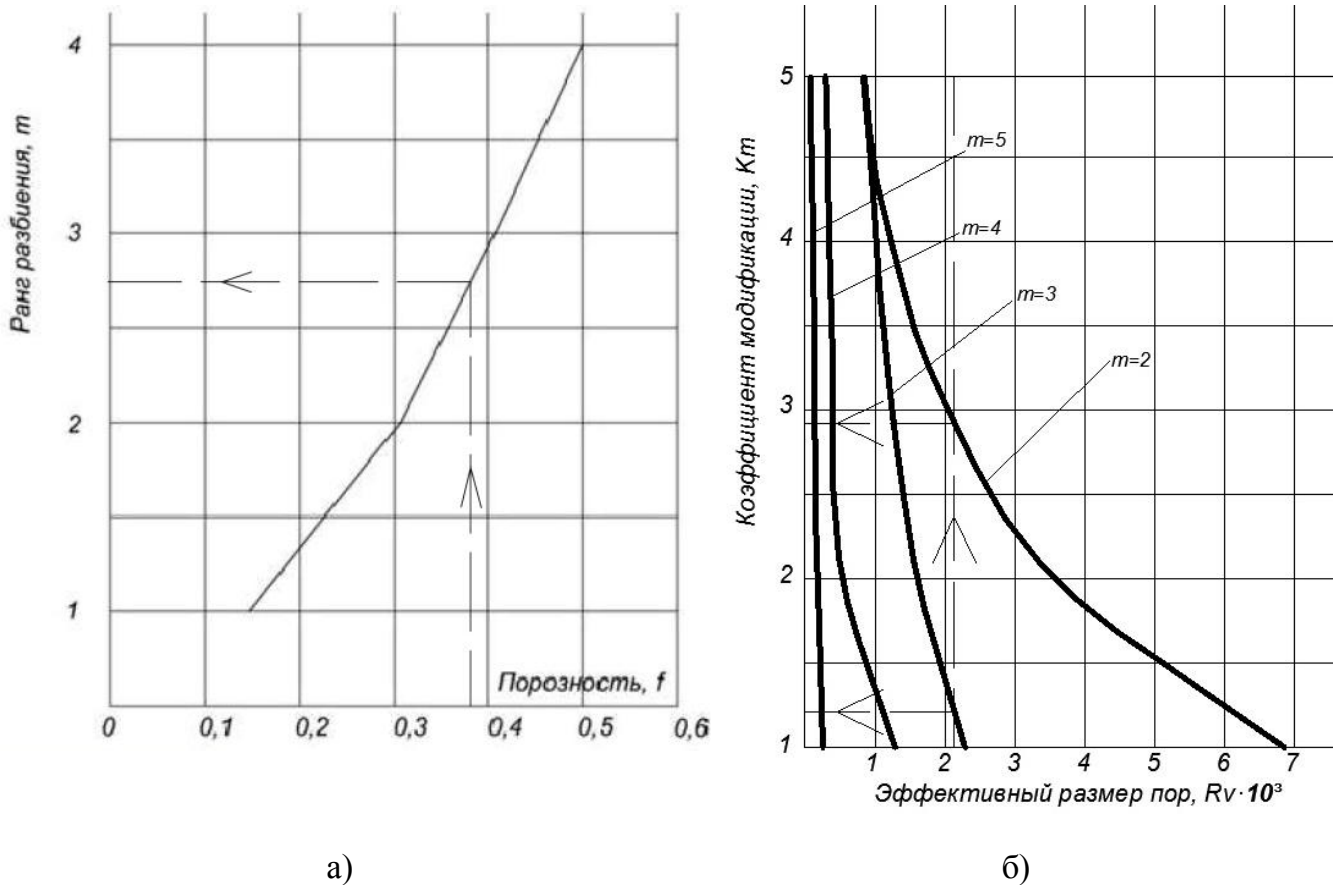


Рисунок 2.6. Методика подбора фрактальной модели: а) – первый этап, б) – второй этап

Совместное использование графиков (рисунок 2.6) дает возможность корректного подбора фрактальной модели при проведении численного эксперимента по нагреву реальной пористой структуры (насыпной садки). В частности, определив значение порозности насыпной садки, на первом этапе, по графику (рисунок 2.6 (а)) находим предварительный ранг разбиения фрактальной модели m . Если попадаем на целое число ранга фрактального разбиения, на этом выбор заканчиваем, в противном случае необходимо определение коэффициента модификации, т. е. числа разбиений (слоев) классической модели. На этом этапе,

зная состав исходной насыпной садки определяем необходимую величину значения эффективного размера пор R_v . Затем по рисунку 2.6 (б), предварительно рассчитав величину R_v , определяем требуемый ранг разбиения k_m .

Например, для садки со значением порозности 0,38 - ранг разбиения фрактальной модели может быть выбран как 2 (рисунок 2.3), так и 3, величина R_v для садки со значением порозности равным 0,38, состоящей из элементов типа кольца диаметром 32 мм составляет $R_v=2,02 \cdot 10^3$. По рисунку 2.5 выбираем ранг разбиения фрактальной модели равный 2.

2.4. Построение геометрической фрактальной модели

Выбор программного комплекса

Построение предложенной математической модели насыпной садки на основе фрактальной структуры с учетом определенного коэффициента модификации осуществлялось в программно-расчетном комплексе Ansys.

Выбор программного комплекса Ansys Fluent в качестве инструмента моделирования основан на том, что Ansys Fluent является одним из наиболее мощных инструментов для вычислительной гидродинамики при моделировании течений жидкостей и газов. Программно-расчетный комплекс Ansys Fluent предлагает довольно широкий выбор моделей, описывающих течения, турбулентность, перенос теплоты и другие.

Таким образом, программный комплекс Ansys Fluent позволяет с достаточной степенью точность провести расчет тепловых процессов в предложенной математической фрактальной модели насыпной садки на основе фрактального моделирования.

Построение геометрической фрактальной модели

Геометрическая фрактальная модель состоит из двух частей: твердого скелета и газового пространства внутри «пор», что позволяет производить расчет твердого и газового тел в составе садки.

Построение геометрии фрактальной модели садки осуществляется в модуле Geometry непосредственно в Ansys Workbench.

Определяем геометрические краевые значения для размеров контейнера с садкой, а именно $0,1 \times 0,1 \times 0,25$ м.

Методом вдавливания эскиза (рисунок 2.7) задаем выбранный в соответствии с условиями моделирования, определяемыми по графикам на рисунке 2.6, фрактальный ранг моделируемой садки (ранг фрактального разбиения, а также коэффициент модификации модели).

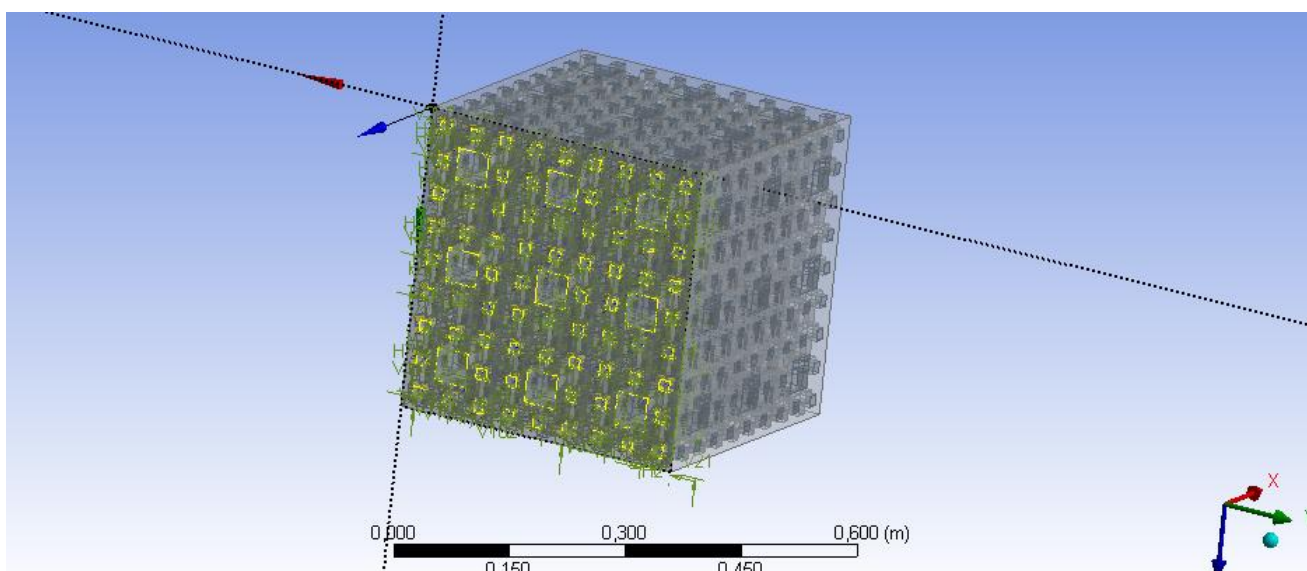


Рисунок 2.7. Задание внутренней структуры модели

При помощи операции Boolean (Логический тип) объединяем все тела фрактальной садки в единое тело, отвечающее за внутренний газовый объем.

В полученной геометрической фрактальной фигуре имеем два отдельных тела (рисунок 2.8): твердую фрактальную модель насыпной садки (твердый скелет) и внутреннюю структуру фрактальной модели, заполненную газовой средой.

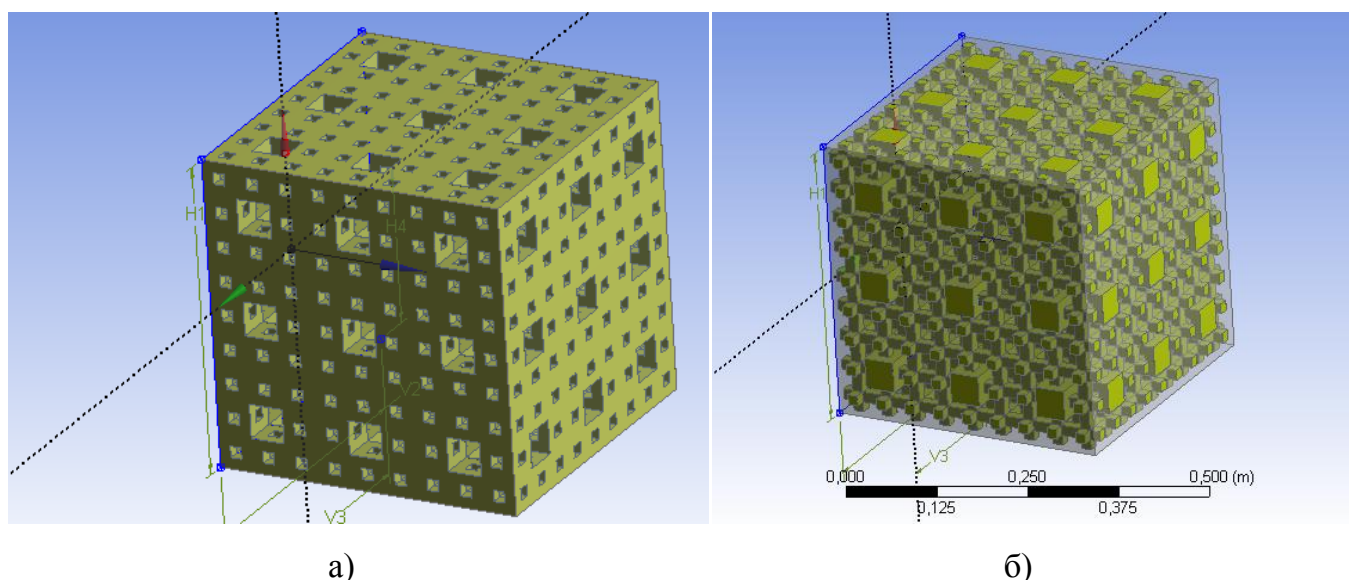


Рисунок 2.8. Полученные фазы модели: а) - твердая структура, б) - газовая среда

Построение расчетной сетки

Следующим этапом численного моделирования является построение расчетной сетки.

В модуле Mesh (Сетка) выполняем моделирование расчетно-сеточной структуры пористой садки. В качестве метода сеточного разбиения предлагается выбирать метод CutCell (Вырезание секции), генератор сеток, строящихся на основе тетраэдров. Преимущество метода тетраэдрических сеток состоит в том, что он достаточно прост и не требует создания множества разнообразных сеточных элементов, что позволяет существенно сэкономить на времени расчета.

Общий вид расчетной сетки предложенной фрактальной модели представлен на рисунке 2.9.

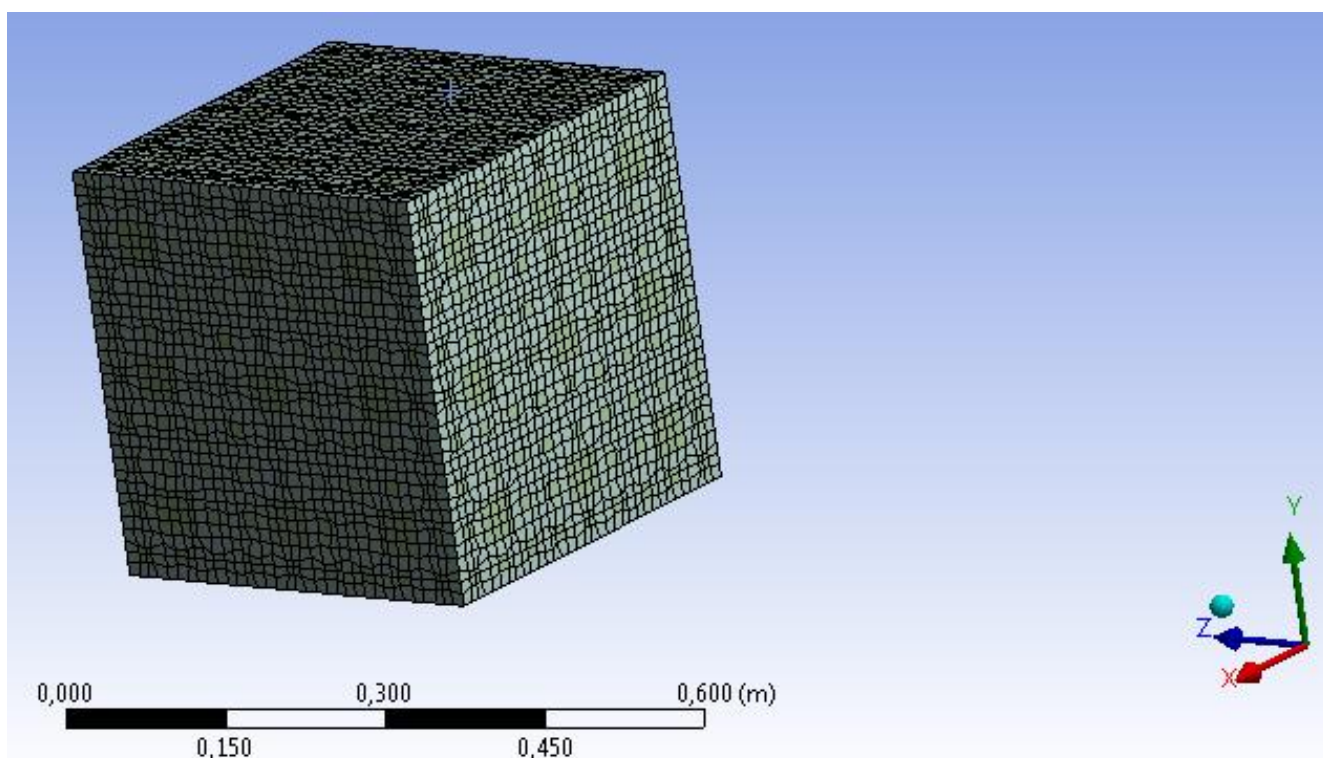


Рисунок 2.9. Общий вид расчетной сетки

Количество элементов сетки составило 39402, а узлов - 70617.

2.5. Выводы по второй главе

1. Разработана методика численного моделирования, при которой реальное пористое тело (насыпная садка) заменяется фракталоподобной геометрической моделью, при этом в расчете не используются эффективные теплофизические коэффициенты.

2. Разработанная модель учитывает: теплофизические свойства материала, а также газовой среды, заполняющей поры; геометрию газовых каналов, располагаемых внутри пористой структуры при расчете движения газа в порах. При этом нет необходимости определять эффективные теплофизические коэффициенты при тепловом расчете нагрева пористого тела.

Материалы второй главы опубликованы в работах автора [16, 48, 52, 54].

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА И ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НАСЫПНЫХ САДОК

В результате обзора литературы по теплообмену в телах, имеющих поры [4, 23, 24-31, 57-61, 70, 74, 81, 85, 89, 93] было выявлено недостаточное количество сведений для расчета насыпных садок, формируемых различными элементами в виде колец, коротких цилиндров и самонарезающихся шурупов с различной величиной порозности, а именно коэффициентов теплопроводности.

Для подтверждения предложенной методики и ее верификации необходимы экспериментальные исследования процесса нагрева насыпных садок с различной величиной порозности. Для этой цели была проведена серия экспериментальных исследований процесса нагрева насыпных садок, состоящих из элементов 4-х различных типов.

Экспериментальное исследование процесса нагрева садок выполнялось на базе исследовательской лаборатории кафедры «Энергетика теплотехнологий и газоснабжение» Ивановского государственного энергетического университета им. В. И. Ленина.

3.1. Экспериментальное исследование процессов теплообмена в насыпных садках

3.1.1. Описание лабораторной установки и метрологическое обеспечение испытаний

Для решения поставленных задач были проведены экспериментальные исследования нагрева насыпных садок, нагреваемых в термической электрической печи.

Описание экспериментальной установки

В ходе эксперимента (рисунок 3.1) в рабочее пространство печи, предварительно разогретой до необходимой для проведения процесса температуры, помещали насыпную садку в металлическом контейнере.

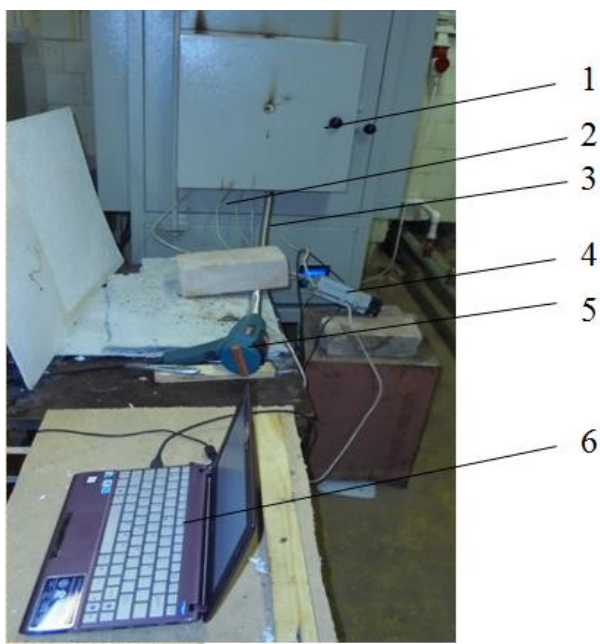


Рисунок 3.1. Экспериментальная установка: 1 - электрическая печь, 2 - термопары ТХА, 3 - воздуховод, 4 - аналоговый модуль МВА-7, 5 - воздухоподогреватель, 6 - компьютер, для обработки данных

Схема экспериментальной установки показана на рисунке 3.2.

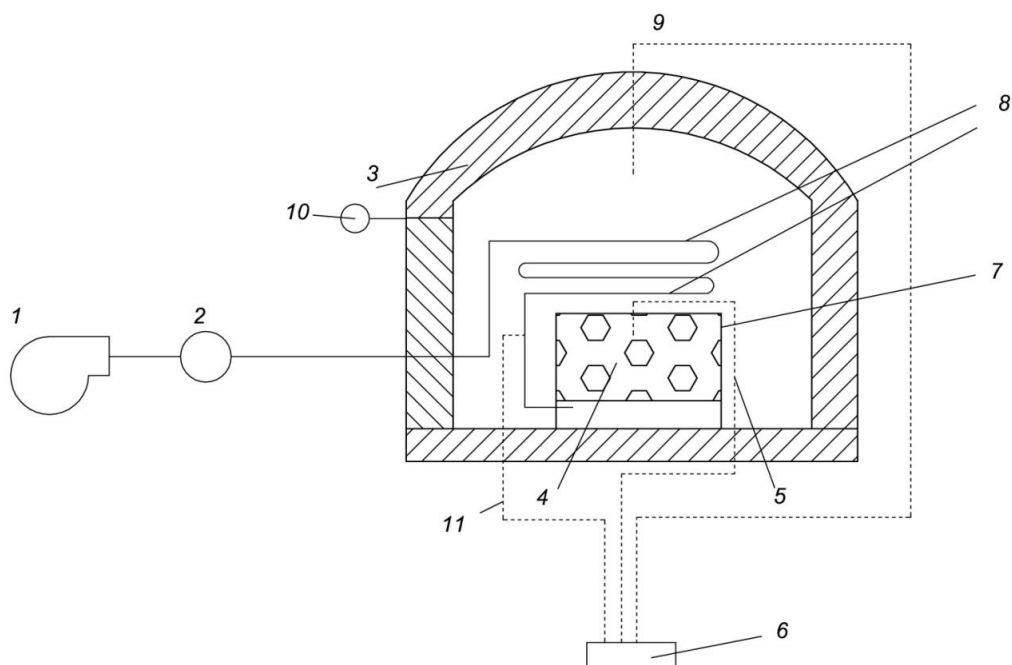


Рисунок 3.2. Схема экспериментальной установки: 1 - дутьевой вентилятор, 2 - цифровой дифманометр ДМЦ 01М, 3 - ограждение печи, 4 - насыпная садка, 5 - набор термопар, 6 - аналоговый модуль МВА-4, 7 - контейнер, 8 - подогреватель, 9 - термопара печи, 10 - термометр для определения температуры окружающей среды, 11 - термопара для определения температуры теплоносителя, подаваемого при фильтрации

Исследование проводилось в камерной электрической печи сопротивления СНОЛ 36/14. Подобные электропечи предназначены для нагрева под закалку высоколегированных сталей и инструмента, а также для отжига, нормализации и отпуска в окислительной среде.

Электропечь состоит из следующих частей: сварного кожуха, огнеупорного ограждения, нагревателей, механизма открывания дверцы. Сварной кожух электропечи футерован теплоизоляционными и огнеупорными материалами, которые образуют изнутри рабочую камеру. Загрузочный проем закрыт футерованной дверцей, открывание и закрывание которой производится вручную. Нагревательные карбидокремниевые элементы расположены на боковых стенках, на своде и на поду печи. Питание нагревательных элементов электроэнергией осуществляется от двухфазной сети. Подина печи, на которую помещается контейнер с насыпной садкой, выполнена из огнеупорного шамотного кирпича.

Характеристики печи представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Характеристики печи СНОЛ 36/14

Объем, m^3	Номинальная температура, K	Установленная мощность, kW	Рабочая камера, мм ШхДхВ	Количество нагревательных элементов, шт
1	2	3	4	6
0,036	1573	6,8	340x380x340	12

Экспериментальное исследование проводилось для заготовок одного типоразмера, хаотично засыпаемых в контейнер. Как известно, величина порозности в пористых структурах определяется как доля объема пор в общем объеме пористого тела.

$$f = \frac{V_{пор}}{V_{тела}}, \quad (3.1)$$

где $V_{пор}$ - объем пор, m^3 ; $V_{тела}$ - общий объем тела в естественном состоянии, m^3 .

Объем пор определялся исходя из веса засыпаемых элементов.

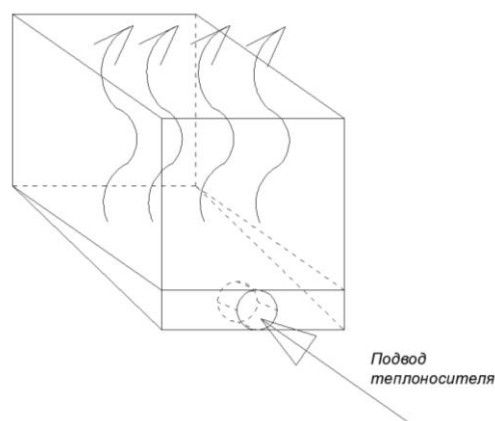
$$V_{пор} = \frac{m_{сад} - m_{полн}}{\rho_{тела}}, \quad (3.2)$$

где $m_{сад}$ - масса элементов насыпной садки, кг; $m_{полн}$ - масса заполненного контейнера, кг; $\rho_{тела}$ - плотность элементов, кг/м³.

Контейнер, изображенный на рисунке 3.3-а, имеет размеры 0,1 х 0,1 х 0,25 м. В нижней его плоскости, для организации фильтрации, выполнены отверстия диаметром 10 мм с шагом 20 мм. Подача предварительно подогретого воздуха осуществлялась через входное отверстие диаметром 20 мм, расположенное в нижнем отсеке контейнера. Нижняя часть контейнера представляла собой сужающийся по длине отсек, служащий для равномерного распределения теплоносителя по объему садки.



а)



б)

Рисунок 3.3. **Контейнер с насыпной садкой:** а - общий вид контейнера, б - схематичное изображение движения теплоносителя в контейнере

Теплоноситель подводится с помощью специального канала, выполненного из нержавеющей стали, соединяющего дутьевой вентилятор и контейнер. Далее греющие газы равномерно распределялись по объему нижней камеры и через перфорированную нижнюю часть контейнера фильтровались через насыпную садку (рис. 3.3-б).

Характеристика исследуемой садки

Насыпные садки формировались из следующих структурных элементов:

- кольца диаметр $d_{к1}=22$ мм, толщина стенки $\delta=2$ мм, длина, $l_{к}=20$ мм;
- кольца диаметр $d_{к1}=32$ мм, толщина стенки $\delta=2$ мм, длина, $l_{к}=20$ мм;
- короткие стальные цилиндры $d_{цил}=16$ мм и $l_{цил}=30$ мм;
- самонарезающиеся шурупы $l_{сам}= 50$ мм и $d_{сам}=3,5$ мм.

Все элементы выполнены из стали 40х [78]. Теплофизические свойства исследуемой стали представлены в таблице 3.2.

Садка состоящая из структурных элементов 1 типа – кольца наружный диаметр 32 мм

Садка формировалась из коротких стальных колец, длиной 20 мм, наружным диаметром - 32 мм, толщиной стенки 2 мм, материал – сталь 40х. Общий вид элементов исследуемой садки представлен на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4. Конструктивные элементы садки - кольца $d_{к2}=32$ мм

Общая масса садки, помещаемой в контейнер, составила 2,512 кг. Средняя масса одного элемента - 0,050 кг. Значение порозности садки составляло 0,872.

Садка состоящая из структурных элементов 1 типа – колец наружный диаметр 22 мм

Садка состояла из коротких стальных колец, длиной 20 мм, наружным диаметром - 22 мм, толщиной стенки 2 мм, материал – сталь 40х. Вид представлен на рисунке 3.5.



Рисунок 3.5. Конструктивные элементы садки - кольца $d_{к1}=22$ мм

Общая масса садки в контейнере составила 2,790 кг, Средняя масса одного элемента - 0,021 кг. Значение порозности садки составляло 0,858.

Садка состоящая из структурных элементов 2 типа - коротких цилиндров (наружный диаметр 16 мм)

Исследуемая насыпная садка состояла из коротких цилиндров, выполненных из стали 40х. Цилиндры имеют следующие размеры: средняя длина цилиндров составляет 30 мм, диаметр цилиндров 16 мм.

Общая масса формируемой садки составила 10,75 кг, средняя масса одного конструктивного элемента типа короткий цилиндр составляла 0,031 кг. Значение порозности садки равно 0,454. Общий вид цилиндров представлен на рисунке 3.6.



Рисунок 3.6. Конструктивные элементы садки - короткие цилиндры

Садка состоящая из структурных элементов 3 типа - самонарезающихся шурупов

Исследуемая насыпная садка состояла из строительных элементов - фосфатированных самонарезающихся шурупов с широкой резьбой. Длина шурупа от шляпки до острого кончика 50 мм, толщина 3 мм, материал изготовления - сталь 40х.

Общая масса формируемой садки составляет 2 кг, средняя масса одного конструктивного элемента 0,002 кг. Значение порозности садки равно 0,898.

Общий вид садки, состоящей из самонарезающихся шурупов, представлен на рисунке 3.7.



Рисунок 3.7. Конструктивные элементы садки - самонарезающиеся шурупы

Метрологическое обеспечение экспериментального исследования

Для измерения и контроля исследуемых параметров в ходе экспериментального исследования использовались соответствующие средства измерения. Перечень средств и их характеристики сведены в таблицу 3.2. Все используемые средства измерения перед началом испытаний прошли государственную поверку.

Таблица 3.2. Средства измерения исследуемых параметров

№	Исследуемый параметр	Единица измерения	Тип средства измерения	Наименование средства измерения	Диапазон измерения	Цена деления шкалы	Предел допускаемой погрешности	
							Тип погрешности	Значение
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Температура окружающей среды	$^{\circ}C$	-	Лабораторный термометр	0...100	0,1	Абсолютная	0,25 %
2	Температурное поле исследуемой насыпной садки	$^{\circ}C$	ТХА	Термоэлектрический преобразователь	-200...1000	0,1	Приведенная	0,25 %
3	Температура в рабочем пространстве печи	$^{\circ}C$	ТХА	Термоэлектрический преобразователь	-200...1000	0,1	Приведенная	0,25 %
5	Давление подаваемого воздуха	Па	ДМЦ-01М	Манометр дифференциальный цифровой	0... 2000	0,1	Абсолютная	$\pm(1+0,005\Delta P)$, Па
4	Температура подаваемого воздуха	$^{\circ}C$	ТХА	Термоэлектрический преобразователь	-200...1000	0,1	Приведенная	0,25 %
6	Скорость подаваемого воздуха	м/с	TESTO 410-1	Анемометр	0.4 ... 20	0,1	Абсолютная	$\pm(0.2 \text{ м/с} + 2\% \text{ от изм. знач.})$

3.1.2. Описание экспериментальных исследований и полученные результаты

В ходе эксперимента проводился нагрев насыпной садки в предварительно нагретом пространстве камерной нагревательной электрической печи. Для исследования были выбраны 4 типа насыпных садок описанные ранее. Для каждой насыпной садки исследование проводилось при 4-х режимах нагрева:

- 1) температура внутри печи $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, фильтрация теплоносителя отсутствует;
- 2) температура внутри печи $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, фильтрация теплоносителя отсутствует;
- 3) температура внутри печи $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, расход теплоносителя, подаваемого для фильтрации $0,0039\text{ м}^3/\text{с}$;
- 4) температура внутри печи $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, расход теплоносителя, подаваемого для фильтрации $0,0092\text{ м}^3/\text{с}$.

Расположение характерных точек замеров температуры насыпной садки показано на рисунке 3.8.

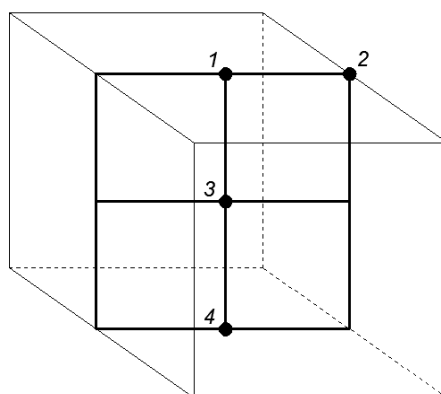


Рисунок 3.8. Расположение характерных точек замеров температурного поля насыпной садки

Описание эксперимента нагрева насыпной садки.

Целью экспериментального исследования являлось определение температурного поля насыпной садки в процессе нагрева. В ходе эксперимента фиксировались следующие параметры:

- температура окружающей среды, $t_{oc},\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- температура в печи, $t_n,\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- температура в контрольных точках насыпной садки, $t_{ci},\text{ }^{\circ}\text{C}$;

- электрическая мощность, $Q_{эл}$, кВт.

Схематическое изображение экспериментальной установки приведено на рисунке 3.2.

Описание эксперимента для процесса закалки.

В ходе эксперимента в разогретую до 900°C печь через загрузочную дверь помещали контейнер (7) с нагреваемой садкой (4).

Предварительный нагрев печи необходим для исключения затрат энергии на аккумуляцию кладкой печи и нагревательными элементами.

Измерение температурного поля садки при нагреве производилось при помощи термопар ТХА (5), закрепленных в характерных точках.

Сигнал с термопар подавался на аналоговый модуль МВА-4 (6) и далее обрабатывался на компьютере. Время опроса сигналов с термопар составило порядка 2 значений в секунду.

В соответствии с ГОСТ 7342-79 качество термической обработки определяется микроструктурой, твердостью, глубиной поверхностного слоя и т.д. По диаграмме углерод - железо качественный нагрев этой марки стали при термической обработке, соответствующей закалке, должен происходить в диапазоне температур $840 - 860^{\circ}\text{C}$. В экспериментальном исследовании температура в рабочем пространстве печи задавалась равной 900°C , а температурный перепад определялся при достижении температуры 860°C .

В процессе экспериментального исследования получены данные для четырех типов садок при 4-х различных режимах нагрева. Для каждого из проведенных опытов построены температурные графики, на которых показано изменение температуры в характерных точках насыпной садки.

Обработка экспериментальных данных

Полученные результаты замеров температур в характерных точках (рисунок 3.8) при нагреве исследуемой насыпной садки сведены в таблицу 3.3.

Таблица 3.3. Результаты эксперимента нагрева насыпных садок до 860 °С

Время, мин	Температура в рабочем пространстве печи, °С	Показания термопары № 1, °С	Показания термопары № 2, °С	Показания термопары № 3, °С	Показания термопары № 4, °С
1	2	3	4	5	6
Нагрев насыпной садки, состоящей из конструктивных элементов в форме колец D=22 мм, величина порозности $f=0,858$					
1	901	16,3	16,3	16,5	16,5
5	900	258	283	105	90,0
10	902	454	507	297	200
15	901	542	573	449	391
20	900	610	630	556	526
25	900	664	673	627	606
30	902	706	714	676	659
35	900	738	741	714	699
40	901	764	771	740	727
50	900	827	830	805	789
60	902	883	885	869	854
77	900	892	900	897	892
Нагрев насыпной садки, состоящей из конструктивных элементов в форме колец D=32 мм, величина порозности $f=0,872$					
1	900	66,4	53,9	19,1	18,5
5	900	485	572	72,1	147
10	902	650	710	288	398
15	901	734	775	538	592
20	900	799	827	681	715
25	900	844	863	763	791
30	901	871	882	851	848
35	901	882	889	877	872
40	900	889	892	888	880
50	901	895	899	892	886
60	902	896	900	893	888
72	900	896	900	893	888
Нагрев насыпной садки, состоящей из конструктивных элементов в форме самонарезающихся шурупов длиной 50 мм, величина порозности $f=0,898$					
1	902	69,0	58,0	20,0	17,0
5	901	243	249	46,0	39,0
10	901	618	632	92,0	82,0
15	900	739	760	189	173
20	900	804	828	357	336
25	901	849	864	556	525
30	902	872	882	791	759
35	900	884	890	851	841
40	900	887	892	866	860
50	901	893	895	876	875
60	901	896	897	888	887
75	900	899	900	899	897

Время, мин	Температура в рабочем пространстве печи, °C	Показания термопары № 1, °C	Показания термопары № 2, °C	Показания термопары № 3, °C	Показания термопары № 4, °C
1	2	3	4	5	6
Нагрев насыпной садки, состоящей из конструктивных элементов в форме коротких цилиндров D=16 мм, величина порозности $f=0,454$					
1	901	65,0	58,0	19,0	17,0
5	901	239	249	23,0	18,0
10	900	614	632	30,0	23,0
15	900	735	760	46,0	31,0
20	902	800	828	80,0	44,0
25	901	845	864	137	67,0
30	900	868	882	212	98,0
35	901	880	890	292	145
40	901	883	892	373	195
50	902	889	895	552	366
60	902	892	899	746	554
70	901	895	903	871	760
80	900	900	905	900	878
87	900	904	905	903	901

Графическое отображение полученных результатов для каждого из типов исследуемых насыпных садок представлено на рисунках 3.9. - 3.13.

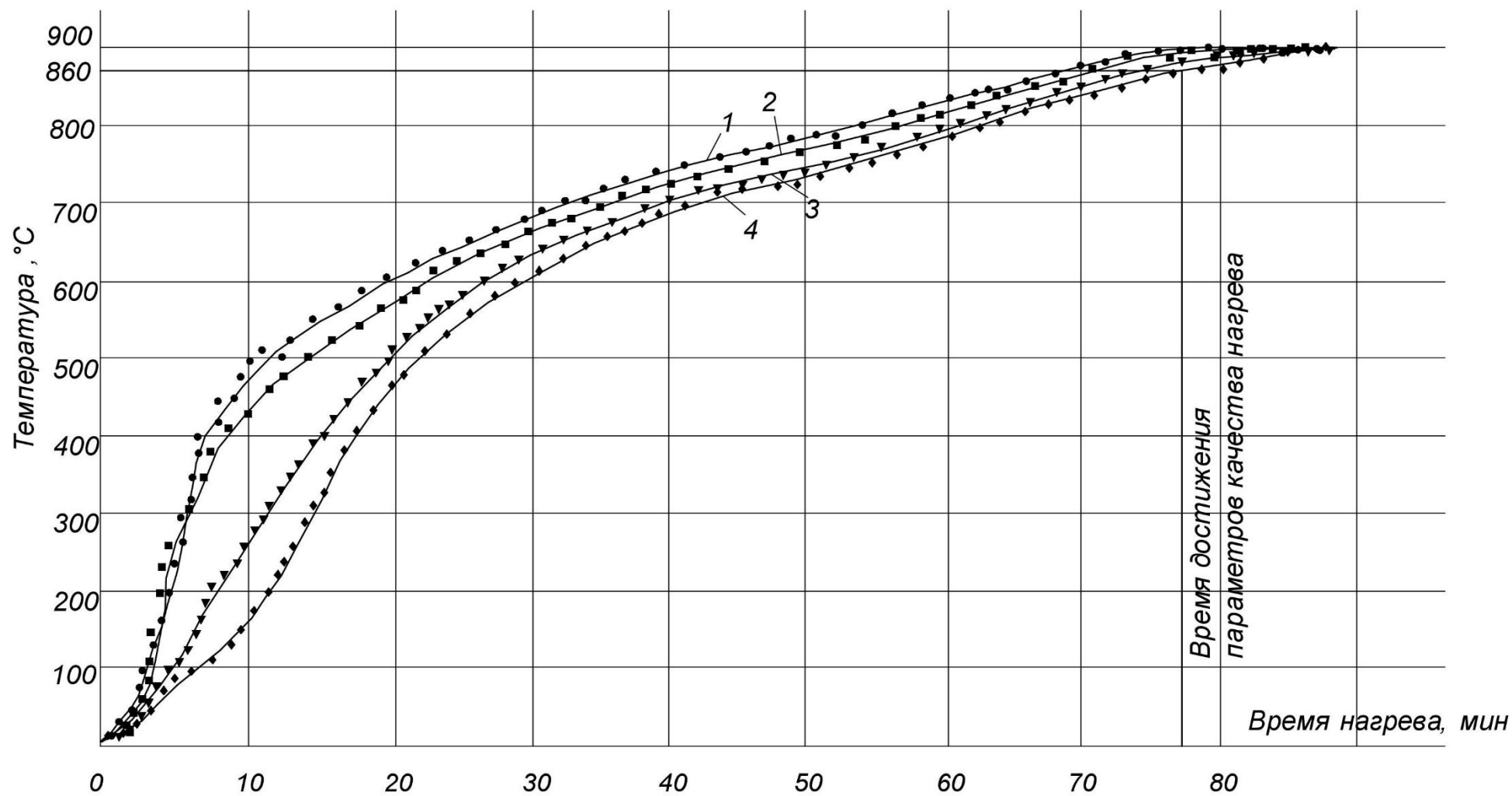


Рисунок 3.9. Значение температур насыпной садки (значение порозности $f=0,858$) показываемые термопарами: 1 - термопара № 1, 2 - термопара № 2, 3 - термопара № 3, 4 - термопара № 4

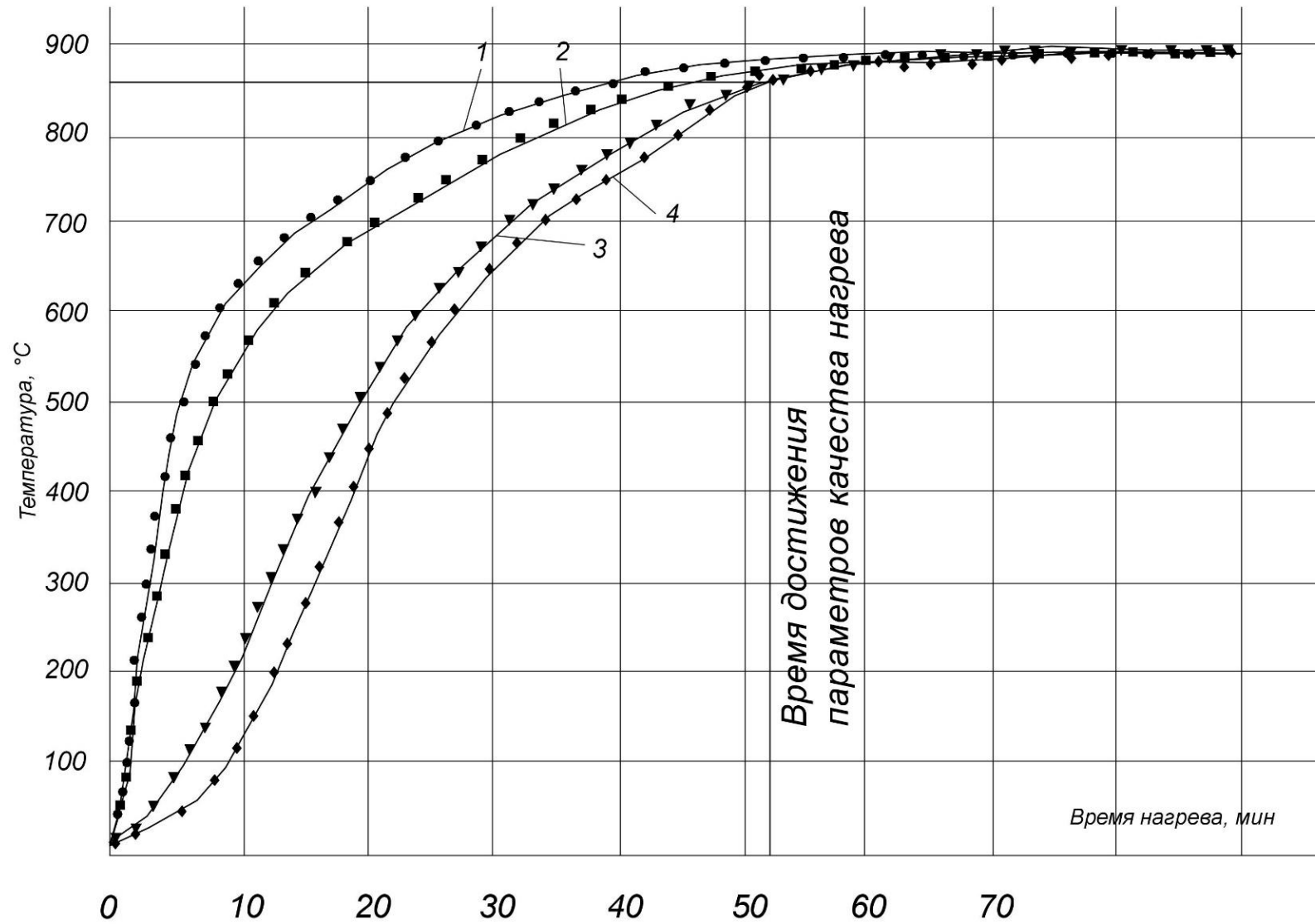


Рисунок 3.10. Значение температур насыпной садки (значение порозности $f=0,872$) показываемые термопарами: 1 - термопара № 1, 2 - термопара № 2, 3 - термопара № 3, 4 - термопара № 4

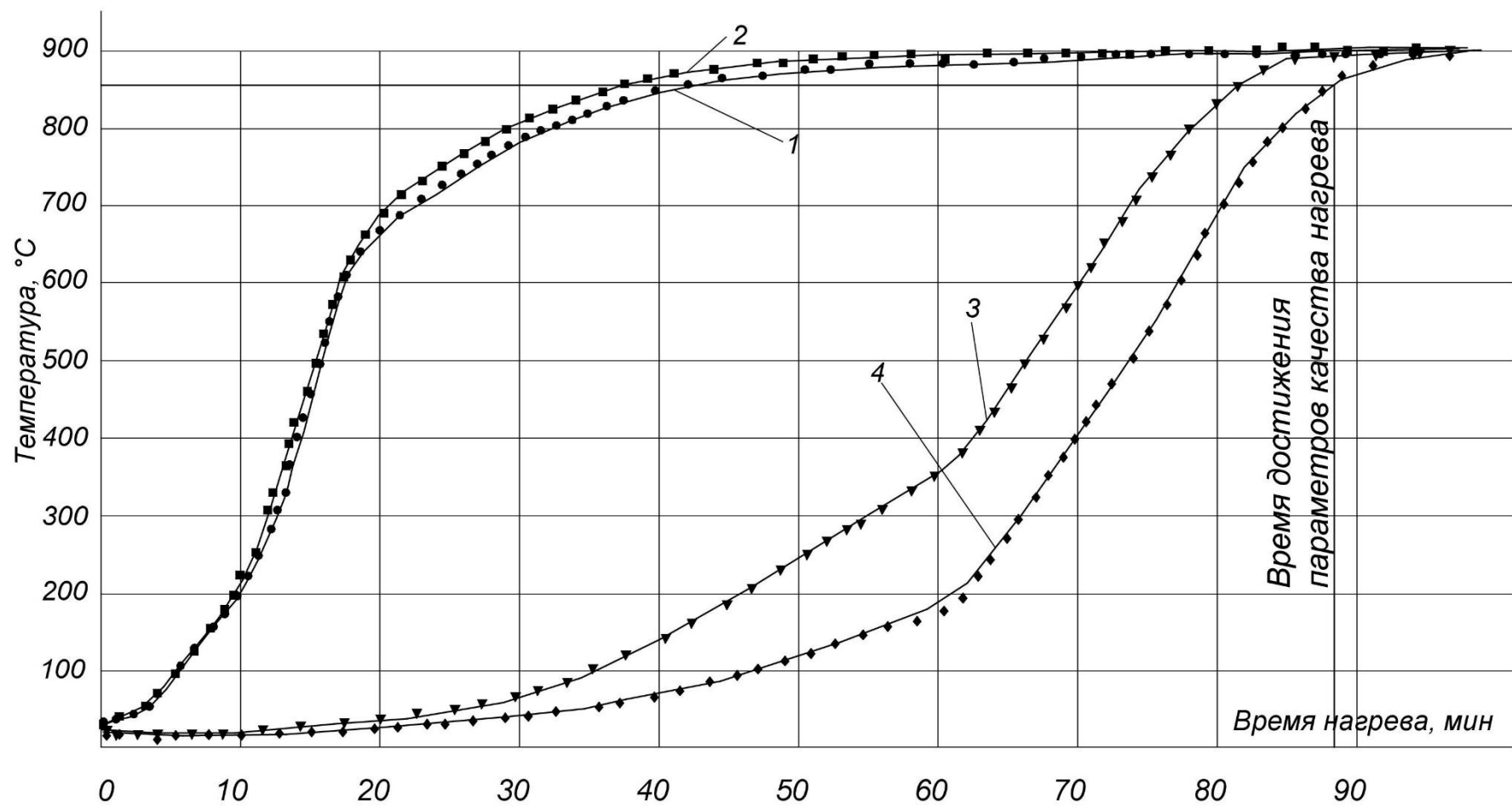


Рисунок 3.11. Значение температур насыпной садки (значение порозности $f=0,454$) показываемые термопарами: 1 - термопара № 1, 2 - термопара № 2, 3 - термопара № 3, 4 - термопара № 4

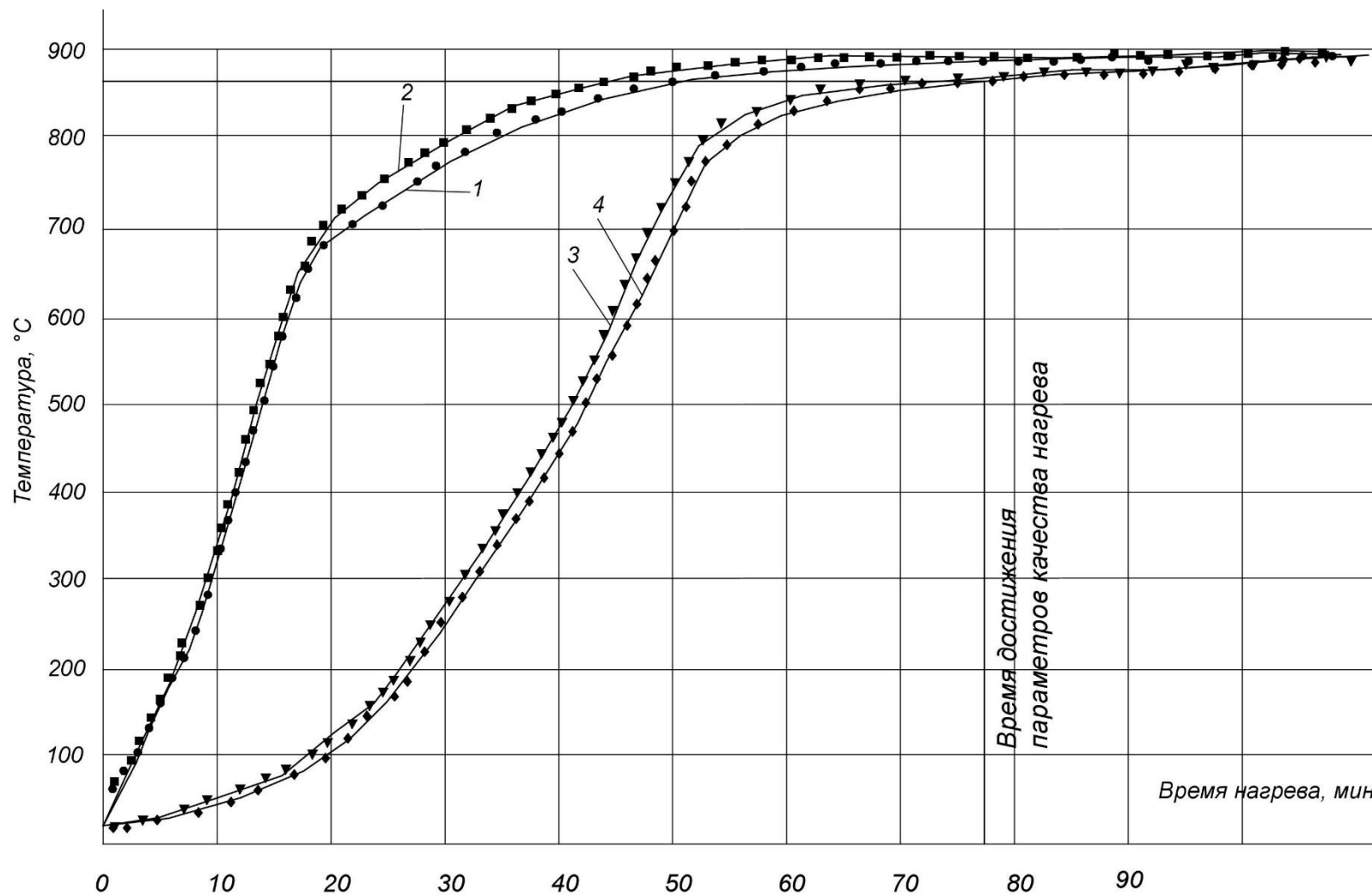


Рисунок 3.12. Значение температур насыпной садки (значение порозности $f=0,898$) показываемые термопарами: 1 - термопара № 1, 2 - термопара № 2, 3 - термопара № 3, 4 - термопара № 4

На графиках видны температуры, характерные для поверхности и теплового центра нагреваемых насыпных садок. Также четко прослеживается зависимость скорости нагрева насыпной садки в тепловом центре от величины порозности.

Ожидаемая допустимая погрешность обработки экспериментальных данных складывается из погрешности измерительного прибора, характеризующаяся абсолютным или приведенным типом погрешности, указанным в таблице 3.2.

Кроме нагрева металла под закалку в термических печах часто проводится процесс отпуска металла в печи для которого требуются более низкие температуры, порядка $400\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Отпуск в машиностроении используется для уменьшения силы внутренних напряжений, которые появляются во время закалки. Высокая твердость делает изделия хрупкими, поэтому отпуском добиваются увеличения ударной вязкости и снижения жесткости и хрупкости стали. Для этого в ходе экспериментального исследования для 4-х типов садок с различной величиной порозности производился нагрев до температуры среднетемпературного отпуска.

Для достижения параметров качества нагрева температура теплового центра приблизительно должна равняться температуре поверхности с точностью до $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ [80].

Температурные поля во внутреннем пространстве исследуемой насыпной садки при нагреве до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ сведены в таблицу 3.4.

Таблица 3.4. Результаты эксперимента нагрева насыпных садок до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$

Время, мин	Температура в рабочем пространстве печи, $^{\circ}\text{C}$	Показания термопары № 1, $^{\circ}\text{C}$	Показания термопары № 2, $^{\circ}\text{C}$	Показания термопары № 3, $^{\circ}\text{C}$	Показания термопары № 4, $^{\circ}\text{C}$
1	2	3	4	5	6
Нагрев насыпной садки, состоящей из конструктивных элементов в форме колец $D=22\text{ мм}$, значение порозности $f=0,858$					
1	399	14,0	14,1	13,8	14,0
5	398	90,8	184	35,4	21,8
10	399	230	323	93,7	74,9
15	399	302	369	161	146
20	399	340	391	227	223
25	399	366	399	289	284
30	400	386	399	338	330

Время, мин	Температура в рабочем пространстве печи, °C	Показания термопары № 1, °C	Показания термопары № 2, °C	Показания термопары № 3, °C	Показания термопары № 4, °C
1	2	3	4	5	6
35	400	390	399	372	364
40	400	395	399	397	389
44	400	399	400	400	399

Нагрев насыпной садки, состоящей из конструктивных элементов в форме колец $D=32$ мм, значение порозности $f=0,872$

1	400	10,8	10,8	10,5	10,4
5	399	209	286	50,7	28,7
10	399	320	350	150	130
15	400	369	383	237	208
20	400	383	395	299	282
25	400	401	399	343	335
30	400	400	399	379	376
35	400	400	400	399	400

Нагрев насыпной садки, состоящей из конструктивных элементов в форме самонарезающихся шурупов длиной 50 мм, значение порозности $f=0,898$

1	400	20,0	20,0	19,3	19,5
5	400	98,2	34,4	21,3	19,3
10	400	285	238	92,4	35,8
15	400	349	339	183	107
20	400	381	383	257	205
25	400	398	389	314	290
30	400	400	399	357	347
35	400	400	400	390	386
41	400	400	400	400	399

Графическое отображение полученных результатов для каждого из типов исследуемых насыпных садок представлено на рисунках 3.13 - 3.15.

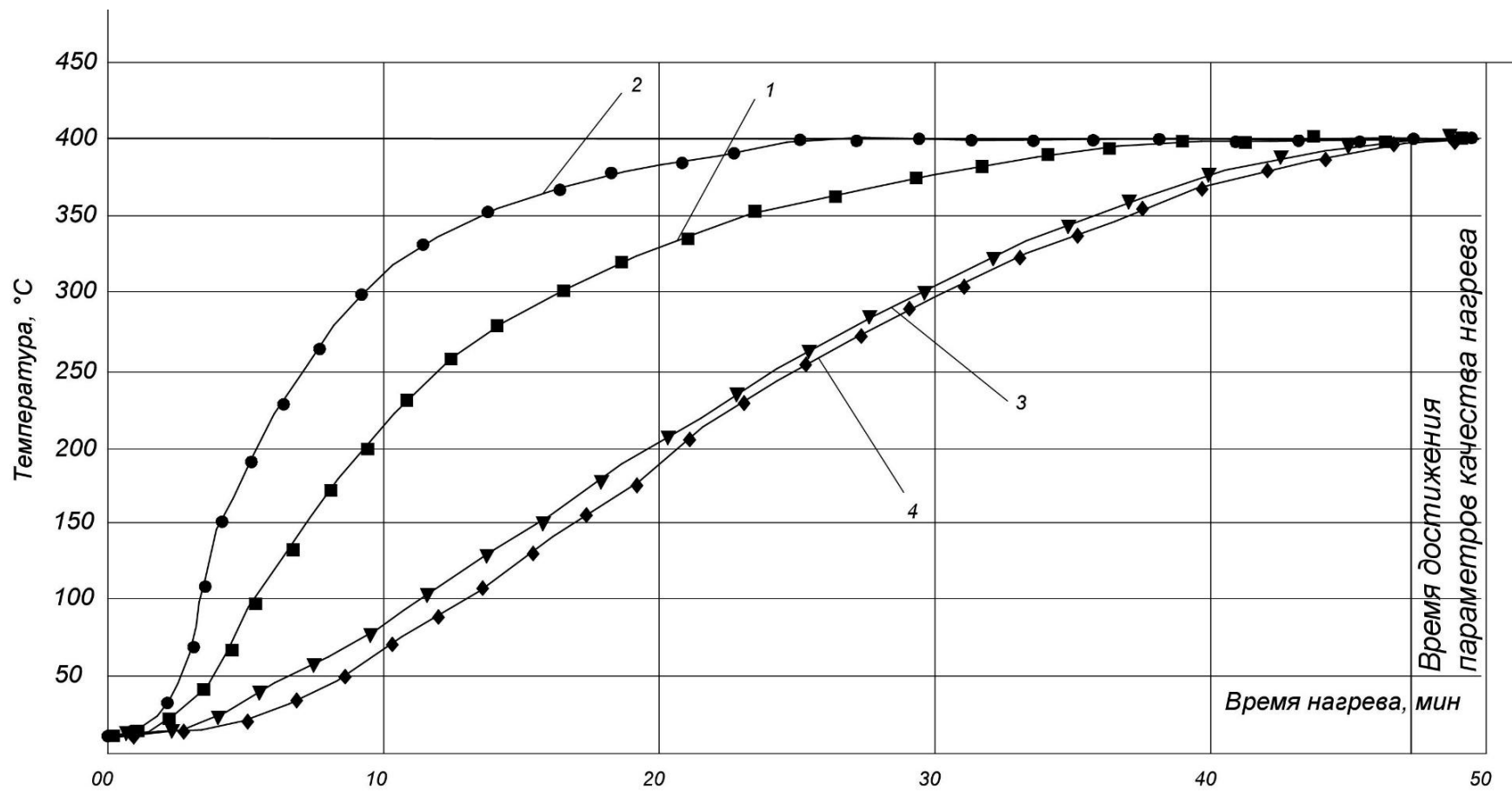


Рисунок 3.13. Значение температур насыпной садки (значение порозности $f=0,858$) показываемые термопарами: 1 - термопара № 1, 2 - термопара № 2, 3 - термопара № 3, 4 - термопара № 4

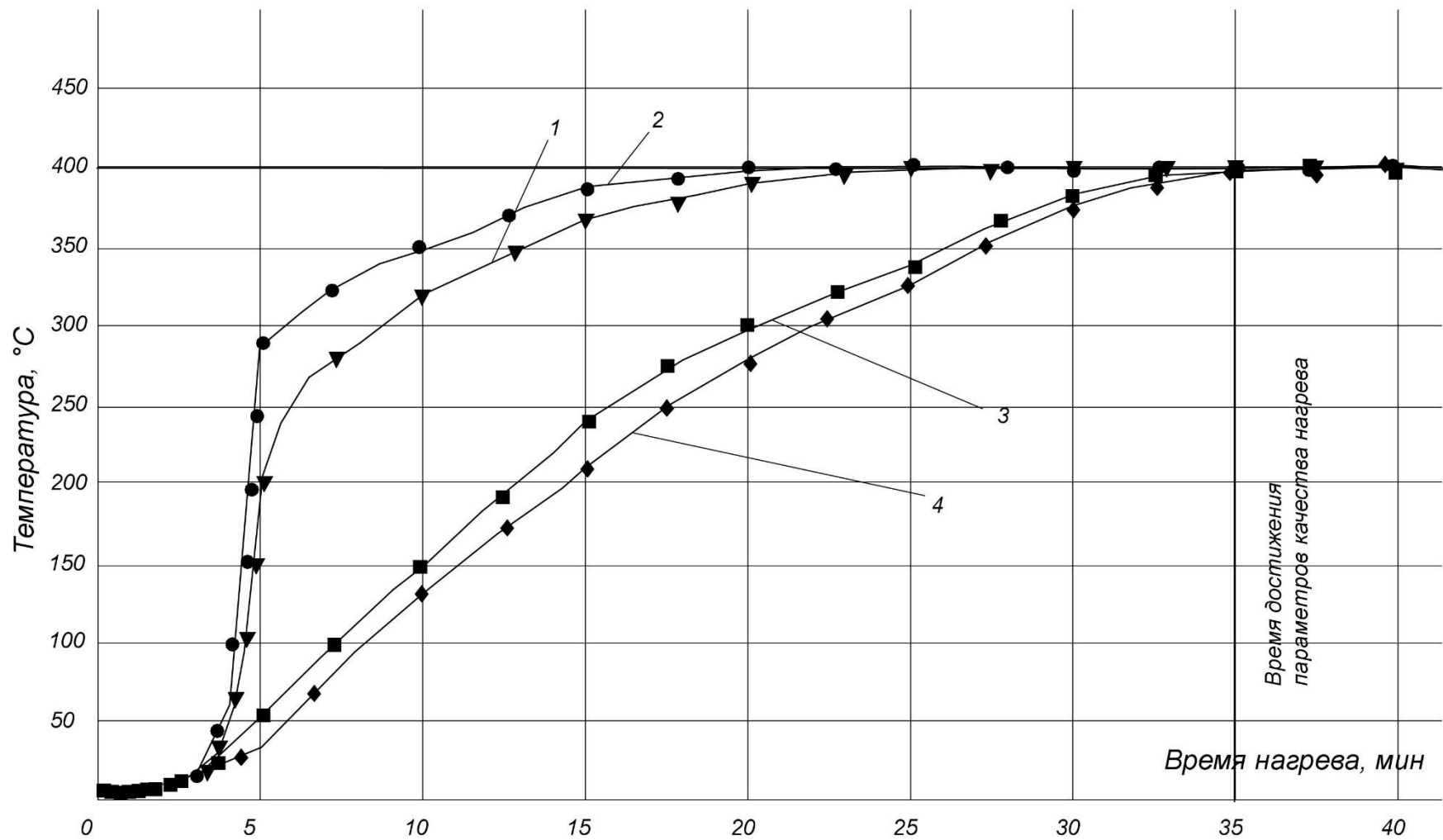


Рисунок 3.14. Значение температур насыпной садки (значение порозности $f=0,872$) показываемые термопарами: 1 - термопара № 1, 2 - термопара № 2, 3 - термопара № 3, 4 – термопара № 4

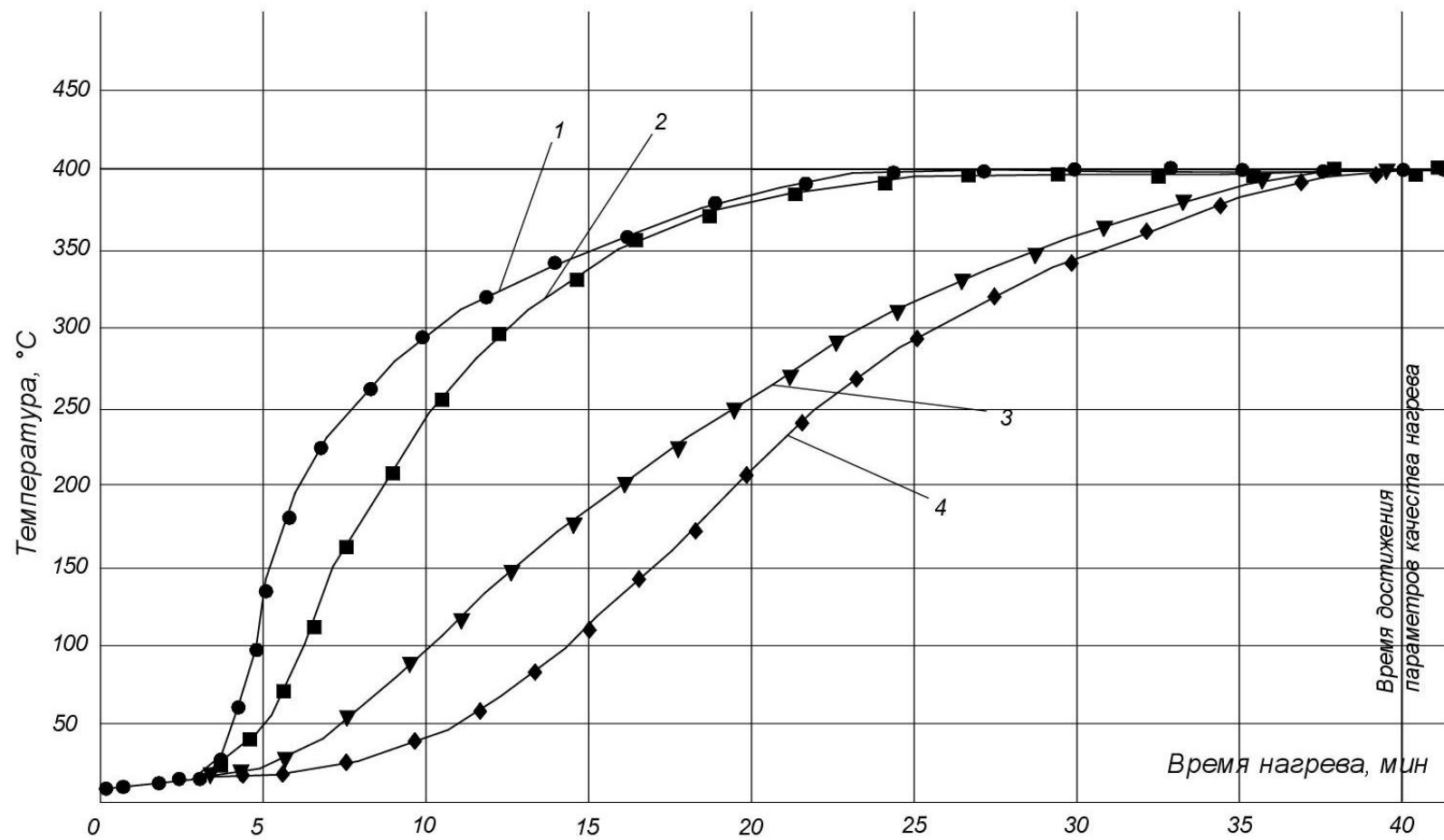


Рисунок 3.15. Значение температур насыпной садки (значение порозности $f=0,898$) показываемые термопарами: 1 - термопара № 1, 2 - термопара № 2, 3 - термопара № 3, 4 - термопара № 4

Описание экспериментов по нагреву насыпных садок с фильтрацией теплоносителя при $T_{печи}=400\text{ }^{\circ}\text{C}$ (для процесса выдержки)

Целью экспериментального исследования являлось определение температурного поля насыпной садки при организации фильтрации через нее теплоносителя. В ходе эксперимента фиксировались следующие параметры:

- температура окружающей среды, $t_{oc},\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- температура в печи, $t_n,\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- температура в контрольных точках насыпной садки, $t_{ci},\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- температура вдуваемого теплоносителя, $t_b,\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- скорость теплоносителя, $u_b,\text{ м/с}$;
- затраченная электрическая мощность, $Q_{эл},\text{ кВт}$.

Схематическое изображение экспериментальной установки приведено на рисунке 3.2.

Максимальная температура подаваемого теплоносителя (воздуха) составляла порядка $400\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В ходе эксперимента в разогретую до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ печь через загрузочную дверь помещают контейнер (7) с нагреваемой садкой (4). Горячий воздух подается по специальному воздухопроводу (8), подведенному в нижнюю часть контейнера (7). Скорость воздуха, подаваемого для процесса фильтрации, замерялась цифровым термоанемометром (2), температура подаваемого воздуха определялась термопарой (11). Измерение температурного поля садки при нагреве производилось при помощи термопар (5) закрепленных в характерных точках. Сигнал с термопар подавался на аналоговый модуль МВА-4 (6) и затем обрабатывался на компьютере.

В процессе исследования были получены данные для 4-х типов насыпных садок с различной величиной порозности, при двух различных режимах нагрева. Для каждого из проведенных опытов были построены графики, на которых показано изменение температуры в характерных точках насыпной садки.

Обработка экспериментальных данных

При первом режиме фильтрации расход подаваемого воздуха составил $0,0037 \text{ м}^3/\text{с}$, на втором – $0,0092 \text{ м}^3/\text{с}$.

Полученные температурные поля во внутреннем пространстве исследуемых насыпных садок при 2-х режимах фильтрации воздуха через насыпную садку сведены в таблицы 3.5. и 3.6.

Таблица 3.5. Результаты эксперимента по нагреву насыпных садок при 1 режиме фильтрации

Время, мин	Температура в рабочем пространстве печи, °C	Показания термопары № 1, °C	Показания термопары № 2, °C	Показания термопары № 3, °C	Показания термопары № 4, °C
1	2	3	4	5	6
Нагрев насыпной садки, состоящей из конструктивных элементов в форме колец $D=22 \text{ мм}$, значение порозности $f=0,858$					
1	400	18,9	18,9	18,9	19,2
5	400	24,5	46,2	43,5	134
10	400	75,1	154	152	238
15	400	149	229	249	301
20	400	226	286	313	341
25	400	288	326	352	368
30	400	334	357	380	386
35	400	366	380	399	399
40	400	388	397	400	400
44	400	399	400	400	400
Нагрев насыпной садки, состоящей из конструктивных элементов в форме колец $D=32 \text{ мм}$, значение порозности $f=0,872$					
1	400	21,9	21,3	20,8	20,6
5	400	73,2	88,5	109	72,1
10	400	173	193	204	150
15	400	258	273	275	227
20	400	318	329	326	293
25	400	359	365	363	341
30	400	385	390	388	374
36	400	399	400	399	398
Нагрев насыпной садки, состоящей из конструктивных элементов в форме самонарезающихся шурупов длиной 50 мм , значение порозности $f=0,898$					
1	399	19,5	19,0	19,2	19,0
5	400	37,9	117	193	135
10	400	122	220	245	199
15	400	214	289	294	259
20	400	286	335	332	307
25	400	336	366	367	344
30	400	369	387	383	367

Время, мин	Температура в рабочем пространстве печи, °C	Показания термопары № 1, °C	Показания термопары № 2, °C	Показания термопары № 3, °C	Показания термопары № 4, °C
1	2	3	4	5	6
35	400	390	399	400	386
40	400	400	400	400	399
Нагрев насыпной садки, состоящей из конструктивных элементов в форме коротких цилиндров D=16 мм, значение порозности $f=0,454$					
1	400	18,2	17,6	17,8	18,0
5	400	18,6	18,6	18,1	18,3
10	400	237	108	28,4	22,7
15	400	294	191	43,4	36,0
20	400	333	247	65,2	58,1
25	400	350	285	92,7	86,3
30	400	357	311	123	118
35	400	367	332	157	154
40	400	376	349	190	191
45	400	387	363	224	227
50	400	392	373	255	260
55	400	395	383	283	289
60	400	399	391	307	314
65	400	399	398	329	336
70	400	400	399	346	354
75	400	400	399	362	370
80	400	400	400	374	382
88	400	400	400	391	398

Графическое отображение полученных результатов для каждого из типов исследуемых насыпных садок представлено на графиках 3.16 - 3.19.

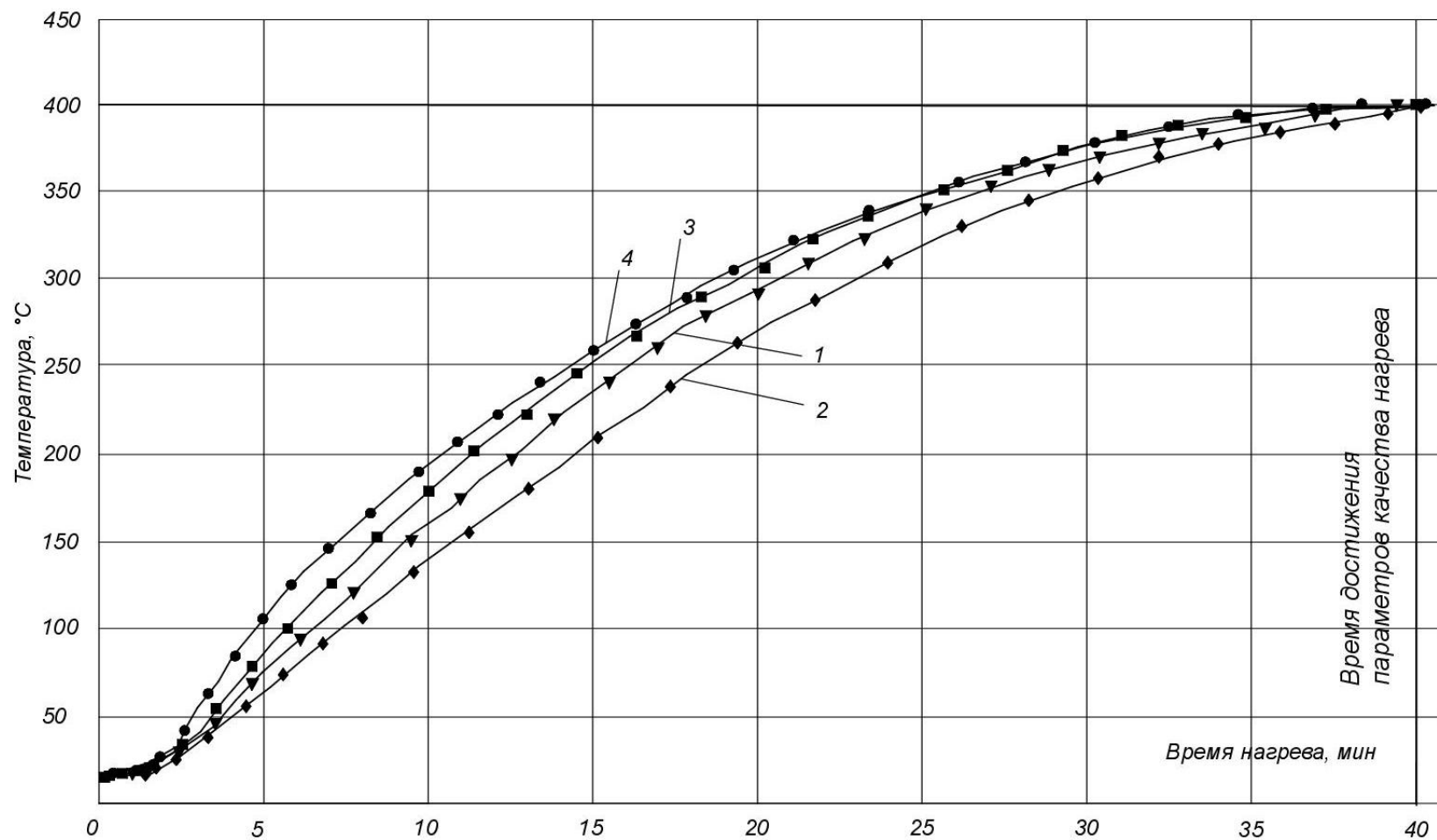


Рисунок 3.16. Значение температур насыпной садки (значение порозности $f=0,858$) показываемые термопарами: 1 - термопара № 1, 2 - термопара № 2, 3 - термопара № 3, 4 - термопара № 4, при нагреве до 400°C при расходе теплоносителя $0,0037 \text{ м}^3/\text{с}$

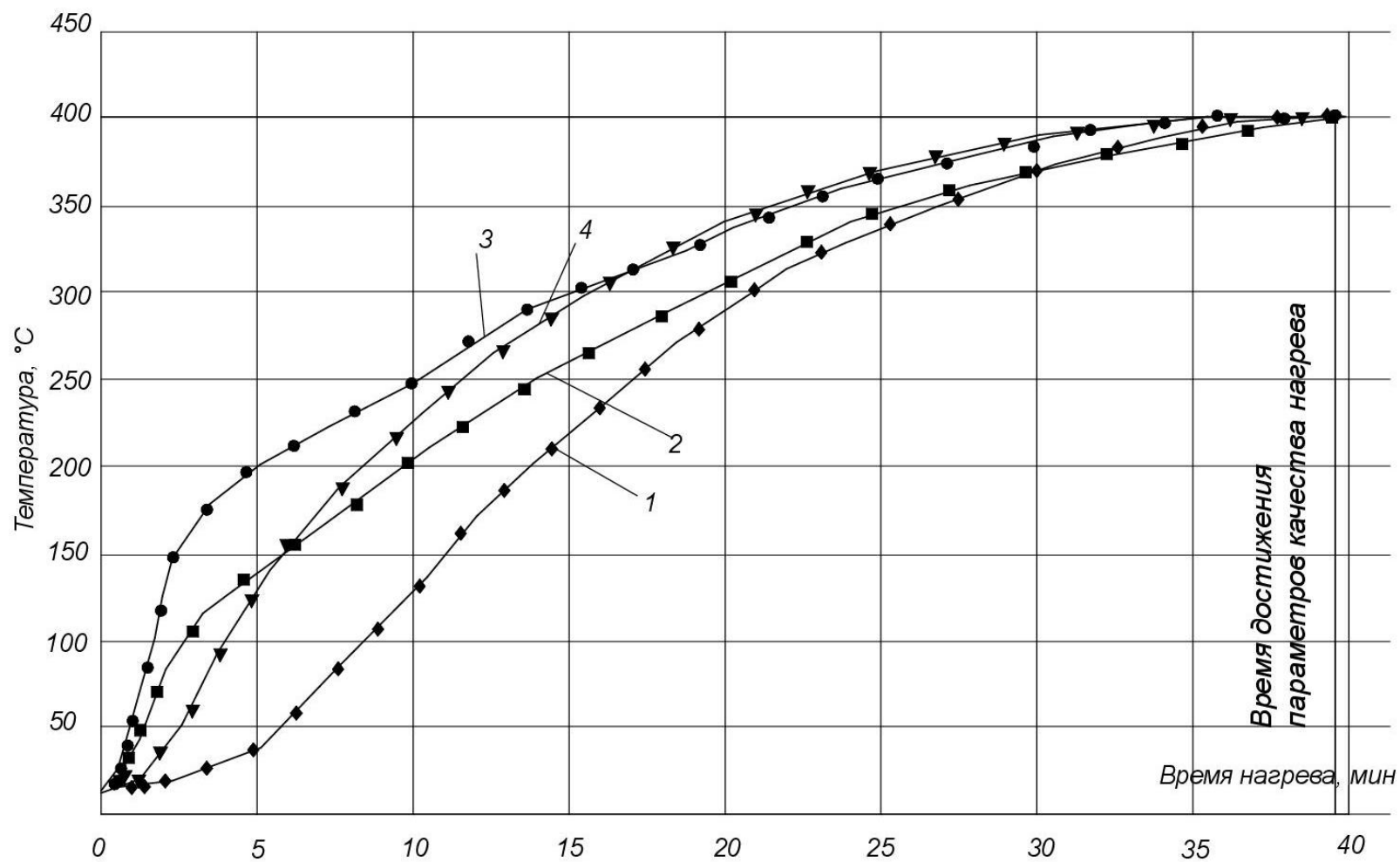


Рисунок 3.17. Значение температур насыпной садки (значение порозности $f=0,872$) показываемые термопарами: 1 - термопара № 1, 2 – термопара № 2, 3 - термопара № 3, 4 - термопара № 4, при нагреве до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ при расходе теплоносителя $0,0037\text{ м}^3/\text{с}$

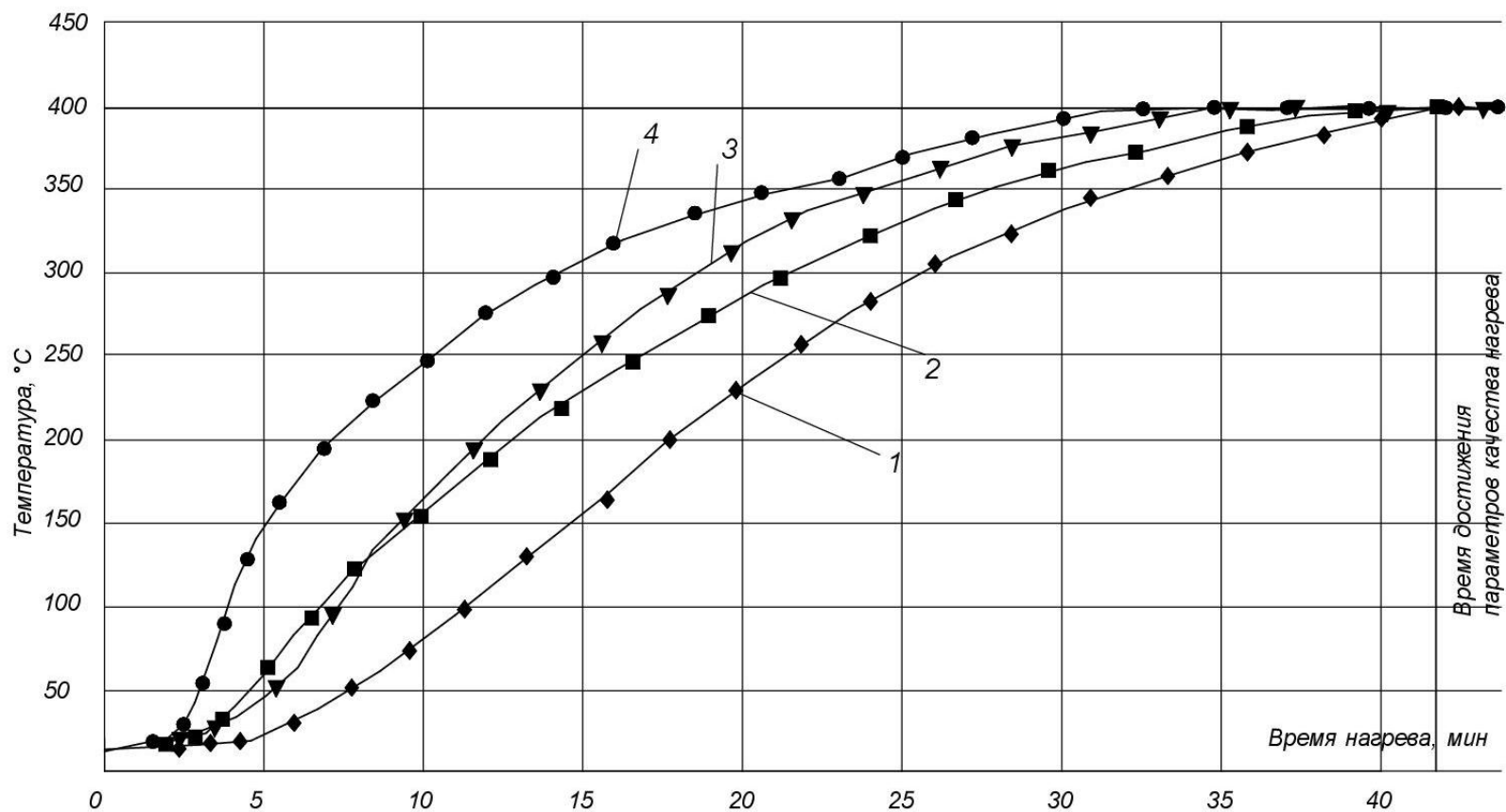


Рисунок 3.18. Значение температур насыпной садки (значение порозности $f=0,898$) показываемые термопарами: 1 - термопара № 1, 2 - термопара № 2, 3 - термопара № 3, 4 - термопара № 4, при нагреве до 400°C при расходе теплоносителя $0,0037 \text{ м}^3/\text{с}$

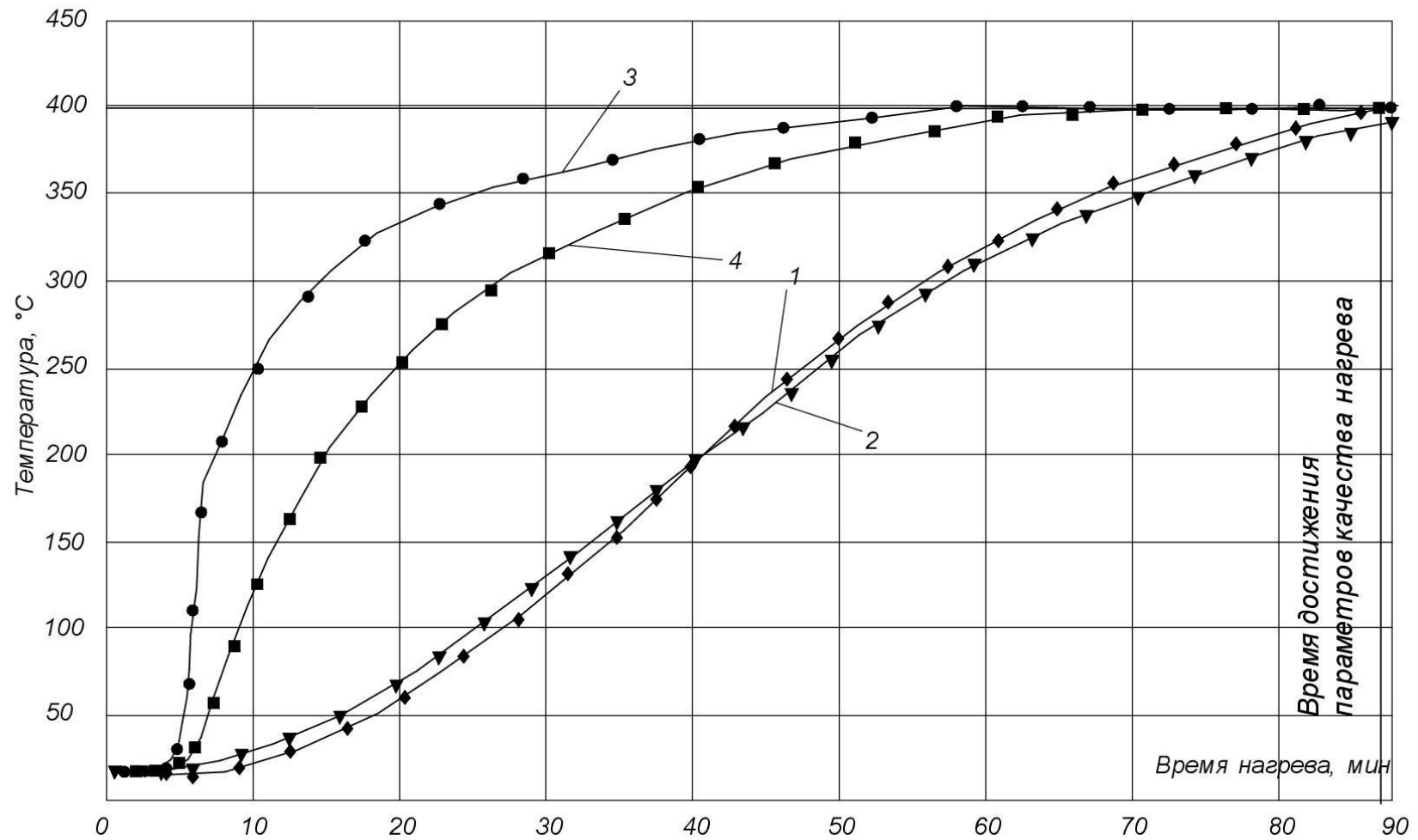


Рисунок 3.19. Значение температур насыпной садки (значение порозности $f=0,454$) показываемые термопарами: 1 - термопара № 1, 2 – термопара № 2, 3 - термопара № 3, 4 - термопара № 4, при нагреве до 400°C при расходе теплоносителя $0,0037 \text{ м}^3/\text{с}$

Таблица 3.6. Результаты эксперимента нагрева насыпных садок при втором режиме фильтрации

Время, мин	Температура печи, °C	Показания термопары № 1, °C	Показания термопары № 2, °C	Показания термопары № 3, °C	Показания термопары № 4, °C
1	2	3	4	5	6
Нагрев насыпной садки, состоящей из конструктивных элементов в форме колец D=22 мм, значение порозности $f=0,858$					
1	400	17,3	18,2	18,1	17,3
5	400,1	40,3	75	77,7	112,2
10	400	140,5	161,9	173,9	216,6
15	400,2	233,5	247,9	256,6	285,8
20	400,1	302,2	314,6	318,3	333,3
25	399,9	349,1	357,8	358,5	365
30	400	379,1	388,5	386,3	386,9
36	400,1	400	400	400	400,1
Нагрев насыпной садки, состоящей из конструктивных элементов в форме колец D=32 мм, значение порозности $f=0,872$					
1	400,1	17,6	17,1	18,2	отсутствует
5	400	35,9	89,3	187,6	
10	399,9	112,8	193,4	273,4	
15	399,9	201,2	268,4	321,3	
20	400	276,6	320	352,6	
25	400,1	329,7	356,5	381,4	
30	400	329,7	356,5	381,4	
35	400,2	389,3	395,8	399,8	
39	400,1	400	399,9	400	
Нагрев насыпной садки, состоящей из конструктивных элементов в форме самонарезающихся шурупов длиной 50 мм, значение порозности $f=0,898$					
1	400	19,3	19,3	19,6	отсутствует
5	400,1	112,6	83,3	143,1	
10	399,9	185,5	213,7	216,6	
15	400	253,9	285,2	276,1	
20	400	309,2	334,4	329,6	
25	400,1	345,3	365,9	360,5	
30	400,1	375,5	386,8	378,2	
35	400,2	388,4	399,8	399,9	
38	400	400	400	399,9	
Нагрев насыпной садки, состоящей из конструктивных элементов в форме коротких цилиндров D=16 мм, значение порозности $f=0,454$					
1	400,2	18,5	17,9	18,7	отсутствует
5	400,1	162,1	80,5	35,1	
10	400,2	214,2	155,2	69,6	
15	400,1	253	213,7	109,5	
20	400	285,4	254,3	146,5	
25	399,9	300,5	286,8	186,3	
30	400	322,2	315,6	228,1	
35	400,1	341,1	335,7	261,4	
40	400,1	357,8	352,6	291	
45	400	370,6	366	315,1	

Время, мин	Температура печи, °C	Показания термопары № 1, °C	Показания термопары № 2, °C	Показания термопары № 3, °C	Показания термопары № 4, °C
1	2	3	4	5	6
50	399,9	384,3	377,7	336	
55	400	397,7	387,9	353,5	
60	399,9	399,2	391,1	366,9	
65	400	400	399,9	378,5	
70	400	400	400	389,2	

Графическое отображение полученных результатов для каждого из типов исследуемых насыпных садок представлено на рисунках 3.20 – 3.23.

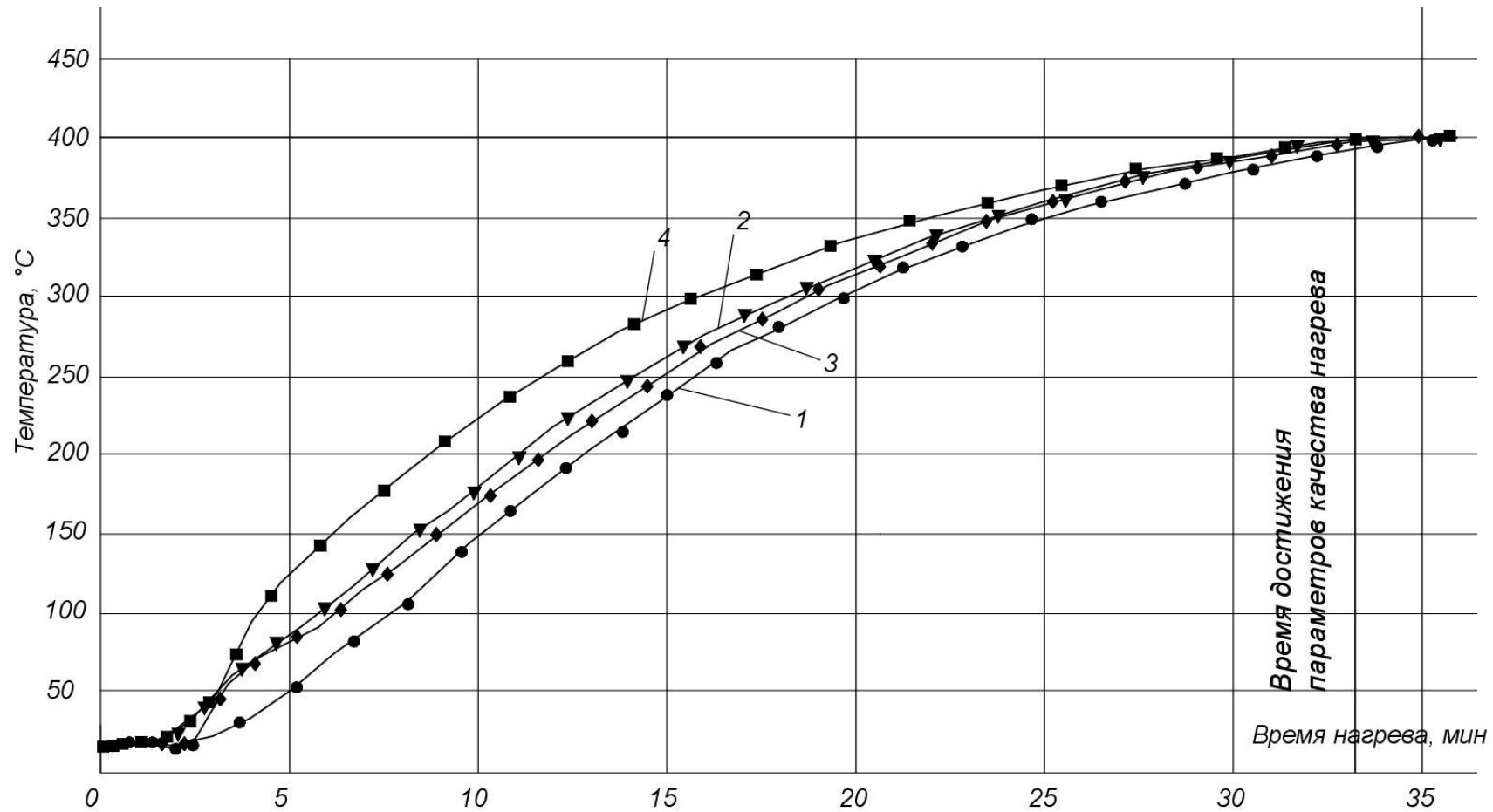


Рисунок 3.20. Значение температур насыпной садки (значение порозности $f=0,858$) показываемые термопарами: 1 - термопара № 1, 3 - термопара № 3, 4 - термопара № 4, при нагреве до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ при расходе теплоносителя $0,0092\text{ м}^3/\text{с}$

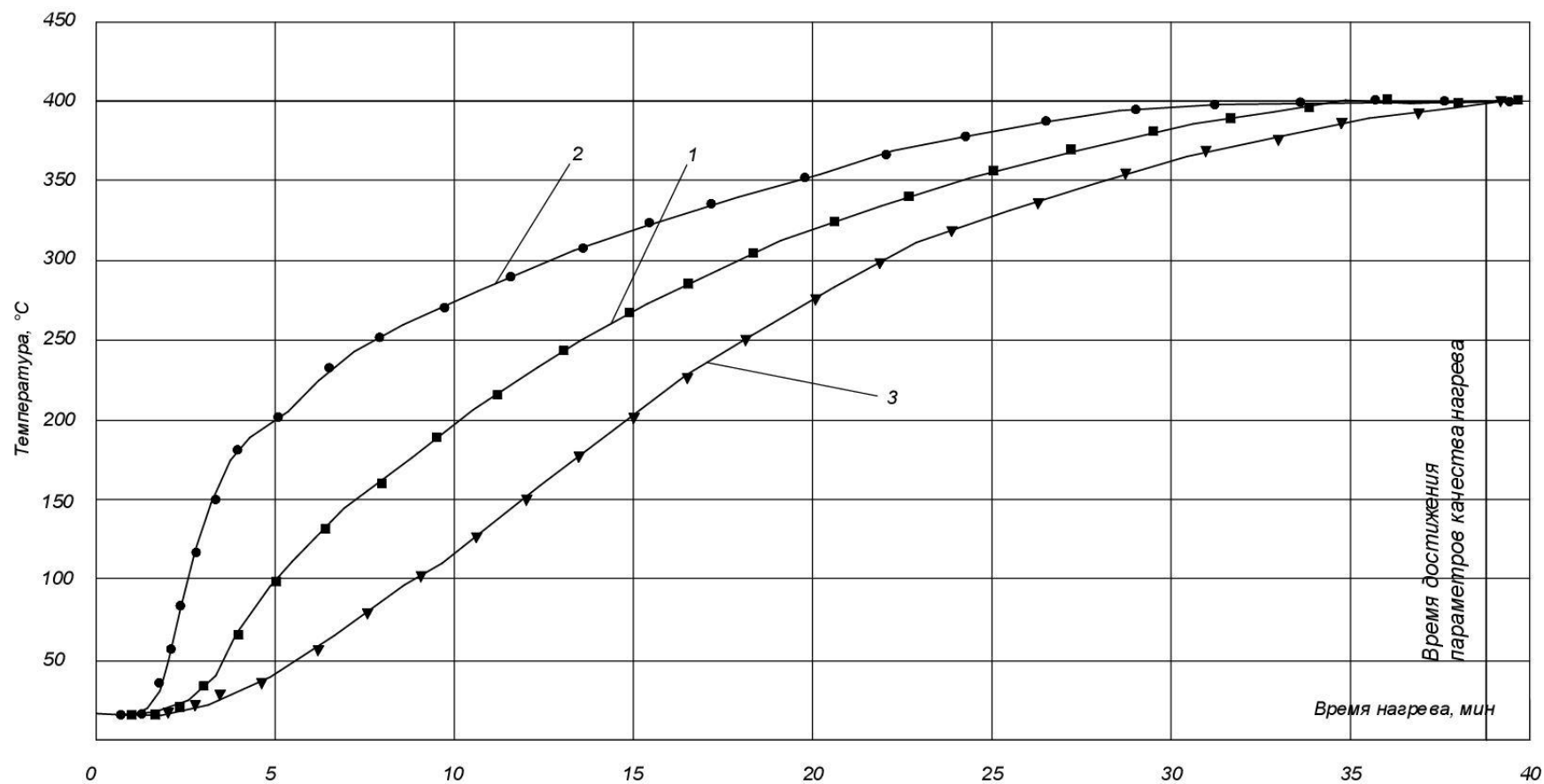


Рисунок 3.21. Значение температур насыпной садки (значение порозности $f=0,872$) показываемые термопарами: 1 - термопара № 1, 2 - термопара № 2, 3 - термопара № 3, 4 - термопара № 4, при нагреве до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ при расходе теплоносителя $0,0092\text{ м}^3/\text{с}$

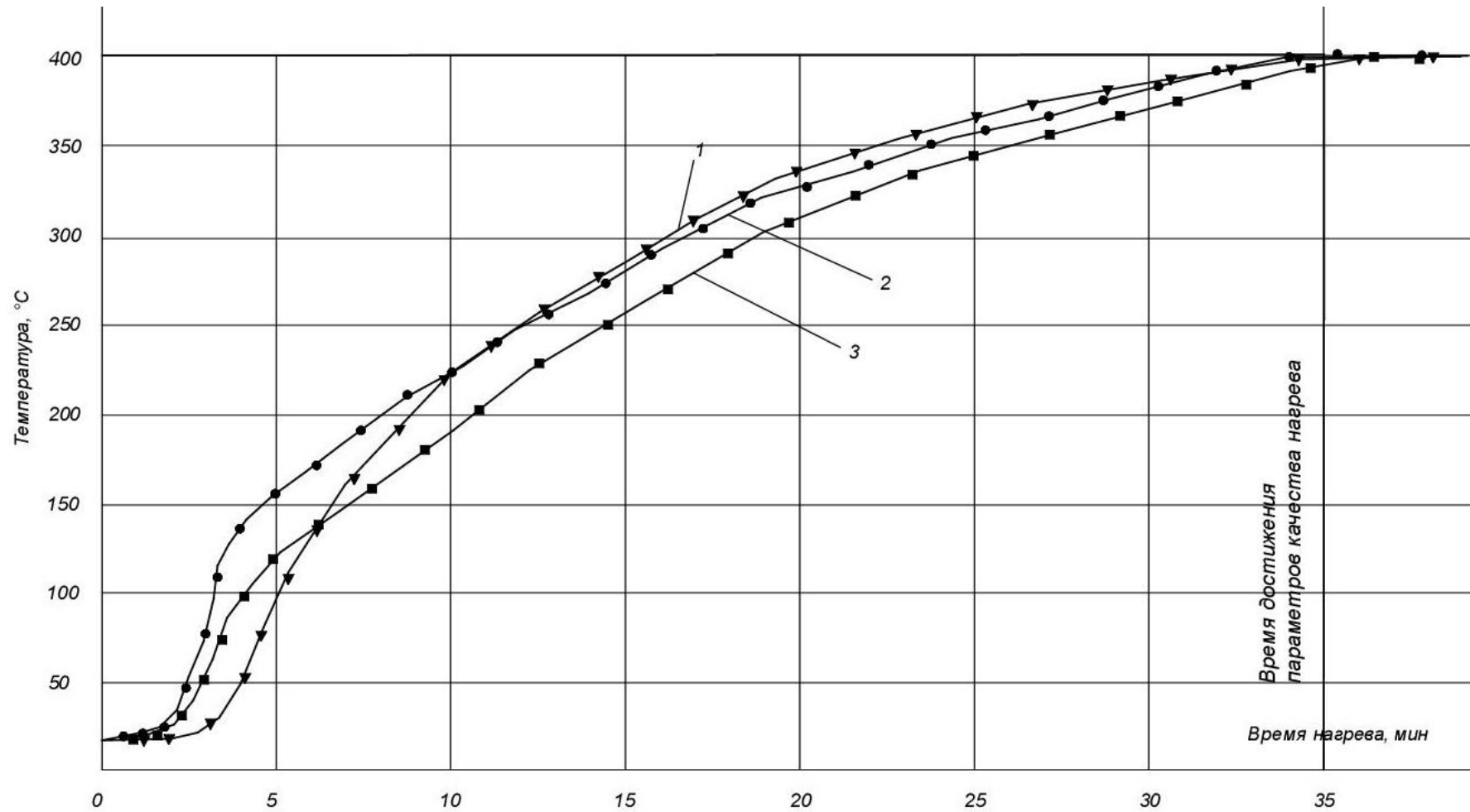


Рисунок 3.22. Значение температур насыпной садки (значение порозности $f=0,898$) показываемые термопарами: 1 - термопара № 1, 2 - термопара № 2, 3 - термопара № 3, при нагреве до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ при расходе теплоносителя $0,0092\text{ м}^3/\text{с}$

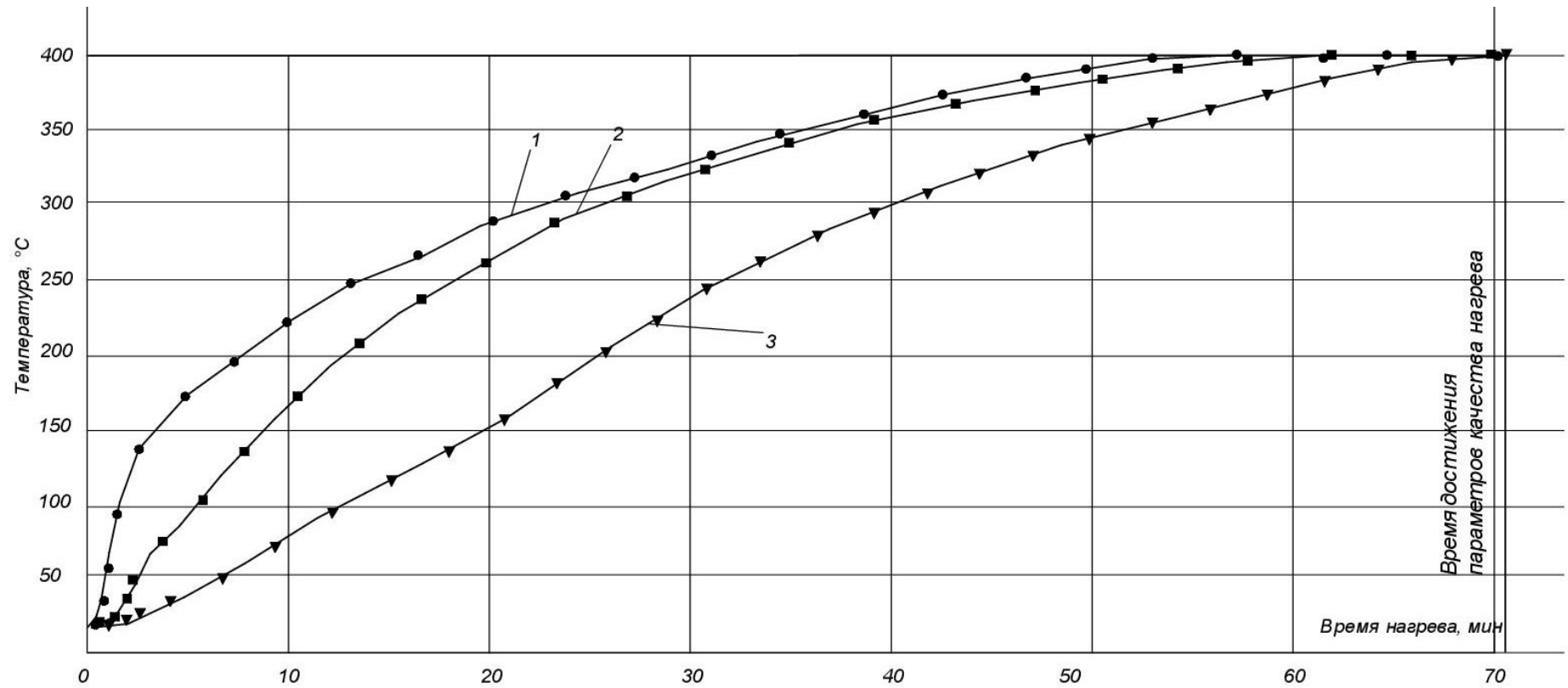


Рисунок 3.23. Значение температур насыпной садки (значение порозности $f=0,454$) показываемые термопарами: 1 - термопара № 1, 2 - термопара № 2, 3 - термопара № 3, при нагреве до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ при расходе теплоносителя $0,0092\text{ м}^3/\text{с}$

Анализ графиков показывает, что время нагрева насыпной садки при наличии фильтрации теплоносителя уменьшается, одновременно увеличивается скорость нагрева, а также уменьшается температурный перепад между поверхностью и тепловым центром.

По результатам экспериментального исследования был построен график (рисунок 3.24), зависимости времени, требуемого для нагрева насыпных садок до параметров качества от расхода теплоносителя при различных величинах порозности.

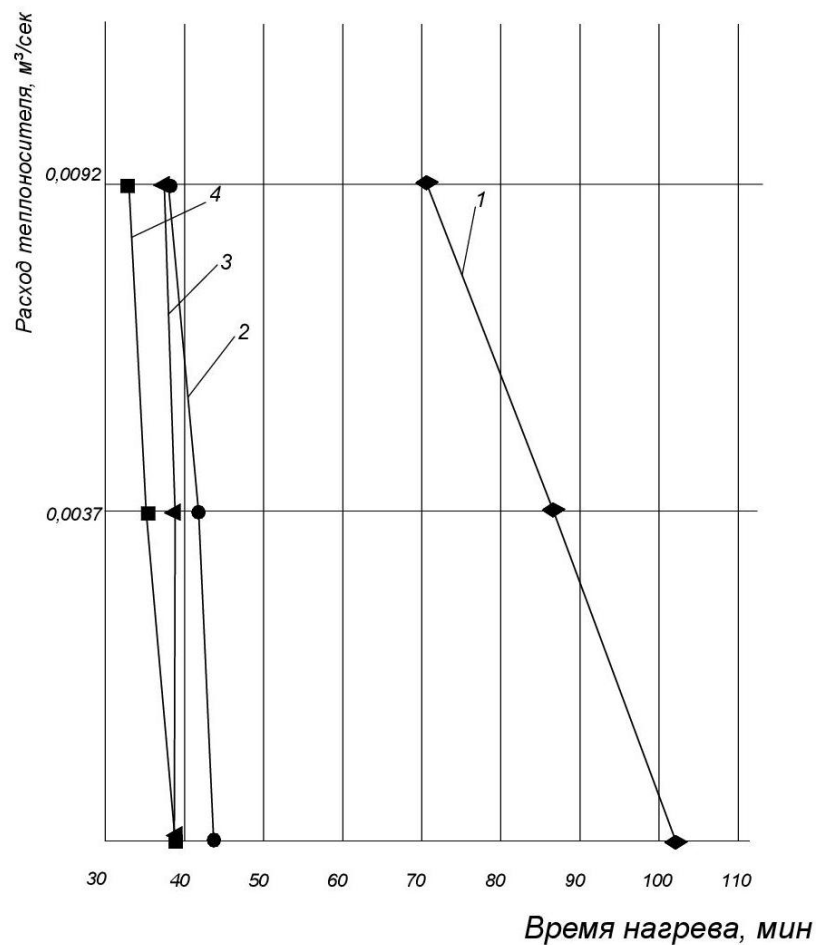


Рисунок 3.24. Зависимость времени нагрева от расхода теплоносителя при величине порозности: 1 - $f=0,454$, 2 - $f=0,858$, 3 - $f=0,898$, 4 - $f=0,872$

На графике видно увеличение интенсивности нагрева насыпной садки. Самый длительный процесс нагрева - нагрев цилиндров ($f=0,454$) - уменьшился на 16 минут на первом режиме фильтрации и на 33 минуты при втором режиме, самонарезающихся шурупов ($f=0,848$) - на 1 минуту, колец диаметром 32 мм

($f=0,872$) - на 6 минут, что свидетельствует об уменьшении затрат энергии на нагрев садок с меньшей величиной порозности.

Определение погрешности эксперимента

Погрешность эксперимента состоит из следующих составляющих:

- погрешности определения температуры,
- погрешность определения массы садки,
- погрешность определения расхода воздуха при фильтрации.

Погрешность определения массы садки определяются методической погрешностью [78] $\delta_{мет}=5\%$ и погрешностью весов, значение основной погрешности которых $\delta_{вес}=0,1\%$. Дополнительная погрешность $\delta_{дон}$ при определении массы садки не возникает.

Основная относительная погрешность определения массы δ_M составит

$$\delta_M = \pm 0,1\%$$

Величина предельной относительной погрешности определения массы садки определяется как:

$$\delta_{IP.M} = \pm(\delta_M + \delta_{дон} + \delta_{мет}) = \pm(0,1+5) = \pm 5,1\%$$

Погрешность определения температуры состоит из погрешности термопары ТХК, погрешности МВА - 7. Погрешность термопары составляет $\delta_{тхк}=0,5\%$. Основная погрешность модуля МВА-7 составляет $\delta_{МВА-8}=0,05\%$.

Основная относительная погрешность определения температуры δ_T составит

$$\delta_T = \pm\sqrt{(\delta_{тхк})^2 + (\delta_{МВА-8})^2} = \pm\sqrt{0,5^2 + 0,05^2} = \pm 0,503\%$$

При измерении температуры насыпной садки возникает методическая погрешность $\delta_{мет}=5\%$ [78]. Дополнительная погрешность не возникает, т.к. измерения производятся в нормальных условиях.

Величина предельной относительной погрешности определения температуры садки определяется как:

$$\delta_{IP.T} = \pm(\delta_T + \delta_{дон} + \delta_{мет}) = \pm(0,503+5) = \pm 5,503\%$$

Суммарная погрешность эксперимента при отсутствии фильтрации составляет:

$$\delta_9^{\phi} = \pm\sqrt{(\delta_{IP.M})^2 + (\delta_{IP.T})^2} = \pm\sqrt{5,503^2 + 5,1^2} = \pm 7,502\%$$

При наличии фильтрации теплоносителя возникает погрешность измерения скорости фильтрации. Погрешность измерения расхода фильтрующегося агента состоит из погрешности анемометра Testo и погрешности измерения секундомера.

Погрешность анемометра Testo составляет

$$\delta_{PACX} = \pm 1,5\%$$

Погрешность измерения секундомера составляет

$$\delta_{CEK} = \pm 0,1\%$$

Основная относительная погрешность определения расхода воздуха определяется как

$$\delta_P = \pm\sqrt{(\delta_{PACX})^2 + (\delta_{CEK})^2} = \pm\sqrt{1,5^2 + 0,1^2} = \pm 1,5\%$$

При измерении расхода воздуха на фильтрацию через насыпную садку возникает методическая погрешность $\delta_{мет}=5\%$ [78]. Дополнительная погрешность не возникает, т.к. измерения производятся в нормальных условиях.

Предельная относительная погрешность при определении расхода воздуха при фильтрации равна:

$$\delta_{IP.P} = \pm(\delta_P + \delta_{доп} + \delta_{мет}) = \pm(1,5 + 5) = \pm 6,5\%$$

Суммарная погрешность эксперимента при наличии фильтрации составляет:

$$\delta_9^{\phi} = \pm\sqrt{(\delta_{IP.M})^2 + (\delta_{IP.T})^2 + (\delta_{IP.P})^2} = \pm\sqrt{5,503^2 + 5,1^2 + 6,5^2} = 9,93 \pm \%$$

3.2. Экспериментальное исследование гидродинамического сопротивления насыпной садки

При различном значении величины порозности садки имеют разное гидродинамическое сопротивление для потока газа. Для определения зависимости гидродинамического сопротивления садок от величины порозности и скорости фильтрации насыпных садок состоящих из заданных элементов при различных режимах необходимо проведение лабораторного исследования.

Наиболее общим уравнением, описывающим фильтрацию флюида через пористую структуру, является дифференциальная форма закона Дарси,

описывающая процесс фильтрации жидкостей и газов в пористой среде. Имеются доказательства решения этого уравнения для пористых тел с периодической микроструктурой, полученные Л. Е. Леонтьевым [41], а также Н. С. Бахваловым [4], а для среды со случайной микроструктурой - А.Ю. Беляевым [8].

Так, например, Хейлигенштедт [76] приводит формулу для расчета потери давления в слое материалов, состоящего из зерен:

$$h_{ном} = n \cdot \rho \cdot w^{1,9}, \quad (3.3)$$

где ρ - плотность среды, $кг/м^3$; w - скорость среды, $м/с$; n - константа для зерен размером: 60 ± 10 мм - $n = 11$, 45 ± 5 мм - $n = 14 \div 18$, 35 ± 5 мм - $n = 28$, 25 ± 5 мм - $n = 55$.

Н. Н. Жаворонков [33] для сопротивления слоя кусковых материалов предлагает следующую формулу

$$h_{ном} = \frac{7,6 \cdot \rho \cdot w^{0,8} \cdot v^{0,2} \cdot H}{g \cdot d_{гидр} \cdot f^{1,8}}, \quad (3.4)$$

где H - высота насыпного слоя, $м$; w - скорость среды, отнесенная к полному сечению канала, $м/с$; $d_{гидр}$ - гидравлический диаметр канала, $м$; f - значение порозности слоя.

Гидравлический диаметр канала определяется по формуле

$$d_{гидр} = \frac{2}{3} \cdot d_{экв} \frac{f}{1-f}. \quad (3.5)$$

Широкое распространение при расчете сопротивления слоя получила формула, аналогичная формуле потери напора на трение [31]:

$$h_{ном} = \xi \cdot \frac{\rho \cdot \omega}{2 \cdot g} \cdot \frac{H}{d_{экв}}, \quad (3.6)$$

где ξ - коэффициент сопротивления, определяемый по номограмме, в зависимости от $Re_{усл}$ для различных типов засыпаемых материалов; ω - условная скорость движения, отнесенная к полному сечению канала, $м/с$; $d_{экв}$ - средневзвешенный размер куска, $м$; H - высота насыпного слоя, $м$; g - ускорение свободного падения, $м/с^2$.

Уравнение фильтрации с предельным градиентом в анизотропных средах приводят в своей работе Н. М. Дмитриев, М. Т. Мамедов [19]. В ней решается система уравнений фильтрационных течений с предельным градиентом в векторном виде.

Имеющиеся приближенные формулы могут быть использованы только в случаях, близких к проведенным опытам. Применительно к настоящей работе использование одной из приведенных выше формул будет некорректно, так как исследуемые насыпные садки состоят из 4 различных типов элементов, которые отличаются от рассматриваемых учеными [4, 8, 31, 33, 41, 65] компонок. Поэтому необходимо экспериментально определить гидродинамическое сопротивление насыпных садков.

3.2.1 Описание лабораторной установки

На базе исследовательской лаборатории кафедры «Энергетика теплотехнологий и газоснабжение» было проведено исследование влияния величины порозности садки на ее гидродинамическое сопротивление.

В качестве исследуемых были выбраны 4 типа насыпных садков с различным значением порозности. Описание насыпных садков приведено в разделе 3.1.

На рисунке 3.25 приведена схема лабораторной установки.

В контейнер 8 засыпалась садка, сформированная из элементов одного типа. Засыпка садки в контейнер производилась произвольно, специальная компоновка элементов садки не рассматривалась, предполагалось, что все конструктивные элементы, входящие в состав садки располагаются в контейнере равномерно. Перед засыпкой в контейнер, определялся вес и состав насыпной садки, и далее, исходя из занимаемого объема, а также объема засыпаемых элементов определялась величина порозности исследуемого слоя. На рисунке 3.25 показана схема экспериментальной установки.

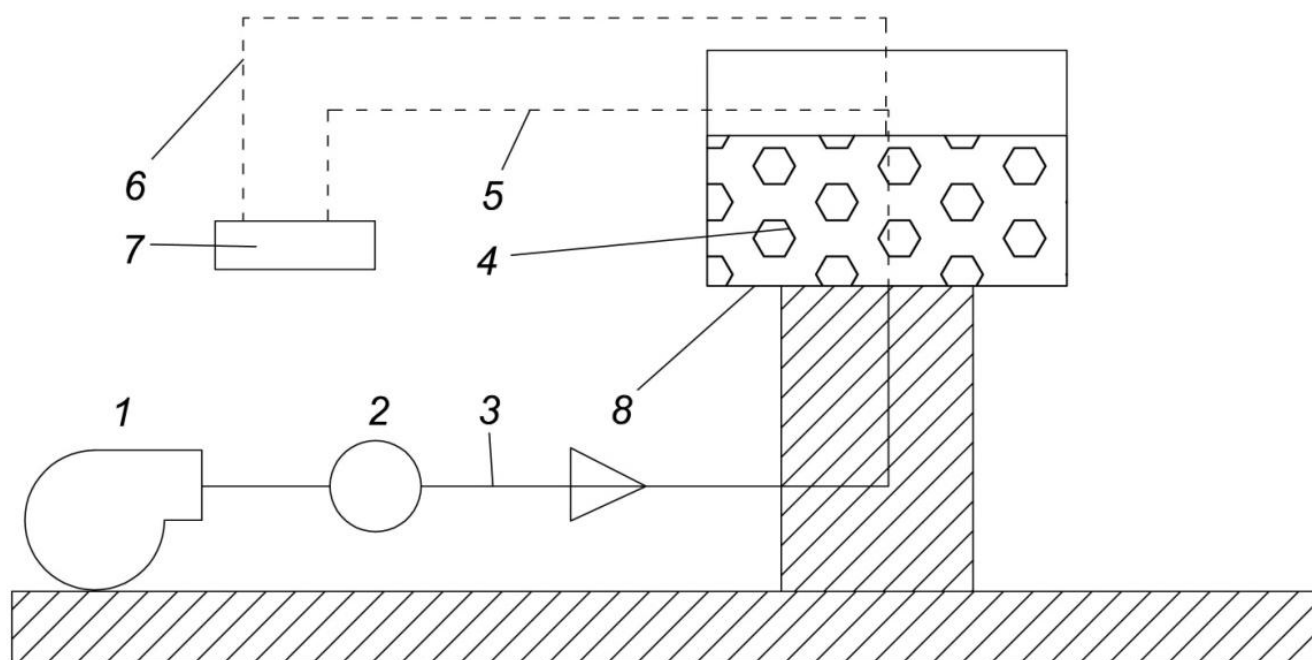


Рисунок 3.25. Схема экспериментальной установки: 1 - дутьевой вентилятор, 2 - цифровой дифманометр ДМЦ 01М, 3 - воздуховод; 4 - насыпная садка, 5 - трубка для измерения давления на входе в контейнер, 6 - трубка для измерения давления на выходе из контейнера, 7 - аналоговый модуль МВА-4, 8 – контейнер

Для определения сопротивления проводилось 4 экспериментальных исследования с элементами 4-х типов.

Перед подачей воздуха в контейнер (8) засыпалась садка, сформированная из элементов, описанных ранее. Процесс исследования был поделен на четыре этапа. В процессе каждого этапа экспериментального исследования производился отбор элементов, засыпка в контейнер, подача воздуха, измерение полученных параметров. На каждом последующем этапе производилась засыпка новых элементов и исследование повторялось. На первом этапе засыпались элементы первого типа – кольца с $d=32$ мм, величины порозности садки, сформированной этими элементами, формировалась в диапазоне 0,843 - 0,836. На втором - засыпались элементы второго типа кольца с $d=22$ мм, величина порозности садки, сформированной этими элементами, составляла 0,773. В третий этап производилась засыпка элементов третьего типа - короткие цилиндры, величина порозности садки сформированной этими элементами формировалась в диапазоне 0,345 - 0,485. На четвертом этапе садка формировалась из элементов четвертого типа -

самонарезающихся шурупов, величина порозности сформированной садки формировалась в диапазоне 0,881 - 0,888. Засыпка садки в контейнер производилась хаотично, специальная компоновка элементов садки не рассматривалась, предполагалось, что все конструктивные элементы, входящие в состав садки располагаются в контейнере равномерно, заполняя весь рабочий объем в контейнере. Для простоты определения поверхности пор предполагается, что каждый элемент садки имеет одну точку контакта с соседним элементом, что следует из предположения о равномерном распределении элементов, формирующих насыпную садку. Перед засыпкой в контейнер, определялся вес и состав насыпной садки, и далее, исходя из занимаемого объема, а также объема засыпаемых элементов определялась величина порозности исследуемого слоя по формуле 3.1.

В ходе эксперимента по воздуховоду (3), выполненному из гладкой пластиковой трубы, с помощью дутьевого вентилятора (1) подается с заданной скоростью воздух для фильтрации через слой насыпной садки. Регулирование диапазона скорости дутья изменялось в пределах от 2 до 8 м/с. Сопротивлением воздуховода в ходе проведения эксперимента было решено пренебречь, так как оно практически не влияло на значение скорости дутья. Измерения скорости воздушного потока производилось при помощи зонда, помещенного, ориентировано на центр воздушного потока, в специальное отверстие, сигнал с зонда передавался и обрабатывался на дифманометре ДМЦ-01М (2). Сопротивление потока воздуха в пристеночном слое не учитывалось. Величина падения давления находилась в виде разницы показаний давления на входе в камеру и на выходе из слоя.

3.2.2. Результаты экспериментальных исследований

Целью эксперимента являлось определение гидродинамического сопротивления насыпной садки при исследуемых величинах порозности. В таблице 3.7 приведены результаты исследования.

Таблица 3.7. Результаты исследования величины перепада давления, для садки высотой слоя 250 мм

№	Тип изделий, формирующих насыпную садку	Величина порозности	Скорость потока, м/с	Перепад давления на входе и выходе, Па
1	2	3	4	5
1	Садка четвертого типа - самонарезающиеся шурупы длиной 50 мм	0,881	8,0	39,23
			7,0	29,42
			5,0	19,61
		0,888	6,0	49,04
			4,0	39,22
			2,0	9,81
2	Садка третьего типа - короткие цилиндры, диаметром 16 мм	0,485	4,8	127,4
			3,7	78,45
			3,0	58,84
			2,1	39,23
		0,345	4,5	254,9
			3,0	137,3
			2,4	107,9
			1,9	49,04
3	Садка второго типа - кольца наружный диаметр 22 мм	0,773	5,8	166,7
			4,3	102,9
			3,4	68,65
			2,3	49,03
4	Садка первого типа - кольца наружный диаметр 32 мм	0,836	7,0	107,9
			5,0	78,45
			4,8	63,74
			3,3	39,23
		0,846	5,0	49,04
			3,5	34,32
			2,0	19,61

Графическое отображение полученных результатов для каждого из типов исследуемых насыпных садок представлено на рисунке 3.26.

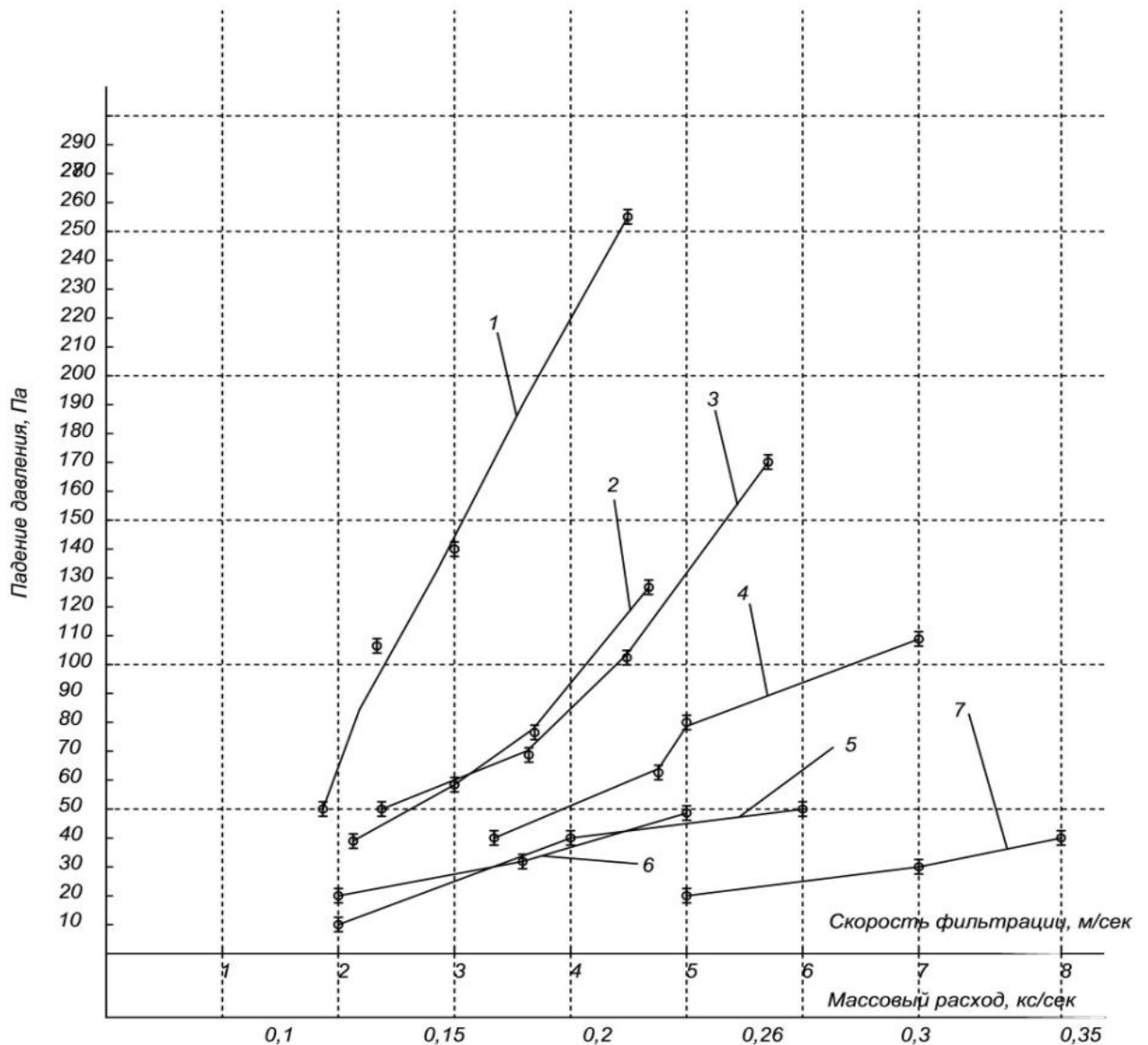


Рисунок 3.26. Величина перепада давления на входе и выходе из насыпной садки, слоя высотой 250 мм, с величиной порозности f : 1 - $f=0,345$, 2 - $f=0,485$, 3 - $f=0,733$, 4 - $f=0,836$, 5 - $f=0,888$, 6 - $f=0,846$, 7 - $f=0,881$

Из графиков видно, что чем выше значение порозности, тем меньше падение давления в насыпной садке, и, соответственно, чем выше насыпная плотность, тем выше сопротивление садки. Это можно объяснить уменьшением сечения каналов пор, что соответственно увеличивает местные сопротивления.

На основе экспериментальных данных в программном комплексе CurveExpert Professional была аппроксимирована зависимость $\Delta P=f(G, f)$ с погрешностью не более 5 %, где массовый расход G изменялся в пределах 0,1 - 0,3 кг/с, а величина порозности f в диапазоне 0,345 до 0,888. Коэффициент корреляции данной модели

близок к 1 и составляет 0,96, что говорит о возможности применения данного уравнения при расчете гидродинамического сопротивления насыпных садок.

Полученная зависимость имеет следующий вид:

$$\Delta P(G, f) = a_1 + a_2 \cdot G + a_3 \cdot f + a_4 \cdot G^2 + a_5 \cdot f^2 + a_6 \cdot G \cdot f, \quad (3.7)$$

где $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ - эмпирические коэффициенты; f - значение порозности; G - массовый расход, кг/сек.

Значения эмпирических коэффициентов представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8. Значения эмпирических коэффициентов

№ п/п	Коэффициент	Значение
1	a_1	-69,8
2	a_2	-142
3	a_3	113
4	a_4	227
5	a_5	-1,75
6	a_6	-102

Графическая интерпретация зависимости величины сопротивления насыпной садки $\Delta P=f(G, f)$ представлена на рисунке 3.27.

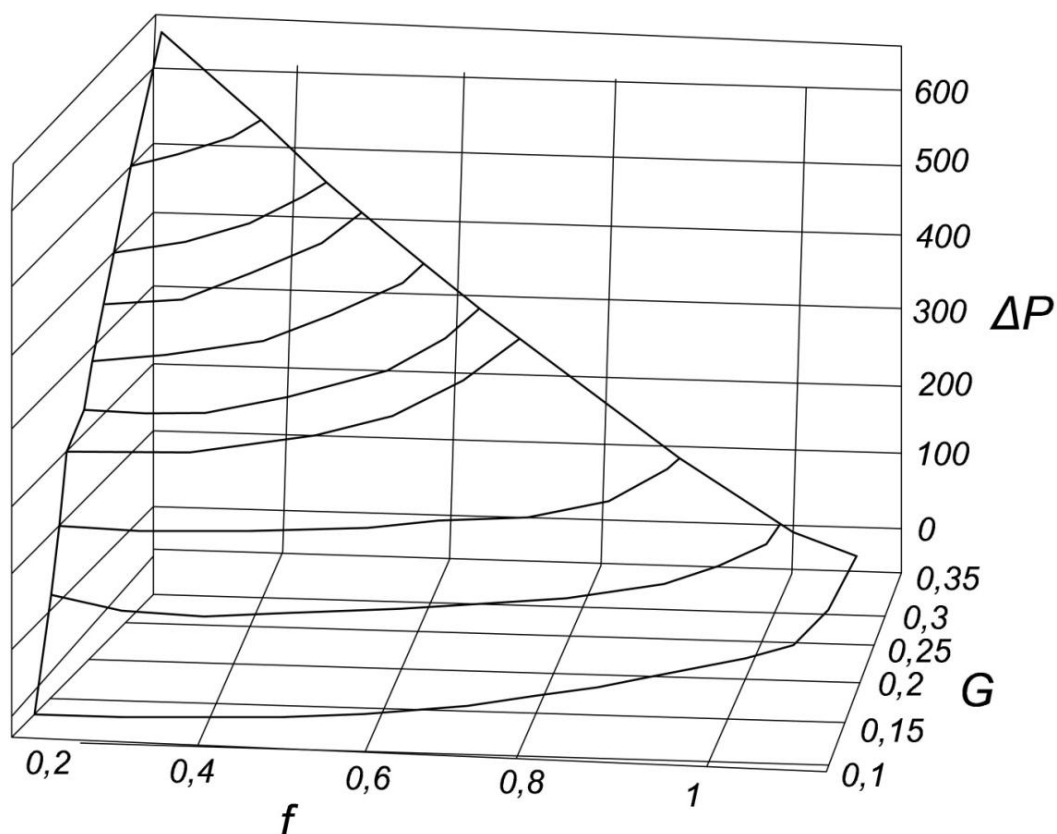


Рисунок 3.27. Зависимость сопротивления садки $\Delta P=f(G, f)$

Определение погрешности эксперимента

Погрешность эксперимента состоит из следующих составляющих:

- погрешности определения расхода воздуха на фильтрацию,
- погрешность определения массы садки,
- погрешность определения давления воздуха.

Погрешность определения массы садки определяются методической погрешностью [78] $\delta_{мет}=5\%$ и погрешностью весов, значение основной погрешности которых $\delta_{вес}=0,1\%$. Дополнительная погрешность $\delta_{дон}$ при определении массы садки не возникает.

Основная относительная погрешность определения массы δ_M составит

$$\delta_M = \pm 0,1\%$$

Величина предельной относительной погрешности определения массы садки определяется как:

$$\delta_{ПР.М} = \pm(\delta_M + \delta_{дон} + \delta_{мет}) = \pm(0,1+5) = \pm 5,1\%$$

Погрешность измерения расхода фильтрующегося агента состоит из погрешности дифманометра ДМЦ-01М и погрешности измерения зонда.

Погрешность дифманометра ДМЦ-01М составляет

$$\delta_{\text{ДМЦ-01М}}=1,5\%.$$

Погрешность измерения зонда составляет

$$\delta_{\text{зонд}} = \pm 0,1\%$$

Основная относительная погрешность определения расхода воздуха определяется как

$$\delta_p = \pm \sqrt{(\delta_{\text{РАСХ}})^2 + (\delta_{\text{СЕК}})^2} = \pm \sqrt{1,5^2 + 0,1^2} = \pm 1,503\%$$

При измерении расхода воздуха на фильтрацию через насыпную садку возникает методическая погрешность $\delta_{\text{мет}}=5\%$ [78]. Дополнительная погрешность не возникает, т.к. измерения производятся в нормальных условиях.

Предельная относительная погрешность при определении расхода воздуха при фильтрации равна:

$$\delta_{\text{ПР.Р}} = \pm(\delta_p + \delta_{\text{дон}} + \delta_{\text{мет}}) = \pm(1,503 + 5) = \pm 6,5\%$$

Погрешность определения давления состоит из погрешности измеряющих трубок, погрешности МВА-8. Погрешность трубок составляет $\delta_{\text{тр}}=0,5\%$. Основная погрешность модуля МВА-8 составляет $\delta_{\text{МВА-8}}=0,05\%$.

Основная относительная погрешность определения давления воздуха δ_D составит

$$\delta_D = \pm \sqrt{(\delta_{\text{тр}})^2 + (\delta_{\text{МВА-8}})^2} = \pm \sqrt{0,5^2 + 0,05^2} = \pm 0,502\%$$

При измерении давления воздуха возникает методическая погрешность $\delta_{\text{мет}}=5\%$ [78]. Дополнительная погрешность не возникает, т.к. измерения производятся в нормальных условиях.

Величина предельной относительной погрешности определения давления воздуха определяется как:

$$\delta_{\text{ПР.Д}} = \pm(\delta_D + \delta_{\text{дон}} + \delta_{\text{мет}}) = \pm(0,502 + 5) = \pm 5,502\% .$$

Суммарная погрешность эксперимента составляет:

$$\delta_s^{\text{сф}} = \pm \sqrt{(\delta_{\text{ПР.М}})^2 + (\delta_{\text{ПР.Р}})^2 + (\delta_{\text{ПР.Д}})^2} = \pm \sqrt{5,1^2 + 6,5^2 + 5,502^2} = \pm 9,93\% .$$

3.3. Выводы по третьей главе

1. Была проведена серия опытов по нагреву насыпных садок, сформированных из 4-х типов конструктивных элементов, при наличии фильтрации теплоносителя через садку и без фильтрации.

2. Получены результаты значений температур в заданных точках при экспериментальном исследовании процесса нагрева насыпных садок, с различной величиной порозности, сформированных конструктивными элементами при 2-х режимах нагрева с фильтрацией и без фильтрации теплоносителя. Максимальное значение погрешность экспериментального исследования без фильтрации не превысила значение 7,5 %; Для исследования при наличии фильтрации теплоносителя через садку погрешность менее 9,9 %.

3. Экспериментально определено влияние значения скорости фильтрации теплоносителя в диапазоне от 2 до 8 м/с (при расходе, изменяющемся в пределах от 0,1 - 0,3 кг/с) на время нагрева насыпных садок в зависимости от величины порозности. Максимальное значение погрешности проведенных опытов не превышает 9,9 %.

4. Получено регрессионное уравнение по определению величины падения давления в насыпных садах от расхода газового теплоносителя на фильтрацию и величины порозности. При этом величина порозности изменялась от 0,345 до 0,888, а расход теплоносителя через насыпную садку варьировался в пределах 0,10 - 0,35 кг/с, что соответствовало скорости фильтрации от 2 до 8 м/с.

Материалы третьей главы опубликованы в работах автора [47, 49, 53].

ГЛАВА 4. ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА НАГРЕВА НАСЫПНОЙ САДКИ

Для подтверждения предложенной методики замены насыпной садки, состоящей из хаотически расположенных деталей, на фрактальную структуру при процессе моделирования ее нагрева, а также процесса фильтрации теплоносителя было проведено сравнение с результатами, полученными другими учеными [17, 36] и данными, полученными в ходе экспериментального исследования.

4.1. Верификация процесса стационарного теплообмена геометрической фрактальной модели насыпной садки при отсутствии фильтрации

Общая постановка задачи описания тепло- и массообмена геометрической фрактальной модели насыпной садки

В работе [17] постановка задачи описана следующими уравнениями:

При расчете составляющей теплообмена для твердого скелета используется дифференциальное уравнение Фурье-Киргофа:

$$c_3(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda_{\text{эф}}(T) \nabla T) - w(T, p) \cdot c_2(T) \nabla T \quad . \quad (4.1)$$

Поле давлений и скоростей определяется решением системы уравнений неразрывности и Навье-Стокса:

$$\frac{\partial \rho_2(T, p)}{\partial \tau} + \nabla \rho_2(T, p) \cdot w(T, p) = 0 \quad , \quad (4.2)$$

$$\rho_2(T, p) \cdot g - \nabla p + \mu \nabla^2 \cdot w(T, p) = 0 \quad , \quad (4.3)$$

где c_3 – эффективная удельная теплоемкость, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$; c_2 – удельная теплоемкость

газа, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$; $\lambda_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент теплопроводности, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$,

g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; w – скорость (x, y, z, τ) фильтрации среды, $\text{м}/\text{с}$; ρ – плотность среды, $\text{кг}/\text{м}^3$, p – поле давлений внутри пористой среды, Па , μ – коэффициент динамической вязкости среды, $\text{Па} \cdot \text{с}$.

При записи уравнений были приняты следующие допущения:

- твердый скелет насыпной садки неподвижен в пространстве;

- насыпная садка образована заготовками, хаотично располагающимися в пространстве. Величина порозности не зависит от способа укладки заготовок.

Верификация процесса стационарного теплообмена геометрической фрактальной модели насыпной садки

В работе [17] задаются следующие граничные и начальные условия для моделирования процесса нагрева насыпной садки.

Схематичное отображение граничных условий, направление стока тепла при численном моделировании процесса нагрева в системе координат XYZ представлено на рисунке 4.1, где отмечены: характерная точка поверхности нагрева $T_{нов}$, точка, характеризующая тепловой центр $T_{ц}$.

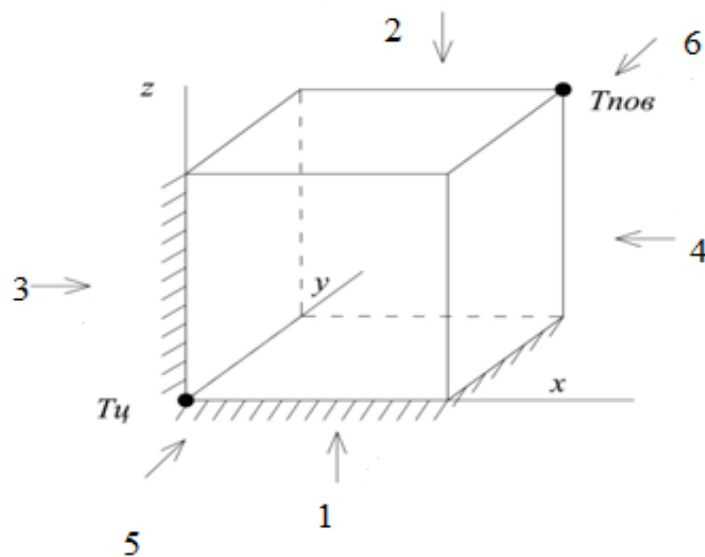


Рисунок 4.1. Условная схема процесса нагрева

Начальные условия при расчете составляющей теплообмена:

$$T_0(x, y, z, 0) = 293K$$

Граничные условия при расчете теплообмена:

$$1. \quad q(x, y, 0, \tau) = 0 \quad 0 \leq x \leq 0,25 \quad 0 \leq y \leq 0,1 \quad 0 \leq \tau \leq \tau_k$$

2. $q(x, y, 0, 1, \tau) = \alpha_{np} \cdot (T_{nos} - T_{cp}) \quad 0 \leq x \leq 0,25 \quad 0 \leq y \leq 0,1 \quad 0 \leq \tau \leq \tau_k;$
3. $q(0, y, z, \tau) = 0 \quad 0 \leq y \leq 0,1 \quad 0 \leq z \leq 0,1 \quad 0 \leq \tau \leq \tau_k;$
4. $q(0, 25, y, z, \tau) = \alpha_{np} \cdot (T_{nos} - T_{cp}) \quad 0 \leq y \leq 0,1 \quad 0 \leq z \leq 0,1 \quad 0 \leq \tau \leq \tau_k;$
5. $q(x, 0, z, \tau) = 0 \quad 0 \leq x \leq 0,25 \quad 0 \leq z \leq 0,1 \quad 0 \leq \tau \leq \tau_k;$
6. $q(x, 0, 1, z, \tau) = \alpha_{np} \cdot (T_{nos} - T_{cp}) \quad 0 \leq x \leq 0,25 \quad 0 \leq z \leq 0,1 \quad 0 \leq \tau \leq \tau_k.$

Начальные и граничные условия представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Краевые условия нагрева модели, представленной в работе [17]

Тип	Показатель	Единица измерения	Значение
Начальные условия	Начальная температура окружающей среды	<i>K</i>	300
Граничные условия	Температура $T(x, y, 1)$	<i>K</i>	1273
	Температура $T(x, 1, z)$	<i>K</i>	1273
	Температура $T(1, y, z)$	<i>K</i>	1273
Теплофизические свойства материалов	Теплоемкость стали, $c=f(T)$	<i>Дж/(кг*К)</i>	576...965(373...1173К)
	Теплопроводность стали $\lambda=f(T)$	<i>Вт/(м*К)</i>	81...27(373...1173К)
	Плотность стали $\rho_{ст}=f(T)$	<i>кг/м³</i>	7846...7602(373...1173К)
	Плотность воздуха	<i>кг/м³</i>	0,946...0,301(373...1173К)
	Теплоемкость воздуха $c_{вз}=f(T)$	<i>Дж/(кг*К)</i>	1009...1172(373...1173К)
	Теплопроводность воздуха $\lambda_{вз}=f(T)$	<i>Вт/(м*К)</i>	$3,21 \cdot 10^2 \dots 7,63 \cdot 10^2$ (373...1173К)

В работе [17] представлена численная модель нагрева насыпной садки при граничных условиях 2-го и 3-го рода для случая, когда фильтрация отсутствует. В качестве трехмерного пористого тела рассматривается пористая призма с гранями $0,2 \times 0,2 \times 0,2$ м. Граничные условия:

- приведенный коэффициент теплоотдачи $\alpha = 188,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}};$
- эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda = 16,38 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}};$
- температура газовой среды $T_g = 1033 \text{ K};$
- начальная температура $T_0 = 293 \text{ K};$

Продолжительность времени нагрева составило 14400 сек. На гранях (0,y,z), (x,0,z), (x,y,0) заданы адиабатические условия теплообмена. На остальных гранях условия конвективного теплообмена. Трехмерное аналитическое решение получено перемножением относительных температур [17].

Для верификации предложенной методики замены насыпной садки геометрической фрактальной моделью (глава 2) численно исследовалась фрактальная модель с аналогичными начальными и граничными условиями (как в табл. 4.1).

Описание фрактальной модели

Начальные и граничные условия процесса нагрева фрактальной модели садки соответствуют описанию в [17], однако вместо эффективных коэффициентов плотности, теплоемкости и теплопроводности используются значения для металла и теплоносителя. Помимо этого, изменяется также и описание внутренней задачи при нагреве пористого тела:

для пор:

$$\frac{\delta(\rho \cdot c_p \cdot T)}{\delta \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left([\lambda + (\lambda_T)] \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left([\lambda + (\lambda_T)] \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left([\lambda + (\lambda_T)] \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_{л,пор}; \quad (4.4)$$

$$\text{скелет металла: } \frac{\partial(\rho_m \cdot c_p^m \cdot T_m)}{\delta \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_m \cdot \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_m \cdot \frac{\partial T_m}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_m \cdot \frac{\partial T_m}{\partial z} \right); \quad (4.5)$$

где ρ - плотность дымовых газов, $кг/м^3$; τ - время, $с$; x, y, z - координаты по осям, $м$; $\lambda_T(T), \lambda_m(T)$ - коэффициент теплопроводности для газа, металла, соответственно, $Вт/(м \cdot K)$; $\lambda_T(T)$ - коэффициент турбулентной теплопроводности, $Вт/(м \cdot K)$; c_p - удельная теплоемкость газа, $Дж/(кг \cdot K)$; T - абсолютная температура газа, K ; T_m - температура металла, K , $q_{л,пор}$ - лучистый тепловой поток внутри пор, $Вт$.

Результаты численного моделирования процесса нагрева пористой садки по предложенной методике сравнивались с результатами, полученными в работе [17], где пористую садку предлагается заменить на анизотропную пористую призму с эффективными теплофизическими свойствами. Результаты сравнения представлены на рисунке 4.2.

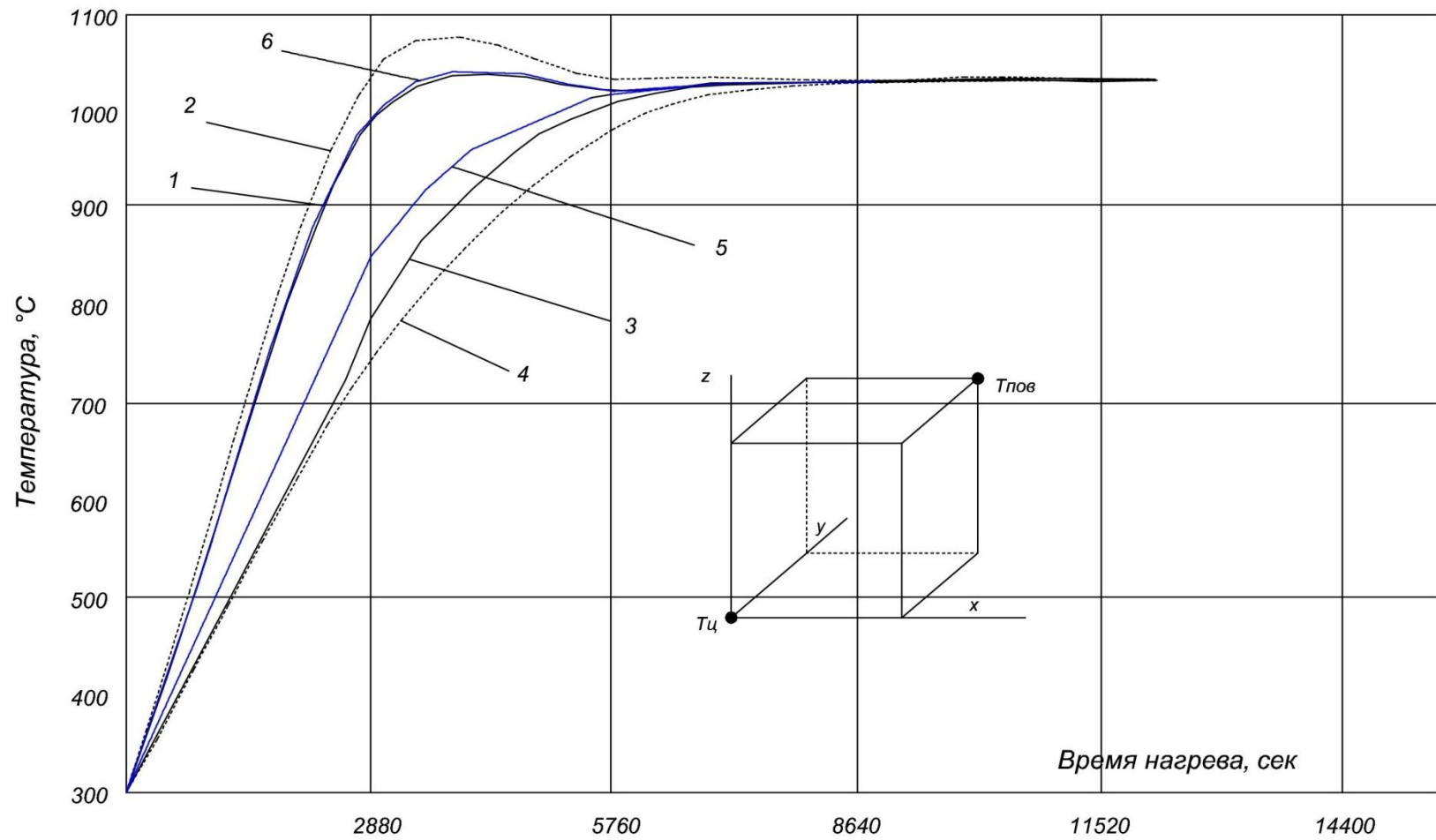


Рисунок 4.2. Температурные кривые в точках: 1 - твердая структура на поверхности, 2 - газовая среда на поверхности, 3 - газовая среда в тепловом центре, 4 - твердая структура в тепловом центре, 5 – тепловой центр [17], 6 – поверхность [17]

На графике видно расхождение значений температур в тепловом центре, что может быть следствием увеличения влияния радиационных тепловых потоков во фрактальных «порах». Однако характер полученных кривых одинаковый, наибольшее отклонение наблюдается при описании температуры в тепловом центре при времени нагрева от 2500 до 5000 секунд, величина отклонения невелика и составляет порядка 10-15%. Наличие отклонения величины температур в заданных промежутках времени может объясняться различием методов расчета температурных полей.

4.2. Верификация процесса теплообмена геометрической фрактальной модели насыпной садки при фильтрации теплоносителя

В своей работе Крылова О.Б. [36] рассматривает нагрев неограниченной пористой пластины с учетом фильтрации газа.

На основе численного решения задачи при использовании теории математического планирования эксперимента в работе [36] были разработаны приближенные формулы для расчета температуры обогреваемой и не обогреваемой поверхностей и средней по массе температуры неограниченной пластины.

В качестве граничных условий в [36] приняты ГУ 2 рода с монотонно убывающим тепловым потоком:

$$\lambda_3(T) \frac{\partial T}{\partial x} = q_0 + a_1 \sqrt{\frac{\tau}{\tau_k}} \quad (4.6)$$

Температурное поле описывается следующей системой уравнений:

$$c_3(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = w \cdot f \cdot c_2 \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_3(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (4.7)$$

$$T(x, 0) = T_0, \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = 0; \lambda_3(T) \frac{\partial T(R, \tau)}{\partial x} = q_0 + a_1 \sqrt{\frac{\tau}{\tau_k}} \quad (4.9)$$

где c_3 – эффективная теплоемкость пористой пластины, Дж/кг*К.

$$c_3(T) = c_0 \cdot H^*, \quad (4.10)$$

где H^* - коэффициент, зависящий от температуры нагрева.

λ_3 – эффективный коэффициент теплопроводности, Bm/m^*K .

$$\lambda_3(T) = \lambda_0 \cdot (1 + p^* \cdot T + 0,5 \cdot (p^*)^2 \cdot T^2) \quad (4.11)$$

Значение порозности автором принималось $f=0,6$, а толщина пластины $R=0,17$ м.

В качестве граничных условий на одной поверхности принимались адиабатические условия, с другой стороны граничные условия 2-го рода:

$$q = 33700 \cdot (1 + A_1 \cdot \sqrt{\frac{Fo}{4}}); \quad (4.12)$$

Для нагреваемого пористого тела эффективный коэффициент теплопроводности зависит от температуры и рассчитывается по формуле:

$$\lambda_3(T) = 11 \cdot (1 + 0,16 \cdot T + 0,0128 \cdot T^2); \quad (4.13)$$

Эффективный коэффициент теплоемкости рассчитывается по формуле:

$$c_3(T) = 1190 + 0,000205 \cdot T; \quad (4.14)$$

Скорость фильтрации теплоносителя $w=0,02$ м/с;

В качестве начальных условий принималась температурное поле пластины во всех точках равное $T_0 = 300$ К.

Для сравнения предложенной методики замены насыпной садки геометрической фрактальной моделью исследовалась фрактальная модель с данными начальными и граничными условиями.

Описание фрактальной модели

Начальные и граничные условия процесса нагрева садки соответствуют описанию в [36], однако вместо эффективных коэффициентов теплоемкости и теплопроводности используются значения для стали 25Х1МФ.

Помимо этого, изменяется также и описание внутренней задачи при нагреве пористого тела:

Задача внутреннего теплообмена пористой садки решалась в соответствии с уравнениями:

$$\text{для пор} \quad \frac{\delta(\rho \cdot c_p \cdot T)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho \cdot U \cdot c_p \cdot T)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left([\lambda + (\lambda_T)] \frac{\partial T}{\partial x} \right) + q_{л,пор} \quad (4.12)$$

$$\text{для скелета металла} \quad \frac{\partial(\rho_M \cdot c_p^M \cdot T_M)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_M \cdot \frac{\partial T_M}{\partial x} \right); \quad (4.13)$$

где ρ - плотность дымовых газов, $кг/м^3$; τ - время, $с$; U - компоненты вектора скорости, $м/с$; x - координата, $м$; $\lambda_T(T)$, $\lambda_M(T)$ - коэффициент теплопроводности для газа и металла, соответственно, $Вт/(м \cdot K)$; $\lambda_T(T)$ - коэффициент турбулентной теплопроводности, $Вт/(м \cdot K)$; c_p - удельная теплоемкость газа, $Дж/(кг \cdot K)$; T - абсолютная температура, K ; T_M - температуры металла, K , $q_{л,пор}$ - лучистый тепловой поток внутри пор, $Вт$.

Результаты численного моделирования процесса нагрева пористой садки с фильтрацией теплоносителя по предложенной методике сравнивались с результатами, полученными в работе [36]. Результаты сравнения представлены на рисунке 4.3.

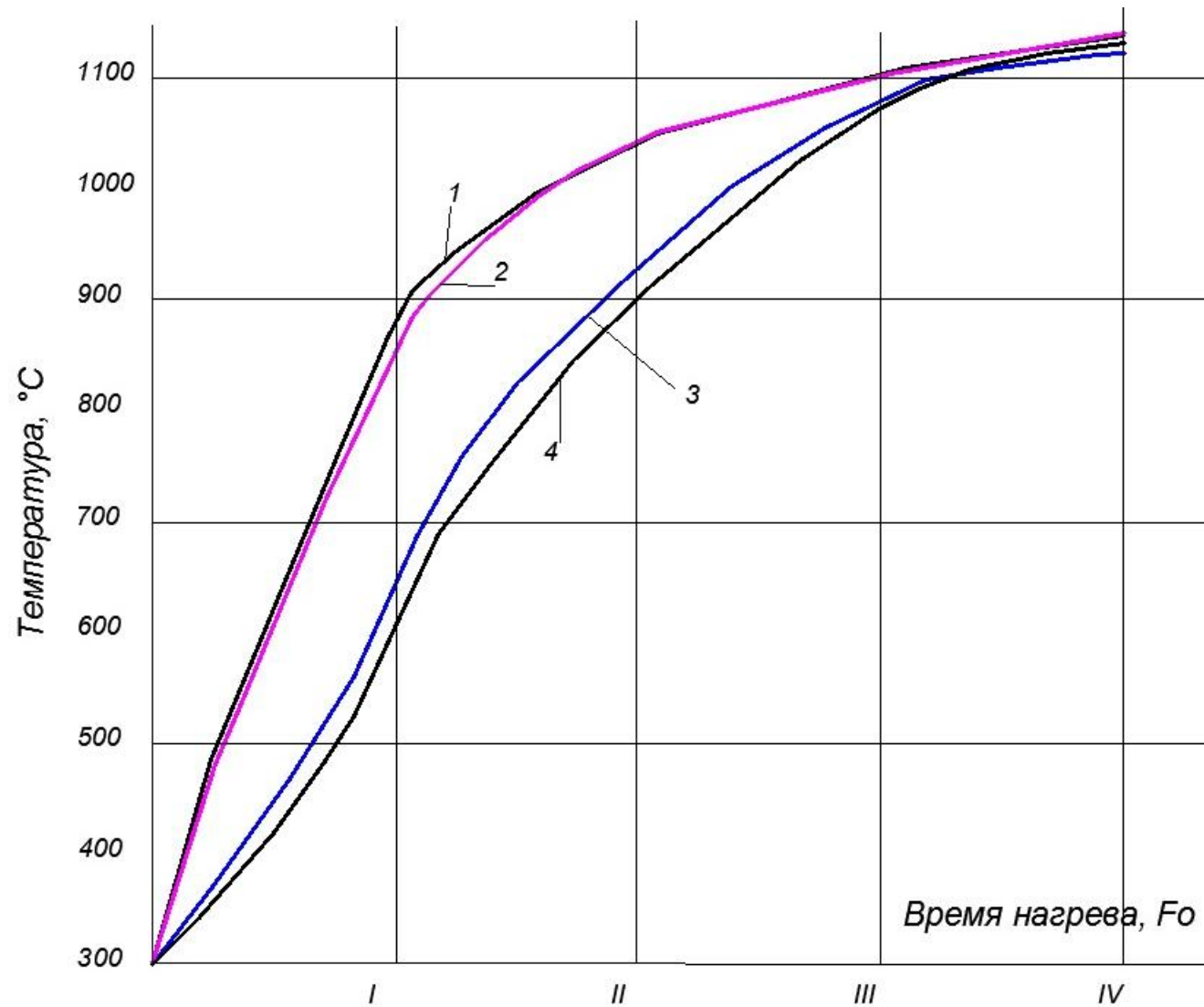


Рисунок 4.3. Температурное поле моделей: 1 - поверхность (фрактальная модель); 2 - поверхность, ([36]); 3 – тепловой центр (фрактальная модель); 4 - тепловой центр ([36])

На графике, показанном на рисунке 4.3 видно расхождение значений температур на поверхности нагрева, что может быть следствием увеличения влияния радиационных тепловых потоков во фрактальных «порах». Величина отклонения невелика и составляет порядка 10%.

Наличие отклонения величины температур в заданных промежутках времени может объясняться различием методов расчета температурных полей, в частности, в работах [36] и [17] расчет температурного поля пористого тела ведется с применением эффективных теплофизических свойств, что является прямым отличием от предложенного фрактального метода, в котором температуры определяются непосредственно из уравнений теплопроводности для газовой и твердой сред. Можно сделать вывод о том, что результаты расчета температурных полей, определяемых по предложенной методике замены насыпной садки на математическую модель, построенную на основе фрактальной структуры, согласуются с данными других авторов, полученными при использовании эффективных теплофизических свойств.

4.3. Верификация процесса нагрева геометрической фрактальной модели насыпной садки по результатам экспериментальных исследований

Для большей достоверности была проведена верификация предложенной методики по результатам, полученным в ходе физического исследования процесса нагрева насыпных садок (глава 3).

В главе 3 приведены результаты экспериментального исследования нагрева насыпной садки, состоящей из конструктивных элементов 4-х типов: кольца $d = 22$ и 32 мм, короткие стальные цилиндры $d = 16$ мм, а также самонарезающиеся шурупы длиной 50 мм.

В работе было проведено сравнение температурных полей, определяемых по предложенной методике при численном исследовании насыпной садки, с данными, полученными в ходе экспериментальных исследований.

Постановка задачи для случая без фильтрации теплоносителя.

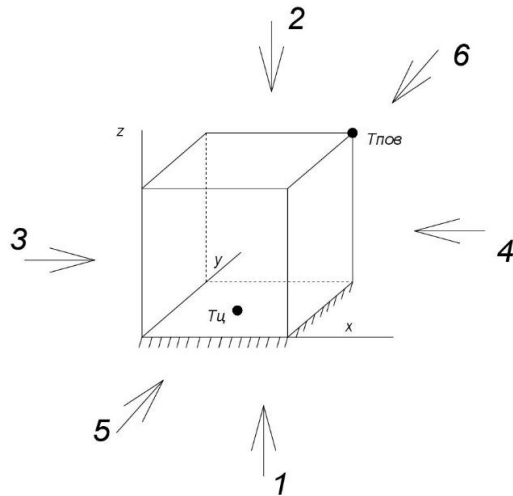


Рисунок 4.4. Условная схема процесса нагрева

Начальные условия при расчете составляющей теплообмена для случая без фильтрации теплоносителя:

$$T_0(x, y, z, 0) = 293K$$

$$\omega_{\phi 0}(x, y, z, 0) = 0 \text{ м/с}$$

Граничные условия при расчете теплообмена для границ (рисунок 4.4):

$$1. \quad q(x, y, 0, \tau) = 0$$

$$2. \quad \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} = q(x, y, 0, 1, \tau)$$

$$3. \quad \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} = q(x, 0, z, \tau)$$

$$4. \quad \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} = q(x, 0, 25, z, \tau)$$

$$5. \quad \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} = q(0, y, z, \tau)$$

$$6. \quad \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} = q(0, 1, y, z, \tau)$$

$$0 \leq x \leq 0.1; \quad 0 \leq y \leq 0.25; \quad 0 \leq z \leq 0.1; \quad 0 \leq \tau \leq \tau_K$$

Внутренняя задача теплообмена описывается аналогично постановке задачи при описании фрактальной модели по формулам 4.4 и 4.5.

Постановка задачи для случая при наличии фильтрации теплоносителя.

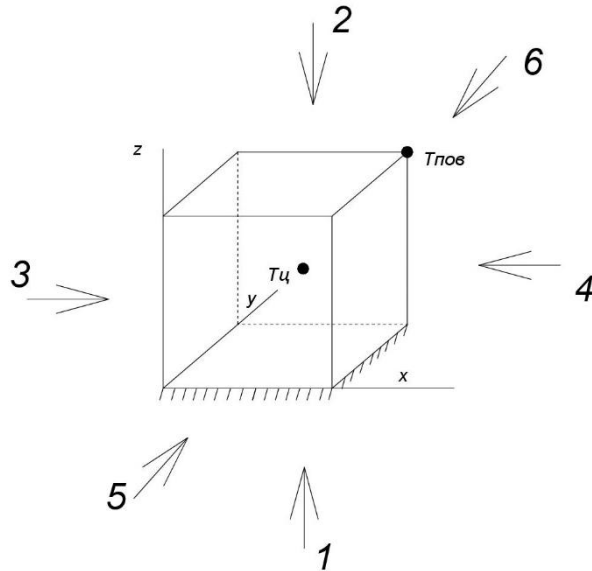


Рисунок 4.5. Условная схема процесса нагрева

Начальные условия при расчете составляющей теплообмена для случая без фильтрации теплоносителя:

$$T_0(x, y, z, 0) = 293K$$

$$\omega_\phi(x, y, z, 0) = 1,88 \text{ м/с}$$

Граничные условия при расчете теплообмена для границ (рисунок 4.5):

$$1. \quad q(x, y, 0, \tau) = 0 ; \quad \omega(x, y, 0, \tau) = 1,88 \text{ м/с} ;$$

$$2. \quad \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} = q(x, y, 0, 1, \tau) \quad \omega(x, y, 0, 1, \tau) = 0$$

$$3. \quad \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} = q(x, 0, z, \tau) \quad \omega(x, 0, z, \tau) = 0$$

$$4. \quad \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} = q(x, 0, 25, z, \tau) \quad \omega(x, 0, 25, z, \tau) = 0$$

$$5. \quad \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} = q(0, y, z, \tau) \quad \omega(0, y, z, \tau) = 0$$

$$6. \quad \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} = q(0,1,y,z,\tau) \quad \omega(0,1,y,z,\tau) = 0$$

$$0 \leq x \leq 0.1; \quad 0 \leq y \leq 0.25; \quad 0 \leq z \leq 0,1; \quad 0 \leq \tau \leq \tau_k$$

Внутренняя задача теплообмена для пор описывается уравнением:

$$\begin{aligned} & \frac{\delta(\rho \cdot c_p \cdot T)}{\delta \tau} + \frac{\partial(\rho \cdot U \cdot c_p \cdot T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot U \cdot c_p \cdot T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot U \cdot c_p \cdot T)}{\partial z} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left([\lambda + (\lambda_T)] \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left([\lambda + (\lambda_T)] \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left([\lambda + (\lambda_T)] \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_{л,пор} \end{aligned} \quad (4.14)$$

Для скелета металла внутренняя задача теплообмена описывается уравнением 4.5.

Было исследовано влияние геометрических параметров структуры фрактальной модели и радиационной составляющей на эффективный коэффициент теплопроводности при различных температурах при решении обратной задачи [51].

На рисунках 4.6 и 4.7 представлены полученные при моделировании значения температур в характерных точках предложенной математической модели насыпной садки в виде фрактальной структуры для нагрева заготовок при наличии (рисунок 4.6) и отсутствии фильтрации теплоносителя (рисунок 4.7). По другим результатам сравнения при нагреве насыпных садов, состоящих из длинных цилиндров, колец Рашига и самонарезающихся шурупов получены аналогичные данные.

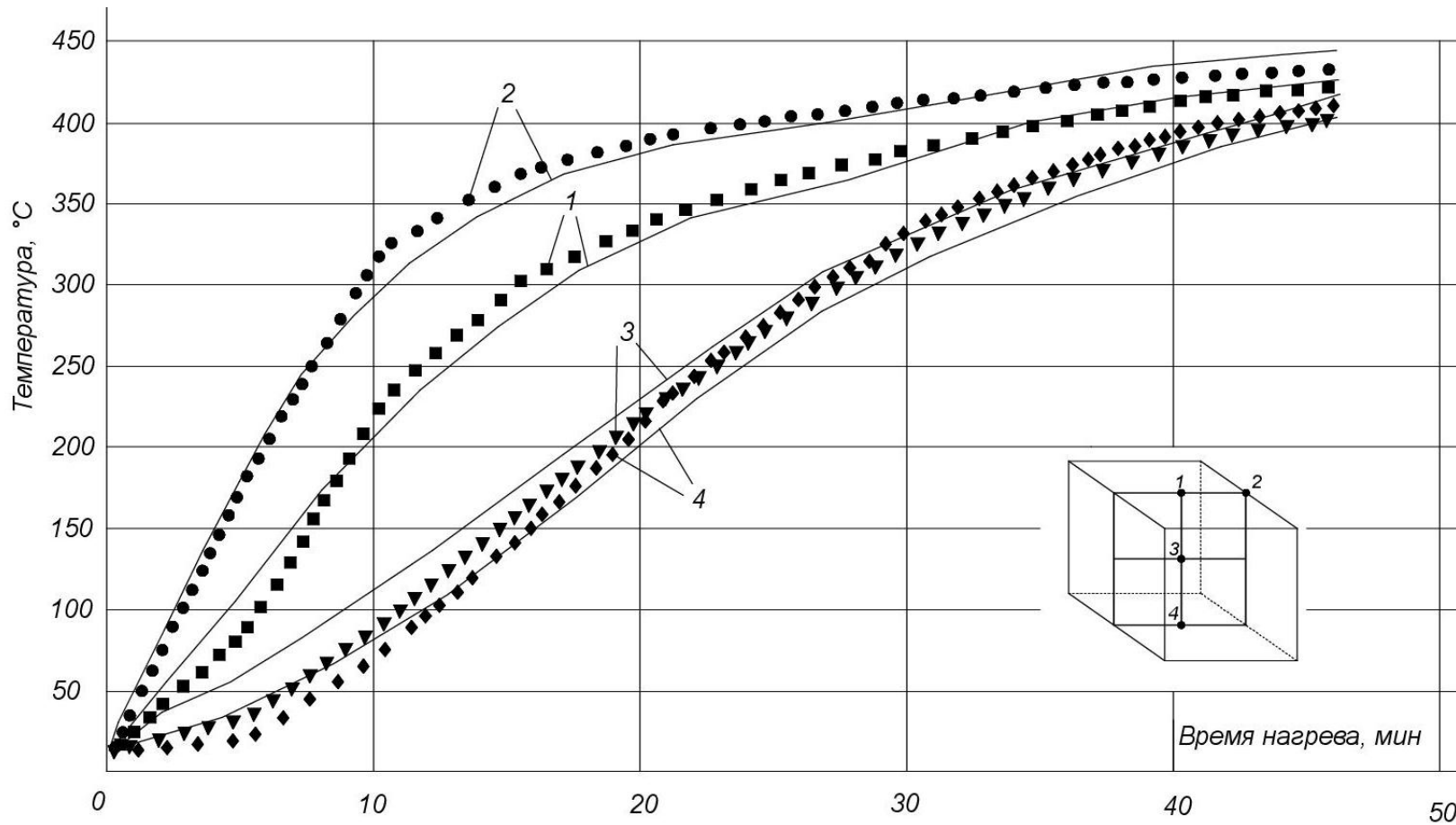


Рисунок 4.6. Кинетика температур в точках насыпной садки, состоящей из конструктивных элементов в форме колец $d=22$ мм (значение порозности $f=0,858$) при отсутствии фильтрации: – по предложенной методике,
 • ■ ▼ ◆ - данные эксперимента, 1,2,3,4 - замеры температур в характерных точках

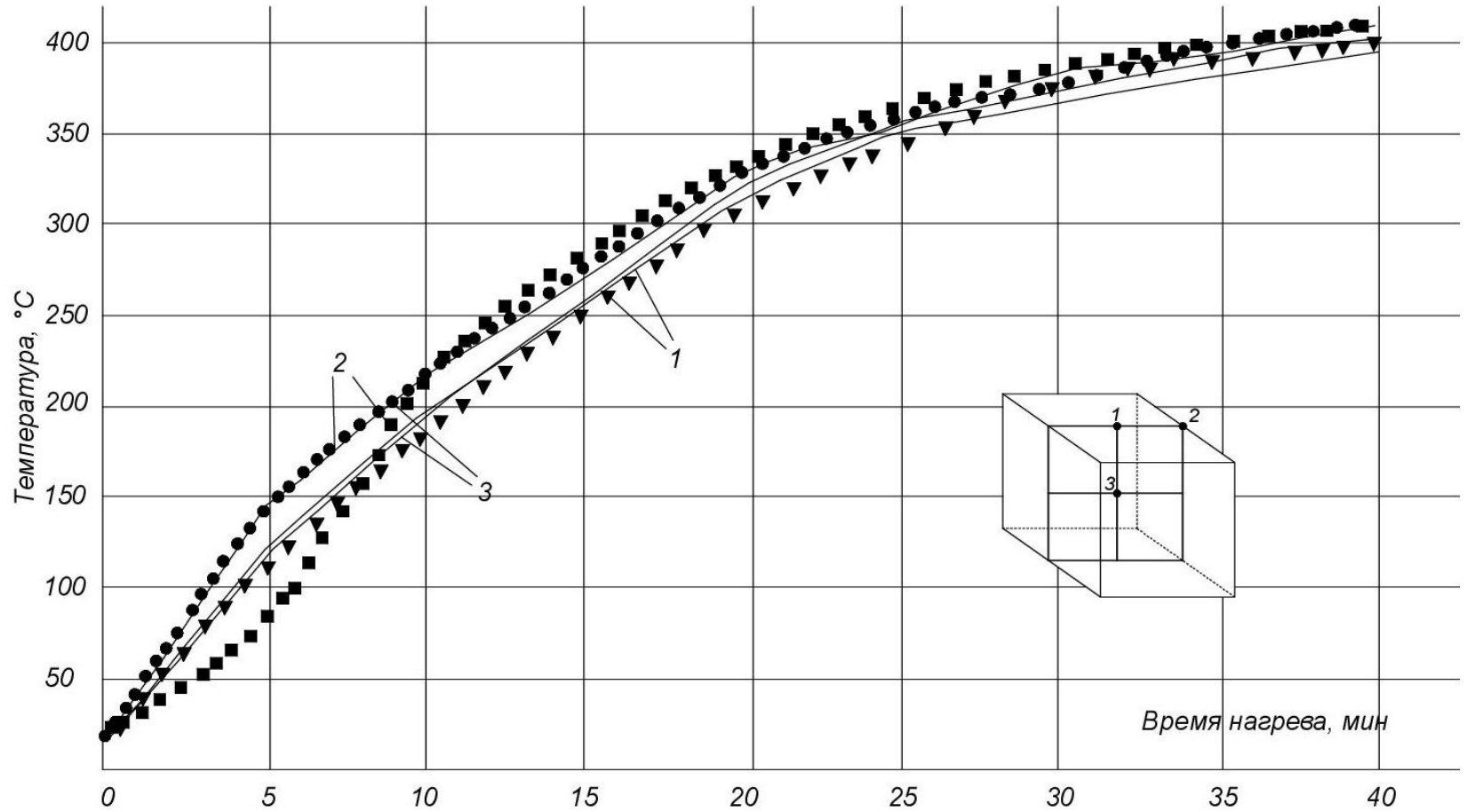


Рисунок 4.7. Кинетика температур в точках насыпной садки, состоящей из конструктивных элементов в форме колец $d=22$ мм (величина порозности $f=0,858$) при фильтрации теплоносителя через нижнюю плоскость контейнера с расходом $0,0037$ м³/с:
 – по предложенной методике, • ■ ▼ ◆ - данные эксперимента, 1,2,3,4 - замеры температур в характерных точках

Анализ результатов физического и численных исследований позволяет сделать вывод о хорошей сходимости температурных полей, полученных при нагреве насыпных садок, описываемых по предложенной методике в ходе математического моделирования со значениями, полученными в ходе проведения экспериментального исследования. Среднее значение погрешности не превышает 8% для расчета при отсутствии фильтрации, и 6,4% для расчета при фильтрации теплоносителя с расходом $0,0037 \text{ м}^3/\text{с}$.

4.4. Верификация процесса фильтрации теплоносителя через насыпную садку

Существенное влияние на процесс нагрева пористых тел также оказывает наличие фильтрации теплоносителя через объем тела.

Решение вопроса фильтрации газов в пористых средах методом математического моделирования описывалось в работе Н. Равшанова, Н.М. Курбонова [63], в которой решение системы нелинейных дифференциальных уравнений предлагается осуществлять с помощью метода выпрямления фазовых фронтов.

В работе Сухинова А.В. и Григоряна Л.А. [70] численное моделирование процесса фильтрации предлагается производить при помощи модифицированного адаптивного метода минимальных поправок.

Голубев Г.В. рассматривает математическую модель фильтрации в неоднородных трещиновато-пористых средах, представляющих собой совокупность пористых блоков, отделенных друг от друга развитой системой пор [14].

Для исследования зависимости величины сопротивления насыпной садки в зависимости от скорости фильтрации при различных значениях порозности предлагается использовать геометрическую фрактальную модель, построенную по предложенной методике.

Для проведения расчетного численного эксперимента в программном комплексе ANSYS была построена трехмерная фракталоподобная расчетная

модель насыпной садки в виде фрактальной структуры. На рисунке 4.8 приведен общий вид предлагаемой модели.

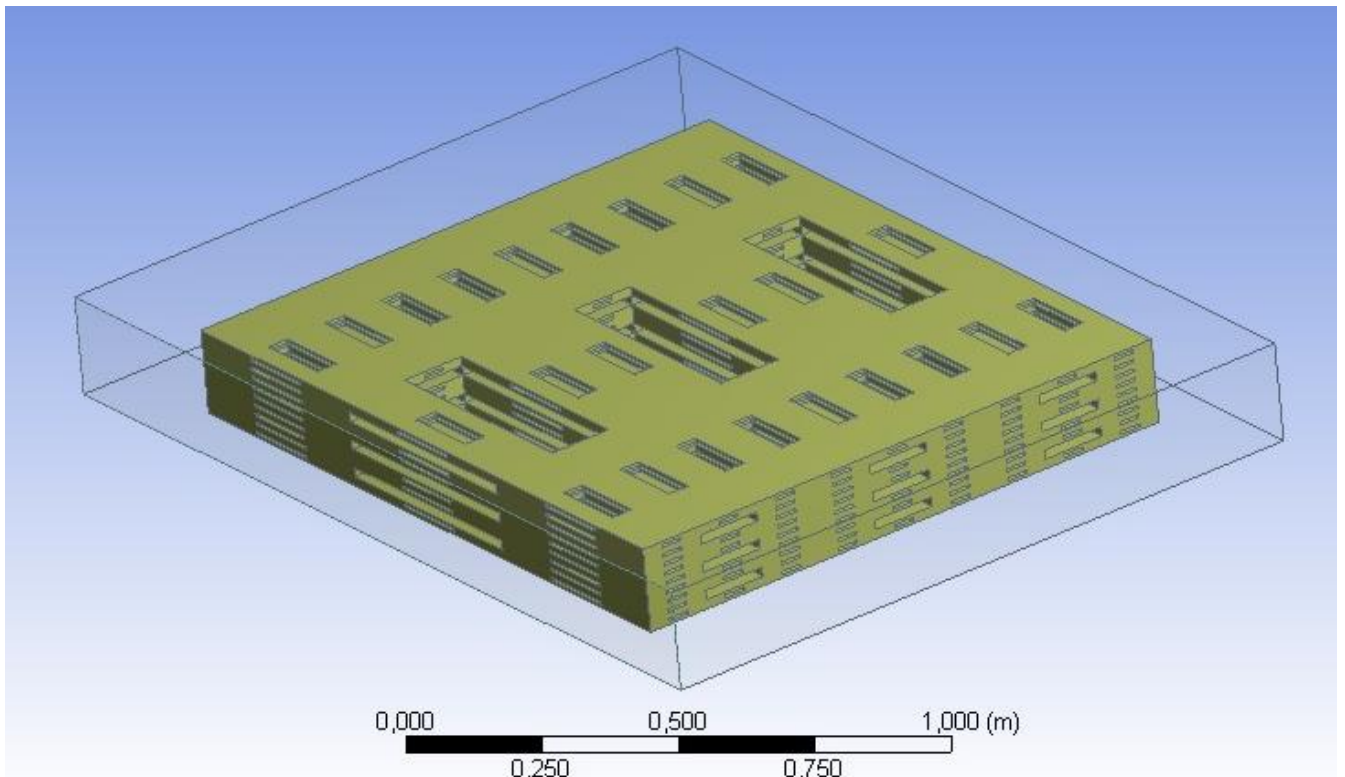
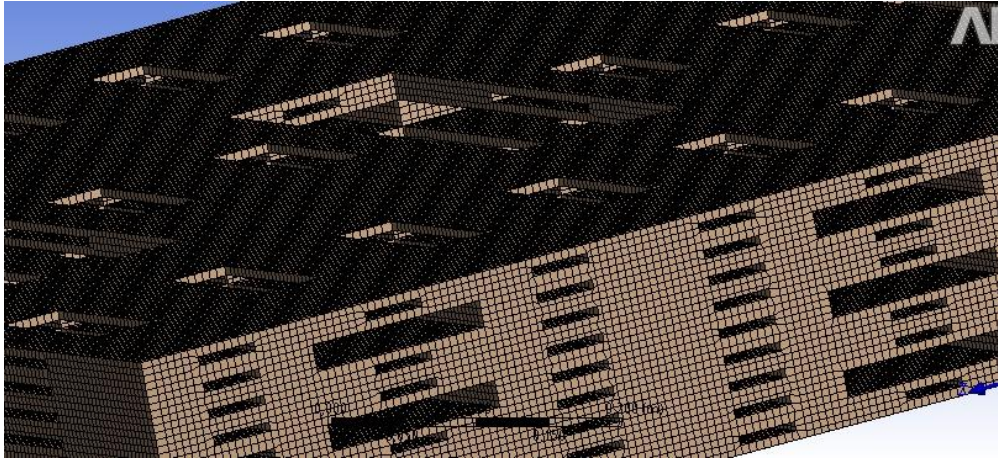


Рисунок 4.8. Фрактальная модель 2 ранга разбиения при расчете фильтрации

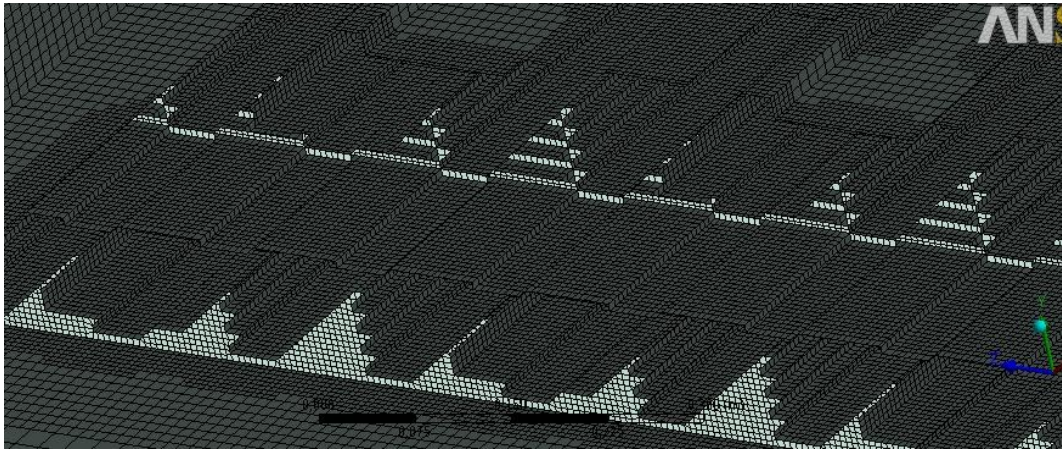
Объем садки - $V_{me}=0,44 \text{ м}^3$, объем газового пространства - $V_{пор}=0,72 \text{ м}^3$, величина порозности данной модели $f= V_{пор} / V_{об}=0,619$. Площадь поверхности пор составила $53,6 \text{ м}^2$.

Построение фрактальной модели подробно описано в п. 2.4.

Общий вид полученной расчетной сетки показан на рисунке 4.9. Количество элементов сетки - 3220840, количество расчетных узлов - 3328106.



а)



б)

Рисунок 4.9. **Общий вид расчетной сетки:** а) - расчетная сетка для твердой структуры, б) - расчетная сетка газового пространства

Постановка задачи процесса фильтрации теплоносителя через садку.

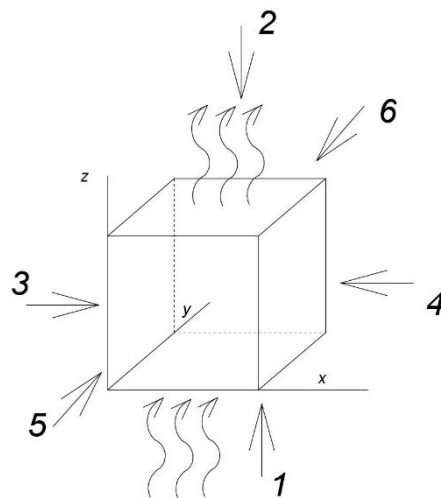


Рисунок 4.10. **Условная схема процесса нагрева**

Начальные условия при расчете составляющей теплообмена для случая без фильтрации теплоносителя:

$$\omega_0(x, y, z, 0) = 0 \text{ м/с};$$

$$P_0(x, y, z, 0) = 0,1 \text{ МПа};$$

Граничные условия при расчете теплообмена для границ:

$$1. \quad \omega(x, y, 0, \tau) = \omega_{\text{фильтр}};$$

$$p(x, y, 0, \tau) = p_{\text{фильтр}};$$

$$2. \quad \omega(x, y, z_k, \tau) = 0 \quad ;$$

$$p(x, y, z_k, \tau) = p_{\text{атм}};$$

$$3. \quad \omega(0, y, z, \tau) = 0 \quad ;$$

$$p(0, y, z, \tau) = p_{\text{атм}};$$

$$4. \quad \omega(x_k, y, z, \tau) = 0 \quad ;$$

$$p(x_k, y, z, \tau) = p_{\text{атм}};$$

$$5. \quad \omega(x, 0, z, \tau) = 0 \quad ;$$

$$p(x, 0, z, \tau) = p_{\text{атм}};$$

$$6. \quad \omega(x, y_k, z, \tau) = 0 \quad ;$$

$$p(x, y_k, z, \tau) = p_{\text{атм}};$$

$$0 \leq x \leq x_k; \quad 0 \leq y \leq y_k; \quad 0 \leq z \leq z_k; \quad 0 \leq \tau \leq \tau_k.$$

На рисунке 4.11 показана зависимость величины падения давления воздуха между входом и выходом, полученных в расчетной математической модели в сравнении с экспериментально измеренным значением для садки, с значением величины порозности $f=0,439$. Точками показаны значения, полученные при экспериментальном исследовании, сплошной линией результаты численного исследования процесса фильтрации.

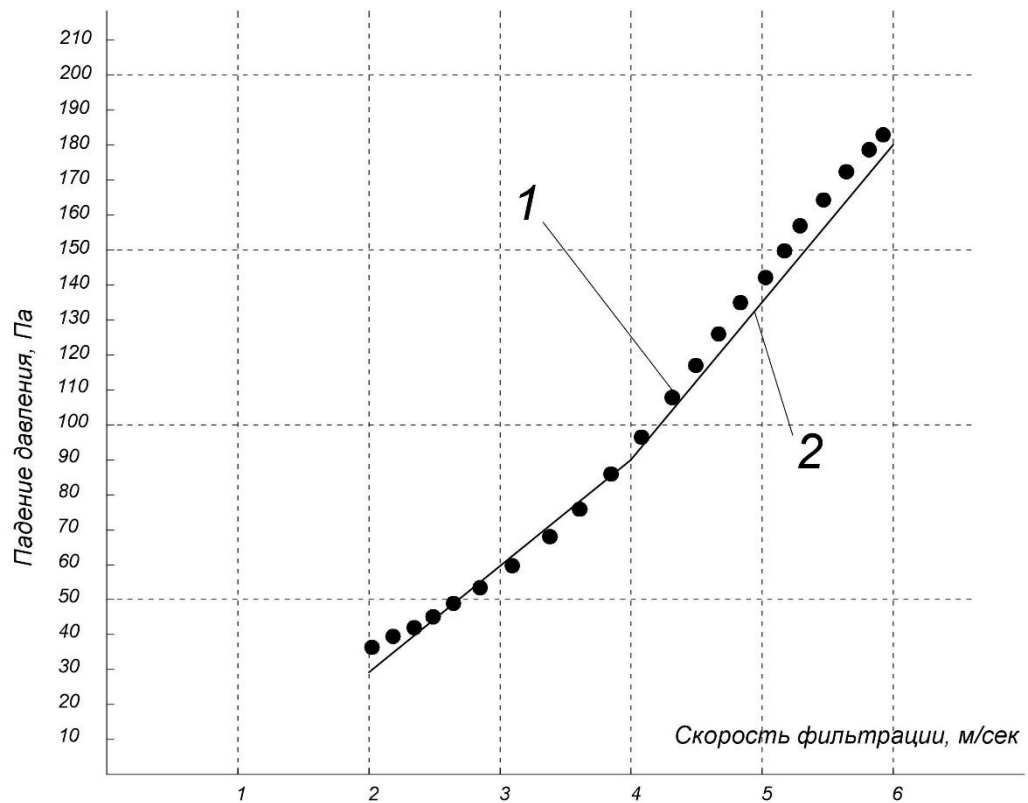


Рисунок 4.11. График зависимости величины падения давления для садки с величиной порозности $f=0,439$: 1 - экспериментальные значения, 2 - численная модель

На рисунке 4.11 видно хорошее совпадение значений величины падения давления в садке при численном моделировании с опытными данными, полученными в главе 3. Расхождение составило не более 10%. Такое совпадение свидетельствует о возможности использования для замены реальной насыпной садки геометрической фрактальной модели насыпной садки при определении величины падения давления.

По другим результатам сравнения при нагреве насыпных садок, состоящих из длинных цилиндров, колец Рашига и самонарезающихся шурупов получены аналогичные данные.

4.5. Выводы по четвертой главе

1. Проведено сравнение предложенной методики замены реальной насыпной садки с хаотически расположенными деталями геометрической фрактальной структурой со значениями, полученными при численном моделировании процесса теплообмена, с результатами, полученными другими авторами [17, 36] при

аналогичных условия нагрева показало совпадение результатов, погрешность составила не более 10 %.

2. Проведена верификация значений, полученных при численном моделировании процесса теплообмена, с результатами, полученными в ходе экспериментального исследования при аналогичных условиях нагрева. Получено хорошее совпадение результатов, погрешность составила менее 10%.

3. Проведено сравнение значений падения давления на входе и выходе в насыпную садку, полученных при численном моделировании процесса фильтрации теплоносителя, с результатами, полученными в ходе экспериментального исследования при аналогичных условиях. Получено хорошее совпадение результатов, погрешность составила менее 10%.

Материалы четвертой главы опубликованы в работах автора [16, 48, 51, 55, 56].

ГЛАВА 5. ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА НАГРЕВА НАСЫПНОЙ САДКИ В НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ

Одним из эффективных способов интенсификации процессов теплообмена в пористых телах является организация фильтрации газов через них [11]. Проникновение греющих газов между изделиями обеспечивает более быстрый и равномерный их прогрев и приводит, в конечном итоге, к снижению времени пребывания заготовок в печи.

Для садочных печей одним из способов повышения эффективности режимов их эксплуатации является организация фильтрации газов. Организация внутренней фильтрации через насыпную садку позволяет интенсифицировать процесс теплообмена и получить требуемые параметры качества нагрева металла за более короткое время.

5.1. Конструкция садочной печи с дополнительными каналами

Предлагается в печи организовать дополнительную фильтрацию теплоносителя через объем садки в поперечном направлении с помощью равномерно расположенных каналов из подподовых топок [95].

Повышение эффективности процесса нагрева достигается за счет того, что через равномерно расположенные каналы из подподовых топок поступает часть теплоносителя и фильтруется через объем насыпной садки в вертикальном направлении, интенсифицируя процесс нагрева (рисунок 5.1).

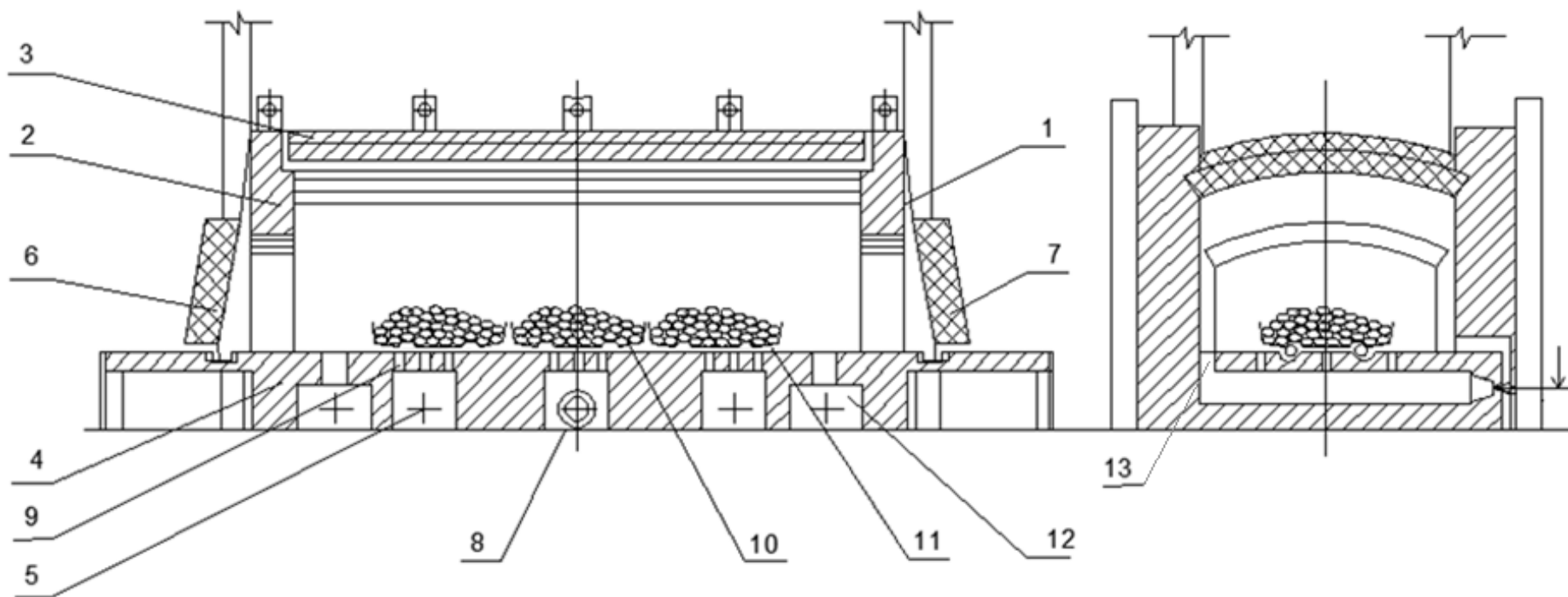


Рисунок 5.1. **Схема печи с каналами в подподовых топках:** 1 - наружная обмуровка печи, 2 - внутренняя обмуровка печи, 3 - верхняя обмуровка печи, 4 - подина печи, 5 - подподовые топки, 6 - окно загрузки, 7 - окно выгрузки, 8 - газовые горелки, 9 - подовые каналы, 10 - поддоны, 11 – перфорированное основание поддонов, 12 – дымопады, 13 – выход дымовых газов в камеру печи, не участвующих в фильтрации теплоносителя

В разогретую печь через окно загрузки (6), загружают на перфорированных поддонах (10) подвергаемые термообработке и образующие насыпную садку мелкие изделия. В результате сжигания газа, образующиеся в подподовых топках (5) продукты сгорания, частично проходят через выводные каналы (9), сделанные в поду (4), и через отверстия (11), выполненные в поддонах, поступают в рабочее пространство печи, при этом фильтруются через насыпную садку. Другая часть дымовых газов проходит через канал для их выхода (13). Затем они омывают поверхность насыпной садки. Нагретую до заданной параметрами качества (температура в тепловом центре и температура на поверхности) температуры насыпную садку выгружают через окно выгрузки (7). После передачи тепловой энергии насыпной садке продукты сгорания удаляют из печи через дымопады (12), расположенные в поду у торцевых стен.

В модернизированной конструкции добавлена организация фильтрации теплоносителя при помощи специальных каналов (9), выполненных в поду печи и в поддонах (11), обеспечивающая увеличение интенсивности теплообмена внутри насыпной садки. По сравнению конструкцией нагревательной печи, где теплоноситель выходя из подподовых топок через выводные каналы (13), выполненные в поду печи, омывал поверхность садки только снаружи. Это изменение в конструкции печи имеет существенное влияние на время нагрева насыпной садки, и увеличивает производительность печи.

В качестве инструмента для определения режимов нагрева насыпных садов в предложенной конструкции печи используются алгоритмы, основанные на численной модели печи, в которые заложена методика построения геометрической фрактальной структуры, выполняемая на основе фрактала «губки Менгера», для математической модели работы нагревательной печи.

5.2. Численная модель садочной печи

Для упрощения численной модели приняты следующие допущения:

1. Поскольку в печи используются кинетические горелки принимаем, что процесс смешения и горения заканчивается на срезе горелочного камня.

2. Продукты горения находятся в состоянии локального термодинамического равновесия. Все тела, участвующие в теплообмене, являются серыми.
3. Коэффициент теплоотдачи во всем пространстве печи принимается средним.
4. Нагреваемую садку рассматриваем как один общий поддон, т.к. располагающиеся в рабочем пространстве печи поддоны плотно примыкают один к другому.

Начальные условия:

$$T_{кл}(x_{кл,i}, 0) = T_{кл}(0, 0) + \sum_{n=1}^m b_n^{кл} \cdot x_{1,кл}^n, \quad (5.1)$$

$$T_{м}(x_{м,i}, 0) = T_{м}(0, 0) + \sum_{n=1}^m b_n^м \cdot x_{м,i}^n, \quad (5.2)$$

$$U_z(x_{i,z}, 0) = U_z(0, 0) + \sum_{n=1}^m b_n^z \cdot x_{i,z}^n, \quad (5.3)$$

где $b_n^{кл}$, $b_n^м$ - коэффициенты аппроксимации начального температурного поля кладки, металла и скоростного поля газов в печи; x - текущая пространственная координата, изменяющаяся в пределах от 1 до 3-х м.

Граничные условия:

$$\lambda_{кл}(T_{кл}) \frac{\partial T_{кл}}{\partial x_i} = \bar{q}_{к,кл} + q_{л,кл,i} + q_{л,м,i}, \quad (5.4)$$

$$\lambda_{м}(T_{м}) \frac{\partial T_{м}}{\partial x_i} = \bar{q}_{к,м} + q_{л,м,i} + q_{л,кл,i}, \quad (5.5)$$

где $\bar{q}_{к,кл}$, $q_{л,кл,i}$, $q_{л,кл,i}$ - конвективный и лучистый тепловые потоки на кладку и металл, $Вт/м^2$.

На рисунке 5.2 схематично изображена нагревательная печь, в которой располагается исследуемая садка в виде фрактальной структуры. Для детального описания граничных условий, действующих в исследуемой модели, цифрами показаны свободные поверхности в рабочем пространстве печи.

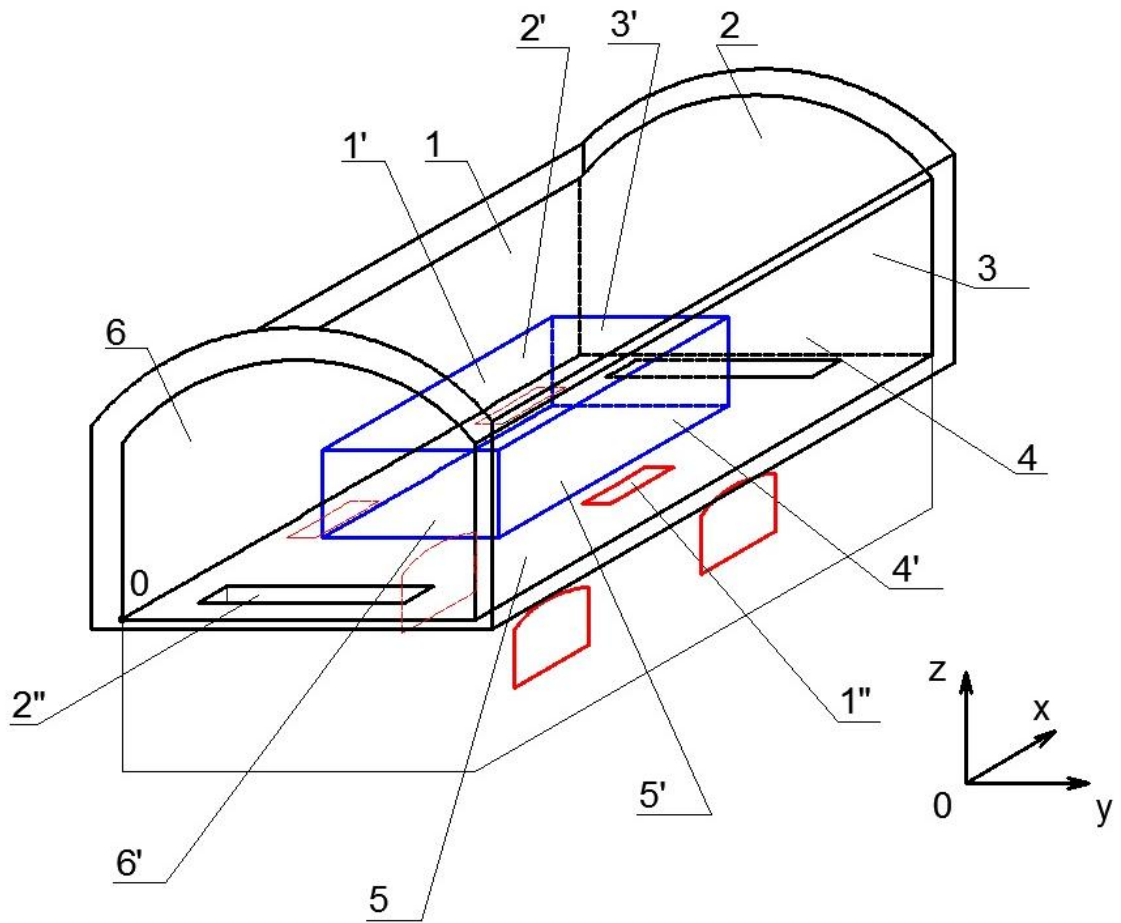


Рисунок 5.2. Поверхности, участвующие в теплообмене:

1, 2, 3, 4, 6 - поверхности свода печи, 5 – под печи, 1', 2', 3', 4', 5', 6' - поверхности садки, 1'' - горелка (вход газов), 2'' - выход газов из рабочего пространства печи, 0 – точка начала координат

В контакте поддона с подом печи (поверхность 5') принимается условие адиабаты. Для описания граничных условий для пода печи (поверхность 5) делится на 6 поверхностей. Для примера рассмотрим граничные условия на 1 поверхности.

Поверхность №1.

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial y} \lambda_{\kappa l} (T_{\kappa l}) \frac{\partial T_{\kappa l}}{\partial y} = \alpha_{\kappa l} \cdot (\bar{T}_2 - T(x_2, y_2, z_2, \tau)) + \varepsilon \cdot c_0 \cdot \left(\frac{T_1^4(x_{\kappa l 1}, y_{\kappa l 1}, z_{\kappa l 1}, \tau)}{100} - \frac{\bar{T}_2^4(x_{\kappa l 2}, y_{\kappa l 2}, z_{\kappa l 2}, \tau)}{100} \right) \cdot \phi_{1-2} + \\
& + \varepsilon \cdot c_0 \cdot \left(\frac{T_1^4(x_{\kappa l 1}, y_{\kappa l 1}, z_{\kappa l 1}, \tau)}{100} - \frac{\bar{T}_3^4(x_{\kappa l 3}, y_{\kappa l 3}, z_{\kappa l 3}, \tau)}{100} \right) \cdot \phi_{1-3} + \varepsilon \cdot c_0 \cdot \left(\frac{T_1^4(x_{\kappa l 1}, y_{\kappa l 1}, z_{\kappa l 1}, \tau)}{100} - \frac{\bar{T}_4^4(x_{\kappa l 4}, y_{\kappa l 4}, z_{\kappa l 4}, \tau)}{100} \right) \cdot \phi_{1-4} + \\
& + \varepsilon \cdot c_0 \cdot \left(\frac{T_1^4(x_{\kappa l 1}, y_{\kappa l 1}, z_{\kappa l 1}, \tau)}{100} - \frac{\bar{T}_5^4(x_{\kappa l 5}, y_{\kappa l 5}, z_{\kappa l 5}, \tau)}{100} \right) \cdot \phi_{1-5} + \varepsilon \cdot c_0 \cdot \left(\frac{T_1^4(x_{\kappa l 1}, y_{\kappa l 1}, z_{\kappa l 1}, \tau)}{100} - \frac{\bar{T}_6^4(x_{\kappa l 6}, y_{\kappa l 6}, z_{\kappa l 6}, \tau)}{100} \right) \cdot \phi_{1-6} + \\
& + \varepsilon \cdot c_0 \cdot \left(\frac{T_1^4(x_{\kappa l 1}, y_{\kappa l 1}, z_{\kappa l 1}, \tau)}{100} - \frac{\bar{T}_{1'}^4(x_{M1}, y_{M1}, z_{M1}, \tau)}{100} \right) \cdot \phi_{1-1'} + \varepsilon \cdot c_0 \cdot \left(\frac{T_1^4(x_{\kappa l 1}, y_{\kappa l 1}, z_{\kappa l 1}, \tau)}{100} - \frac{\bar{T}_{2'}^4(x_{M2}, y_{M2}, z_{M2}, \tau)}{100} \right) \cdot \phi_{1-2'} + \\
& + \varepsilon \cdot c_0 \cdot \left(\frac{T_1^4(x_{\kappa l 1}, y_{\kappa l 1}, z_{\kappa l 1}, \tau)}{100} - \frac{\bar{T}_{3'}^4(x_{M3}, y_{M3}, z_{M3}, \tau)}{100} \right) \cdot \phi_{1-3'} + \varepsilon \cdot c_0 \cdot \left(\frac{T_1^4(x_{\kappa l 1}, y_{\kappa l 1}, z_{\kappa l 1}, \tau)}{100} - \frac{\bar{T}_{4'}^4(x_{M4}, y_{M4}, z_{M4}, \tau)}{100} \right) \cdot \phi_{1-4'} + \\
& + \varepsilon \cdot c_0 \cdot \left(\frac{T_1^4(x_{\kappa l 1}, y_{\kappa l 1}, z_{\kappa l 1}, \tau)}{100} - \frac{\bar{T}_{6'}^4(x_{M6}, y_{M6}, z_{M6}, \tau)}{100} \right) \cdot \phi_{1-6'} \quad , \quad (5.6)
\end{aligned}$$

где

$$\begin{array}{ccccccc}
0 \leq x_2 \leq x_{\kappa l.p} & 0 \leq x_{\kappa l.1} \leq x_{\kappa l.p} & 0 \leq x_{\kappa l.2} \leq x_{\kappa l.p} & x_{\kappa l.3} = x_{\kappa l.p} & 0 \leq x_{\kappa l.4} \leq x_{\kappa l.p} & 0 \leq x_{\kappa l.5} \leq x_{\kappa l.p} & x_{\kappa l.6} = 0 \\
0 \leq y_2 \leq y_{\kappa l.p} & y_{\kappa l.1} = 0 & 0 \leq y_{\kappa l.2} \leq y_{\kappa l.p} & 0 \leq y_{\kappa l.3} \leq y_{\kappa l.p} & y_{\kappa l.4} = y_{\kappa l.p} & 0 \leq y_{\kappa l.5} \leq y_{\kappa l.p} & 0 \leq y_{\kappa l.6} \leq y_{\kappa l.p} \\
0 \leq z_2 \leq z_{\kappa l.p} & 0 \leq z_{\kappa l.1} \leq z_{\kappa l.p} & z_{\kappa l.2} = z_{\kappa l.p} & 0 \leq z_{\kappa l.3} \leq z_{\kappa l.p} & 0 \leq z_{\kappa l.4} \leq z_{\kappa l.p} & z_{\kappa l.5} = 0 & 0 \leq z_{\kappa l.6} \leq z_{\kappa l.p} \\
0 \leq \tau_2 \leq \tau_{\kappa} & 0 \leq \tau \leq \tau_{\kappa} & 0 \leq \tau \leq \tau_{\kappa} & 0 \leq \tau \leq \tau_{\kappa} & 0 \leq \tau \leq \tau_{\kappa} & 0 \leq \tau \leq \tau_{\kappa} & 0 \leq \tau \leq \tau_{\kappa}
\end{array}$$

$$\begin{array}{lll}
x_{m.p.1} \leq x_{m.1} \leq x_{m.p.2} & x_{m.} \leq_p \cdot \neq & m & x_{m.3} = x_{m.p.2} \\
y_{m.1} = y_{m.p.1} & y_{m.} \leq_p \cdot \neq & m & y_{m.p.1} \leq y_{m.3} \leq y_{m.p.2} \\
z_{m.p.1} \leq z_{m.1} \leq z_{m.p.2} & z_{m.} = z_2 & m \cdot p & z_{m.p.1} \leq z_{m.3} \leq z_{m.p.2} \\
0 \leq \tau \leq \tau_k & 0 \leq \tau \leq \tau_k & & 0 \leq \tau \leq \tau_k \\
\\
x_{m.p.1} \leq x_{m.4} \leq x_{m.p.2} & x_{m.6} = x_{m.p.1} & & \\
y_{m.4} = y_{m.p.2} & y_{m.p.1} \leq y_{m.6} \leq y_{m.p.2} & & \\
z_{m.p.1} \leq z_{m.4} \leq z_{m.p.2} & z_{m.p.1} \leq z_{m.6} \leq z_{m.p.2} & & \\
0 \leq \tau \leq \tau_k & 0 \leq \tau \leq \tau_k & &
\end{array}$$

Для газовой среды в качестве граничных условий задаются условия выхода газовой смеси на срезе камня горелки. Для выхода отработавших продуктов сгорания в качестве граничных условий задается условие свободного выхода.

Поскольку предполагается нагрев садки с использованием фильтрации теплоносителя, геометрическую структуру пористой насыпной садки предлагается описывать с использованием фрактальной структуры, построенной на основе фрактала «губка Менгера». Постановка задачи изменится, т.к. часть дымовых газов начнет фильтроваться через перфорированное основание поддона с последующей фильтрацией газов через садку.

Постановка задачи

Численная модель нагревательной садочной печи описывается следующими дифференциальными уравнениями.

Дифференциальным уравнением сохранения массы или уравнением неразрывности.

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial (\rho \cdot U_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (5.7)$$

Уравнениями энергии, управляющими распределением температуры

$$\text{для пор} \quad \frac{\partial (\rho \cdot c_p \cdot T)}{\partial \tau} + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial (\rho \cdot U_i \cdot c_p \cdot T)}{\partial x_i} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left([\lambda + (\lambda_T)_i] \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + q_{л,пор}; \quad (5.8)$$

$$\text{для скелета металла: } \frac{\partial(\rho_m \cdot c_p^m \cdot T_m)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\lambda_m \cdot \frac{\partial T_m}{\partial x_i}) + \frac{\partial}{\partial y_i} (\lambda_m \cdot \frac{\partial T_m}{\partial y_i}) + \frac{\partial}{\partial z_i} (\lambda_m \cdot \frac{\partial T_m}{\partial z_i}); \quad (5.9)$$

$$\text{для кладки } \frac{\partial(\rho_{кл} \cdot c_p^{кл} \cdot T_{кл})}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\lambda_{кл} \cdot \frac{\partial T_{кл}}{\partial x_i}) + \frac{\partial}{\partial y_i} (\lambda_{кл} \cdot \frac{\partial T_{кл}}{\partial y_i}) + \frac{\partial}{\partial z_i} (\lambda_{кл} \cdot \frac{\partial T_{кл}}{\partial z_i}), \quad (5.10)$$

Уравнением сохранения импульса, которое управляет распределением компонента скорости и выражает влияние конвекции, градиента давления, массовых сил объемного характера и вязкого взаимодействия (уравнения Навье-Стокса).

$$\frac{\partial(\rho \cdot U_i)}{\partial \tau} + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial(\rho \cdot U_i \cdot U_j)}{\partial x_j} = - \sum_{i=1}^3 \frac{\partial P}{\partial x_i} + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left([\mu + (\mu_T)_i] \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \right), \quad i \neq j, \rho = \rho_{n2}^0 \cdot \frac{273}{T}; \quad (5.11)$$

где ρ - плотность дымовых газов, $кг/м^3$; τ - время, $с$; U_i - компоненты вектора скорости, $м/с$; x_i, y_i, z_i - координаты x, y, z , $м$; P - абсолютное давление, $Па$; μ - динамический коэффициент вязкости газа, $Па \cdot с$; μ_T - динамический коэффициент турбулентной вязкости газа, $Па \cdot с$; ρ_{n2}^0 - плотность продуктов горения при нормальных условиях, $кг/м^3$; $\lambda_m, \lambda_{кл}$ - коэффициент теплопроводности для газа, металла и кладки соответственно, $Вт/(м \cdot К)$; λ_T - коэффициент турбулентной теплопроводности, $Вт/(м \cdot К)$; c_p - удельная теплоемкость газа, $Дж/(кг \cdot К)$; T - абсолютная температура, $К$; $T_m, T_{кл}$ - температуры металла и кладки соответственно, $К$, $q_{л,пор}$ - лучистый тепловой поток внутри пор, $Вт$.

Решалась сопряженная внешняя задача теплообмена. В качестве граничных условий на внутренних стенках кладки и металла принимался радиационно-конвективный нагрев. Внутренняя задача теплообмена решалась для садки, представленной в виде фрактальной структуры, где теплообмен для скелета металла описывается теплопроводностью, а в газовом пространстве для каждой поры учитывается теплообмен теплопроводностью, излучением внутри стенок пор и конвективным теплообменом.

Для решения задачи без фильтрации учитывалась естественная конвекция, для задачи с фильтрацией учитывается вынужденная конвекция.

5.3.Реализация численной модели.

Численная модель садовой печи была реализована в многофункциональном программном конечно-элементном пакете ANSYS[75]. Исследование проводилось при нагреве изделий, располагающихся на поддонах в горизонтальной термической садовой печи с подподовыми топками. Поддоны в рабочем пространстве печи располагались вплотную друг к другу, таким образом можно говорить о единой насыпной садке с габаритными размерами $5,9 \times 1 \times 0,217$ м. Величина порозности исследуемой садки $f=0,5$.

В программном комплексе ANSYS была построена численная модель нагревательной газовой печи с подподовыми топками, в которой насыпная садка была заменена на геометрическую фрактальную модель 2 ранга разбиения. Для уменьшения ресурсов численной модели было принято допущение, что тепловые процессы на центральной поперечной оси происходят симметрично, что позволило использовать при численном моделировании только 1/2 рабочего пространства печи.

На рисунке 5.3 показана схема нагрева насыпной садки в исследуемой горизонтальной термической садовой печи с подподовыми топками. На рисунке схематично показано распределение тепловых потоков и движение газов в пространстве нагревательной печи. Расположенные в боковых стенках каналы соответствуют каналам, ведущим из подподовых топок (рисунок 5.1).

Алгоритм выбора и построения геометрической фрактальной модели садки подробно описан во 2 главе.

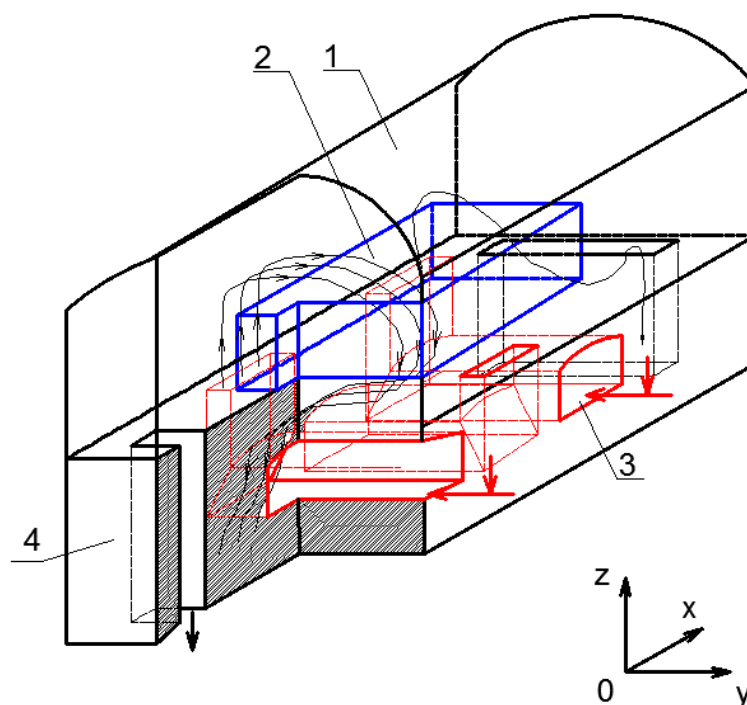


Рисунок 5.3. **Общая схема нагрева садки в печи:** 1- внутреннее пространство печи, 2 – насыпная садка, 3 – горелочный камень, 4 – дымоотводящие каналы

Вход газов осуществляется через каналы, расположенные в торцевой стенке. В поду печи выполнены дополнительные отверстия для фильтрации теплоносителя сквозь объем насыпной садки. Размеры каналов соответствуют размерам «пор» фрактальной модели. Выход продуктов сгорания осуществляется через подовые дымопады, расположенные в нижней части стенки, противоположной к входным каналам.

Объем садки - $V_{мс}=0,147 \text{ м}^3$, объем воздушного пространства - $V_{пор}=0,245 \text{ м}^3$, величина порозности данной модели составило $f=0,6$. Площадь поверхности пор составила $18,64 \text{ м}^2$.

Общий вид полученной расчетной сетки показан на рисунке 5.4. Количество элементов сетки - 2429943, количество расчетных узлов - 3065366.

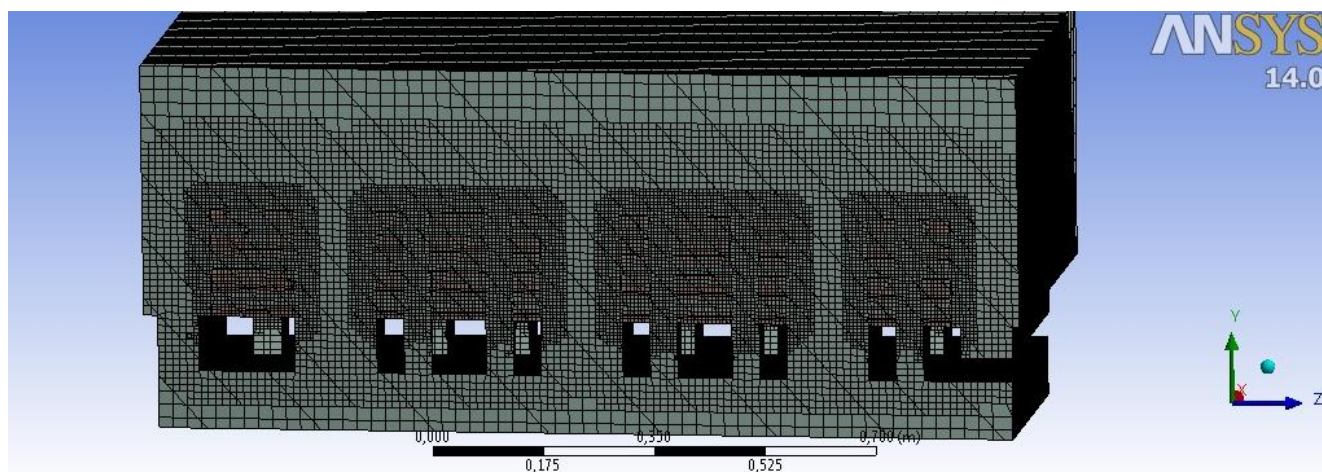


Рисунок 5.4. Общий вид расчетной сетки (поперечный разрез)

Внутренняя задача теплообмена решалась по алгоритму, приведенному в 4 главе. Конвективная составляющая определялась по $k-\epsilon$ модели, модель излучения – по методу дискретных ординат.

На рисунке 5.5 приведен график температур на поверхности и в тепловом центре садки при различных режимах фильтрации теплоносителя через подовые каналы.

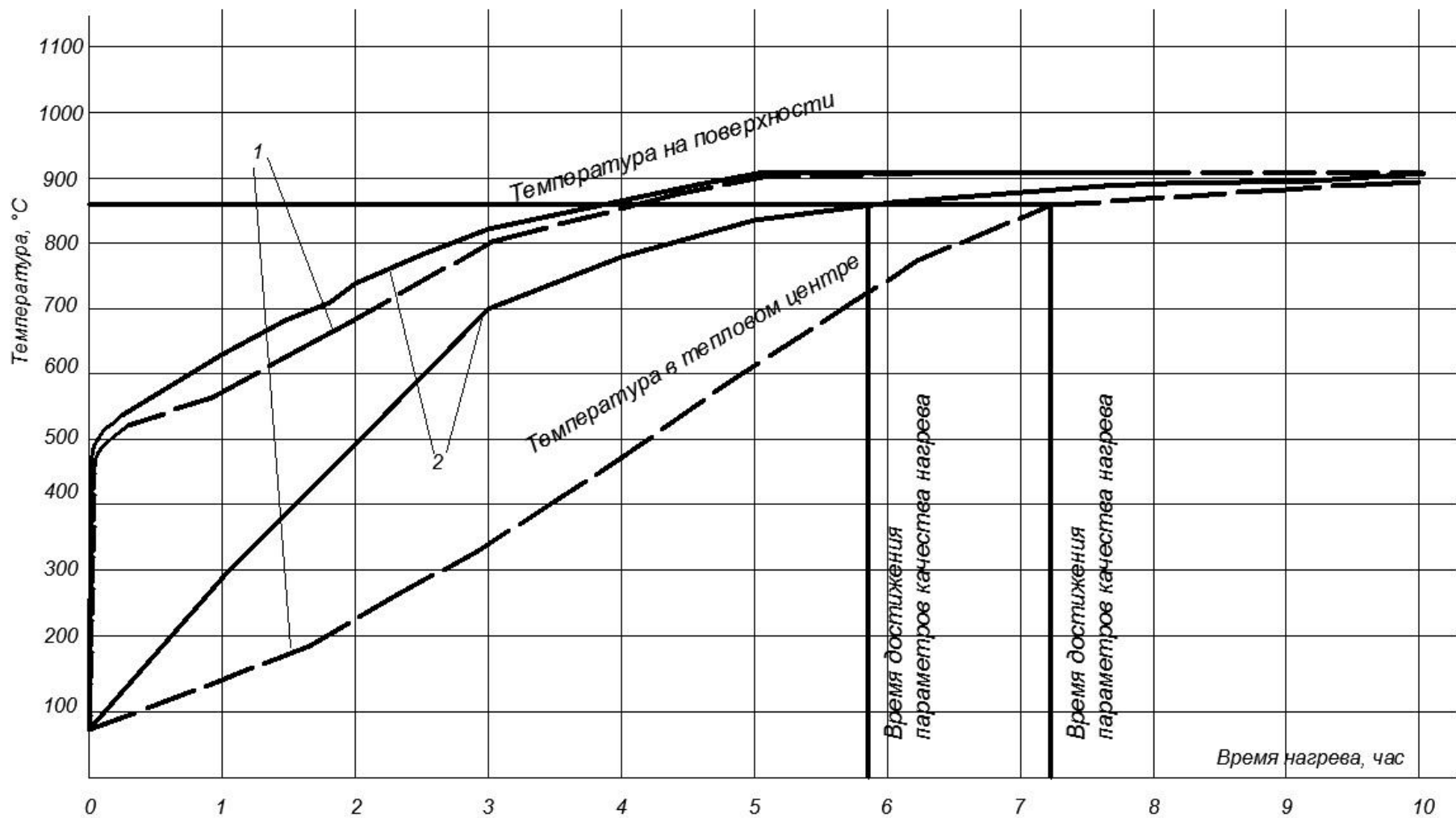


Рисунок 5.5. Температурные поля на поверхности и в тепловом центре садки: 1 - при отсутствии фильтрации, 2 - при скорости фильтрации 0,05 м/с

Как видно из графика 5.5 при организации дополнительной фильтрации теплоносителя через каналы, расположенные в поду печи увеличивается интенсивность процесса нагрева садки, что способствует уменьшению времени нагрева технологического материала до заданных параметров.

Для оценки энергетической эффективности приведен график, показанный на рисунке 5.6. На нем приведены значения расходов газа, потребляемого горелками печи за смену.

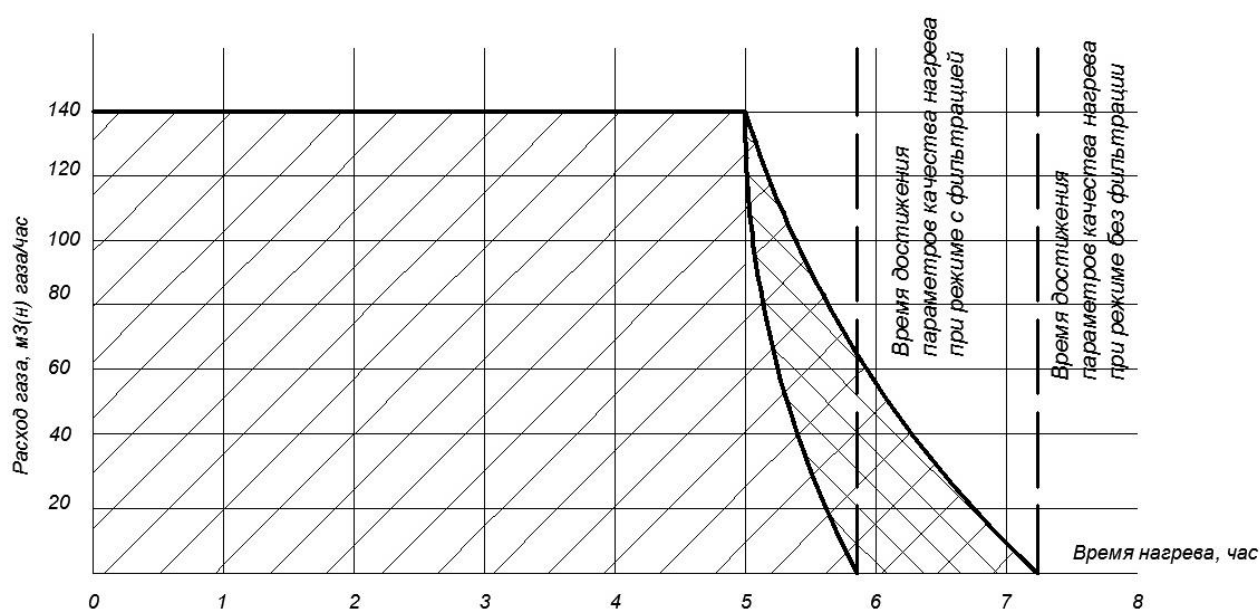


Рисунок 5.6. График величины потребляемого топлива

За счет снижения времени нагрева насыпной садки до требуемых параметров наблюдается снижение величины потребления газа, потребляемого горелками печи на 19,3% по сравнению с базовой моделью печи, в которой отсутствуют подовые каналы для организации фильтрации теплоносителя.

5.5. Оценка капитальных вложений, эффективности и срока окупаемости

Для оценки целесообразности организации конструктивных изменений в конструкции печи, с целью организации дополнительной фильтрации теплоносителя, необходимо выполнить расчет технико-экономических показателей, к которым относится срок окупаемости, индекс доходности, внутреннюю норму прибыли и другие. Оценка капитальных затрат и

полученной выгоды производилась на примере горизонтальной термической садочной печи, цеха АО «Северсталь» г. Череповец.

Затраты на конструктивные изменения пода печи складываются из нескольких показателей. Во-первых это затраты на строительство дополнительных каналов (дымопадов) в поду. Во-вторых затраты на изменение формовки поддонов, на которых располагается садка.

Затраты на увеличение мощности тягодутьевых установок зависят от сопротивления насыпной садки, а также сопротивления построенных дымоотводящих каналов. Поскольку сопротивление садки зависит от величины порозности, то в расчете примем величину порозности садки равную $f=0,6$.

Сопротивление каналов определяется по формуле Дарси:

$$\Delta p = \lambda_{mp} \cdot \frac{l}{d_3} \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2}, \quad (5.23)$$

где λ_{mp} - коэффициент сопротивления трения; l - длина канала дымопада, м; d_3 - эквивалентный диаметр канала, м; ρ - плотность газовой среды, кг/м³; w - средняя скорость течения потока, м/с.

Эквивалентный диаметр для канала прямоугольного сечения находится по следующей формуле

$$d_3 = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b}, \quad (5.24)$$

где a и b - длина и ширина канала по сечению, м.

Коэффициент сопротивления трения зависит от числа Рейнольдса, определяемого по формуле

$$Re = \frac{w \cdot d_3}{\nu}, \quad (5.25)$$

где ν - коэффициент кинематической вязкости, м²/с.

При значении числа Рейнольдса $Re < 2320$ течение считается ламинарным. Для такого случая используется формула Блазиуса

$$\lambda_{mp} = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}, \quad (5.26)$$

Для турбулентного потока ($Re > 2320$) применяется формула Альтшуля

$$\lambda_{mp} = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{\text{Re}} + \frac{K_3}{d_3} \right)^{0,25}, \quad (5.27)$$

где K_3 - эквивалентная шероховатость, мм.

Суммарное сопротивление движению продуктов сгорания

$$\Delta p_{\text{сум}} = \Delta p_{\text{сад}} + \Delta p_{\text{mp}}. \quad (5.28)$$

Определив значение суммарного сопротивления можно оценить затраты, требуемые на увеличение мощности тягодутьевого оборудования.

Полученную выгоду можно определить исходя из экономии денежных средств, получаемой при снижении расхода сжигаемого топлива.

Затраты при работе печи можно определить как

$$З = Ц_2 \cdot B_2 \cdot \tau, \quad (5.29)$$

где $Ц_2$ - цена природного газа, руб/м³; B_2 - расход природного газа, м³/час; τ - время работы печи, час/год.

Соответственно, приток денежных средств можно определить как разницу между затратами на нагрев садки при обычном режиме работы и при режиме организации дополнительной фильтрации теплоносителя.

$$\Pi = З_1 - З_2. \quad (5.30)$$

Расчет простого срока окупаемости проекта определяется по формуле

$$\tau_{\text{ок}} = \frac{З}{\Pi}. \quad (5.31)$$

Чистый дисконтированный доход находится по следующему уравнению

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=1}^n \frac{\Pi_t}{(1+r)^t} - K, \quad (5.32)$$

где n - число периодов; Π_t - приток денежных средств в период t , руб; r - норма дисконта; K - капитальные вложения, руб.

Индекс доходности инвестиций PI, представляющий собой отношение суммы дисконтированных потоков будущих поступлений денежных средств, полученных при реализации проекта, к общей сумме капиталовложений.

$$PI = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{П_t}{(1+r)^t}}{K} . \quad (5.33)$$

Внутренняя норма прибыли IRR , представляет собой норму дисконта, при которой величина $ЧДД = 0$.

$$IRR = r_{\min} + \frac{ЧДД_{r_{\min}} \cdot (r_{\max} - r_{\min})}{ЧДД_{r_{\min}} - ЧДД_{r_{\max}}} , \quad (5.34)$$

где r_{\min} , r_{\max} - значения нормы дисконта, при которых $ЧДД$ принимает любое положительное и отрицательное значения, близкие к нулю; $ЧДД_{Rmin}$, $ЧДД_{Rmax}$ - $ЧДД$ при r_{\min} и r_{\max} соответственно, руб.

Дисконтированный срок окупаемости DPP определяется из равенства

$$\sum_{t=1}^{DPP} \frac{CF_t}{(1+r)^t} = K . \quad (5.35)$$

Результаты расчета технико-экономических показателей сведены в таблицу 5.1.

Таблица 5.1. Технико-экономические показатели

Показатель	Обозначение	Ед. измерения	Значение
1	2	3	4
Приток денежных средств в период t	$П_t$	тыс. руб/год	2279,2
Норма дисконта	r	–	0,16
Срок работы проекта	t	лет	5
Капиталовложения	K	руб	2446,5
Чистый дисконтированный доход	$ЧДД$	руб	4219133,038
Индекс доходности инвестиций	PI	–	1,056
Внутренняя норма прибыли	IRR	–	1,023
Дисконтированный срок окупаемости	DPP	лет	1,03

5.6. Выводы по пятой главе

1. Была предложена модернизированная конструкция садовой печи, в которой организованы дополнительные каналы, ведущие из подподовых топок, позволяющие интенсифицировать процесс теплообмена в насыпной садке.

2. Для сравнения энергетической эффективности нагревательных печей двух конструкций (печь старой конструкции и модернизированная печь с каналами

из подподовых топок) были построены модели предложенных печей. Описание насыпных садок проводилось с использованием предложенной методики описания пористых тел в виде геометрической фрактальной структуры. При решении задачи теплообмена в них решалась сопряженная задача газ-кладка-металл, на границах учитывался радиационно-конвективный теплообмен.

3. Получены результаты расчета для двух вариантов нагрева: для конструкции печи при отсутствии фильтрации теплоносителя и для модернизированной конструкции печи с учетом фильтрации теплоносителя через нагреваемую пористую садку.

4. Повышение энергетической эффективности модернизированной конструкции печи достигается за счет снижения расхода газа – 19,3% за цикл.

5. Рассчитаны основные технико-экономические показатели, а также показатели экономической эффективности.

Материалы пятой главы опубликованы в работах автора [50, 55, 95].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При рассмотрении расчетных методов определения тепловых потоков, температурных полей, а также поиске теплофизических коэффициентов в насыпных структурах был выявлен ряд недостатков, не позволяющих с достаточной степенью точности решать уравнения в нестационарных задачах.

2. Предложена методика численного моделирования, при которой реальное пористое тело (насыпная садка) заменяется геометрической фракталоподобной моделью, при этом в расчете не используются эффективные теплофизические коэффициенты. Предложенная фрактальная модель учитывает: теплофизические свойства материала, а также газовой среды, заполняющей поры; геометрию газовых каналов, располагаемых внутри пористой структуры при расчете движения газа в порах. При этом нет необходимости определять эффективные теплофизические коэффициенты при тепловом расчете нагрева пористого тела.

3. Получены результаты экспериментальных исследований нагрева насыпной садки, сформированной из 4-х типов конструктивных элементов, при наличии фильтрации теплоносителя через садку. Получены результаты экспериментального исследования нагрева насыпных садок сформированных заданными конструктивными элементами 4-х типов при 4-х режимах нагрева. По результатам исследования были построены температурные кривые, для температур в характерных точках исследуемых насыпных садок.

4. Проведена серия опытов по определению перепада давления в насыпной садке при фильтрации через нее теплоносителя. По результатам была определена регрессионная зависимость падения давления теплоносителя в насыпных садках, сформированных различными конструктивными элементами, при скоростях потока в диапазоне от 2 до 8 м/с.

5. Проверена достоверность используемой геометрической фрактальной модели насыпной садки в виде фрактальной структуры путем сравнения температурных полей, и величины гидродинамического сопротивления,

полученных при ее нагреве, с результатами, полученными другими авторами, а также с результатами, полученными в ходе лабораторных исследований.

6. Предложена модернизированная конструкция садочной печи, в которой организованы дополнительные каналы в поду печи, позволяющие интенсифицировать процесс теплообмена в насыпной садке. Повышение эффективности работы садочной печи, достигается за счет того, что теплоноситель движется не только в горизонтальном направлении, но и фильтруется вертикально через объем садки по специальным каналам, расположенным в подовом пространстве.

7. Получены результаты расчетов для двух вариантов нагрева: для старой конструкции печи без фильтрации теплоносителя, и для модернизированной конструкции печи с учетом фильтрации теплоносителя через насыпную садку. Повышение энергетической эффективности составляет: по снижению расхода газа – 19,3%.

Библиографический список

1. Алешкова И.А., Математическое моделирование сопряженной термогравитационной конвекции в пористой среде / Алешкова И.А., Шеремет М. А. // Вестник удмуртского университета. – 2010. – Вып. 2 – с. 49-56.
2. Алифанов О.М., Будник С.А., Ненарокомов А.В. Экспериментально-теоретическое исследование процессов теплообмена в высокопористых материалах // Тепловые процессы в технике. – № 2. – 2011 – с. 5-10.
3. Башкуев, Ю.Б. Основы фрактальной геометрии и фрактального исчисления/ от. ред. Ю.Б. Башкуев. – Улан-Удэ: Изд-во Бурятского госуниверситета, 2013. - 224 с.
4. Бахвалов Н.С., Панасенко Г.П. Осреднение процессов в периодических средах. — М.: Наука, 1984. — С. 164–169.
5. Бегункова А.Ф. Сборник трудов ЛИТМО / Бегункова А.Ф. – С.Пб.: Университет ЛИТМО, 1954.
6. Белов С.В. Пористые проницаемые материалы. Справочник. / Белов С.В. Под ред. Д.т.н., проф. Белова С.В. – М.: Металлургия, 1987 – 317 с.
7. Бельский В.И, Сергеев Б.В. Промышленные печи и трубы издание второе, исправленное и дополненное / Бельский В.И, Сергеев Б.В. – М.: Стройиздат. 1974 – 301 с.
8. Беляев А.Ю. Усреднение в задачах теории фильтрации. — М.: Наука, 2004. — С. 76–127. — 200 с.
9. Бороздин А.В. Экспериментальное исследование и численное моделирование гидродинамики и теплообмена в шаровых засыпках / Бороздин А.В., Варава А.Н., Дедов А.В., Комов А.Т., Малаховский С.А. // Тепловые процессы в технике. – № 7. – 2015 – с. 295-300.
10. Божокин С.В. Фракталы и мультифракталы. / Божокин С.В., Паршин Д.А. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001, 128 с.
11. Бровкин Л.А. О краевых условиях в процессах сушки фильтрацией теплоносителя / Бровкин Л.А., Гусев В.А. // Известия вузов. Энергетика.– 1983. – № 5. – с.79-82.
12. Бровкин Л.А. Температурные поля тел при нагреве и плавлении в промышленных печах / Бровкин Л.А. – Иваново.: ИЭИ, 1973. – 364 с.
13. Волков Д.П. Тепло- и масооперенос в нефтеносных грунтах / Волков Д.П., Дульнев Г.Н. // Инж. Физический журнал. – 1986. – Т.50. – №6. – с.939-946.
14. Голубев Г.В. Математическое моделирование фильтрации в неоднородных трещиновато-пористых средах / Голубев Г.В. // Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского. – 2011. – №4(3). – с. 725-727.

15. Гоповин Н.Н. Оценки эффективного коэффициента теплопроводности композита, модифицированного фуллеренами / Гоповин Н.Н., Зарубин В.В., Кувыркин Г.Н. // Композиты и наноструктуры. – 2012. – №4. – с.15-22.
16. Горбунов В.А. Использование фрактального подхода при моделировании температурных полей насыпных садов в термических печах / Горбунов В.А., **Перевезенцев Г.А.**, Колибаба О. Б.// Промышленная энергетика. – 2015. – № 2. – с. 38-43.
17. Гусенкова Н.П. Совершенствование режимов нагрева насыпных садов в термических печах. Диссертация кандидата технических наук. ИГЭУ. Иваново. 2000 – 177 с..
18. Дзисько В.А. Физико-химические основы синтеза окислых катализаторов / Дзисько В.А., Карнаухов А.П. – Новосибирск.:Наука, 1978, 384 с.
19. Дмитриев Н.М. Фильтрация с предельным градиентом в анизотропных средах. Теория и эксперимент. / Дмитриев Н.М., Мамедов М.Т., Максимов В.М. // Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского. – 2011. – №4(3). – с. 749-750.
20. Дубинин М.М. Исследование пористой структуры активных углей комплексными методами / Дубинин М.М. // Успехи химии. – 1955. – Т.24. – № 1 – С.3.
21. Дубинин М.М. Исследование пористой структуры твердых тел твердых тел сорбционными методами / Дубинин М.М. // Журнал физ. Химии. – 1960. – Т.34. – №9 – 2019 с.
22. Дубинин М.М., Серпинский В.В. Адсорбция и пористость. Труды 4-й всесоюзной конференции по вопросам адсорбции. – М.: Наука, 1976 – с. 127.
23. Дульнев Г.Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов / Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.
24. Зарубин В.С. Теплопроводность однонаправленного волокнистого композита с комбинированными волокнами. / Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н., Савельева И.Ю. // Тепловые процессы в технике. – № 6. – 2014 – с. 269 - 273.
25. Зарубин В.С. Эффективный коэффициент теплопроводности композита с шаровыми включениями. / Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н., Савельева И.Ю. // Тепловые процессы в технике. – 2012. – №10 – с. 60 - 65.
26. Зарубин В.С. Теплопроводность композита, армированного волокнами / Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н., Савельева И.Ю. // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 2013. – №5. – с. 75 - 81.
27. Зарубин В.С. Эффективные коэффициенты теплопроводности композита с эллипсоидальными включениями / Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н. // Вестник МГТУ им. НЭ. Баумана. Сер. Естественные науки. – 2012. – №3. – с. 76-85.

28. Зарубин В.С. Сравнительный анализ оценок коэффициента теплопроводности композита с шаровыми включениями / Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н., Савельева И.Ю. // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. – 2013. – №7. – с. 299-318.

29. Зарубин В.С. Эффективный коэффициент теплопроводности композита с шаровыми включениями методом самосогласования/ Зарубин В. Кувыркин Г.Н., Савельева И.Ю. // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. электрон. Журн. – 2013. – №9.– с. 435-444.

30. Зарубин В.С. Эффективный коэффициент теплопроводности композита при непрерывном изменении теплопроводности промежуточного слоя между шаровыми включениями и матрицей / Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н. Савельева И.Ю. // Вестник ИГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «естественные науки». – 2012. – с. 95-102.

31. Зарубин В.С. Теплопроводность текстурированного композита с анизотропными эллипсоидальными включениями / Зарубин В.С. // Инженерный журнал: Наука и Инновации МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2013. – № 4. – с.12.

32. Зуев А.В. Расчетно-экспериментальное исследование процессов теплопереноса в высокопористых волокнистых материалах / Зуев А.В., Просунцов П.В., Майорова И.А. // Тепловые процессы в технике. – 2014 – т. 6. - № 9. – с. 410-419.

33. Казанцев Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. 2-е издание, дополненное и переработанное / Казанцев Е.И. – М.: Металлургия, 1975 – 368 с.

34. Каммерер И.С. Теплоизоляция в промышленности / Каммерер И.С. – М.: Госэнергоиздат, 1932 – 378 с.

35. Кауфман, Б.П. Теплопроводность строительных материалов / Б.П.Кауфман. – М.: ГИ литературы по строительству и архитектуре, 1955 - 157 с.

36. Крылова О.Б. Совершенствование режимов работы термических печей для нагрева насыпных садов. автореф. дис. на соиск. учен. степ. к. т.н / Ленингр. технол. ин-т. целлюлоз.-бумаж. пром-ти. Л., 1988. 16с.

37. Коноров А.М., Чуйко А.В. Современные изоляционные материалы в строительстве и технике / Коноров А.М., Чуйко А.В. – М.: Трудрезервиздат, 1958. – 159 с.

38. Кочергин С.В., Кобелев А.В., Хебтов Н.А. Нейронные сети и фрактальное моделирование электроэнергетических систем / Кочергин С.В., Кобелев А.В., Хебтов Н.А.// Fractal Simulation. – № 1. – 2012. – с. 6-15.

39. Кроновер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах. / Кроновер Р. М. – М.: Постмаркет, 2000. 352 с.

40. Курди́ков В.И. Разработка фрактальной математической модели шероховатости поверхности / Курди́ков В.И., Остапчук А.К., Овсянников В.Е., Рогов Е.Ю. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2008. – № 5. – с. 43-45.

41. Леонтьев Н.Е. Основы теории фильтрации. — М.: Изд-во ЦПИ при механико-математическом факультете МГУ, 2009. — С. 24–29. — 88 с.

42. Мальтер В.Л. Сложный теплообмен в шихтовых твердопористых материалах / Мальтер В. Л. // Вопросы теплообмена в электротермических установках. – 1983. – с. 3-8.

43. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы / Мандельброт Б. – М.: Ижевск, Ин-т компьютерных исследований, 2002. - 656 с.

44. Медведева, А. В. Аэродинамическое измерение пористости веществ / А. В. Медведева, Д. М. Мордасов // Вопросы современной 7 науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2012. – Вып. № 4(42). – С. 329 – 334.

45. Низовцев М.И. Экспериментальное исследование тепловых эффектов при увлажнении пористых сред / Низовцев М.И., Стерлягов А.Н., Терехов В.И. // Тепловые процессы в технике. – 2011. – № 3. – с. 127-132.

46. Пелевин Ф. В. Эффективность теплообмена в пористых сетчатых металлах при двумерном движении теплоносителя / Пелевин Ф. В., Пономарев А. В. // Тепловые процессы в технике. – №1. – 2014. – с.41-43.

47. **Перевезенцев Г.А.** Экспериментальное исследование влияния фильтрации на температурное поле насыпной садки / Перевезенцев Г.А. , Колибаба О.Б., Горбунов В.А. // Вестник ИГЭУ. – 2015. – № 5. – с. 37-41.

48. **Перевезенцев Г.А.** Фрактальная модель насыпной садки при ее нагреве в термической печи / Перевезенцев Г.А., Колибаба О.Б., Горбунов В.А.//Труды VIII международной научно-практической конференции «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. 100 лет отечественного проектирования печей». Сб. научн. тр. – М: Изд. Дом МИСиС. 2016. 141-146с.

49. **Перевезенцев Г.А.** Определение зависимости аэродинамического сопротивления насыпной садки от величины порозности и скорости фильтрации. / Перевезенцев Г.А., Колибаба О.Б., Горбунов В.А. // Вестник ИГЭУ. – 2019. – № 2. – с. 16-24.

50. **Перевезенцев Г.А.** Разработка математической модели термической печи с подовыми каналами и численное исследование параметров ее работы. / Перевезенцев Г.А., Колибаба О.Б., Горбунов В.А. // Вестник ИГЭУ. – 2019. – № 4. – с. 22-30.

51. **Перевезенцев Г.А.** Методика определения коэффициентов эффективной теплопроводности при нагреве пористых тел на основе использования

фракталоподобных структур / Горбунов В.А., Перевезенцев Г.А., Теплякова С.С., Мечтаева М.Н. // Вестник ИГЭУ. – 2022. – № 1. – с. 5-11.

52. **Перевезенцев Г.А.** Фрактальная модель насыпной садки при ее нагреве в термической печи / Перевезенцев Г.А., Колибаба О.Б., Горбунов В.А.//Труды VIII международной научно-практической конференции «Энергетически эффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. 100 лет отечественного проектирования печей». Сб. научн. тр. – М: Изд. Дом МИСиС. 2016. 141-146 с.

53. **Перевезенцев Г.А.** Экспериментальное исследование влияния дутья на температурное поле при нагреве пористой садки в термической печи / Перевезенцев Г.А., Колибаба О.Б., Горбунов В.А. // Тезисы докладов международной научно-технической конференции «XVIII Бенардосовские чтения». – Иваново, 2015. Т. 2. – с. 213-216.

54. **Перевезенцев Г.А.** Использование фрактальной геометрии для моделирования процессов в термической нагревательной печи/ Перевезенцев Г.А., Колибаба О.Б., Горбунов В.А. // Тезисы докладов международной научно-технической конференции «XIX Бенардосовские чтения». – Иваново, 2017. Т. 2.-с. 261-264.

55. **Перевезенцев Г.А.** Разработка методики определения коэффициента теплопроводности насыпной садки в термической печи / Перевезенцев Г.А., Колибаба О.Б., Горбунов В.А. // Тезисы докладов международной научно-технической конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования-2013». – МЭИ, 2013. – с. 135-139.

56. **Перевезенцев Г.А.** Анализ влияния радиационного теплообмена на теплофизические свойства пористых тел/Теплякова С.С., Перевезенцев Г.А., Горбунов В.А. // Тезисы докладов XVII всероссийской (IX международной) научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2022». – ИГЭУ, 2022.

57. **Погосбемян М.Ю.** Экспериментальное исследование влияния технологических параметров на фильтрацию газов через стержневые смеси / Погосбемян М.Ю. Погосбемян Ю.М. Шухарев С.Е. // Технология металлов. – № 5. – 2013. – с. 49-52.

58. **Поляков А.Ф.** Теплообмен в пористой металлической оболочке. / Поляков А.Ф. // Тепловые процессы в технике. – № 10. – 2010. – с. 466-470.

59. **Померанцев В.В.** Исследование процессов горения натурального топлива / Померанцев В.В. //Исследование процессов горения натурального топлива. – 1948.

60. **Пугачев О.В.** Эффективная теплопроводности композита с шаровыми включениями / Пугачев О.В., Хан З.Т. // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. – 2015. – № 6. – с. 99-111.

61. Пугачев О.В. Теплопроводность композита с нетеплопроводными шаровыми включениями / Пугачев О.В., Хан З.Т. // Наука и Образование. МГТУ им. н.э. Баумана. Электрон. журн. – 2015. – № 5. – с. 205-217.
62. Пуговкин А.У. Рециркуляционные пламенные печи / А.У. Пуговкин. – Л.: Машиностроение, 1975. – 200 с.
63. Равшанов Н. Компьютерное моделирование процесса фильтрации флюидов в пористых средах / Равшанов Н., Курбонов Н.М. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2015. – т. 4, № 2. – с. 89-104.
64. Ребиндер П.А. О Механической прочности пористых дисперсных тел / Ребиндер П.А., Щукин Е.Д., Марголис Л.Я. // ДАН. – 1964. – т. 154. – № 3. – с. 695-698.
65. Рудых О.Л. Расчет тепло- и массопереноса в пористых телах методом конечных элементов // Инж. физич. журнал, т. 42, №6 с. 1026-1029.
66. Санчес-Паленсия Э. Неоднородные среды и теория колебаний / Пер. с англ. под ред. О.А.Олейник. — М.: Мир, 1984. — С. 176. — 472 с.
67. Скрыбин В.А. Особенности формирования пористой структуры поверхности при финишной абразивной обработке деталей из порошковых материалов / Скрыбин В.А. // Технология металлов. – № 2. – 2015. – с. 23-28.
68. Слонов А.Л. Фрактальные модели процесса текучести дисперсно-наполненных композитов на основе полипропилена / Слонов А.Л., Козлов Г.В., Заиков Г.Е., Микитаев А.К. // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – № 20. – т. 16. – с. 115-118.
69. Стрелов К.К. Структура и свойства огнеупоров / Стрелов К.К. – М.: Металлургия, 1972. – 215 с.
70. Сухинов А.И. Математическое моделирование фильтрации двухфазной жидкости на основе модифицированного адаптивного метода минимальных поправок / Сухинов А.И., Григорян Л.А., Сухинов А. А. // Вестник Донского государственного технического университета. – 2016. – №3 (86). – с. 96-109.
71. Тайц Н.Ю. Технология нагрева стали / Тайц Н.Ю. – М.: Металлургиздат, 1962. – 568 с.
72. Тихомиров В.П. Протекание через фрактальную пористую среду / Тихомиров В.П., Горленко О.А., Измеров М.А. // Известия Самарского научного центра РАН. – 2011. – № 4-3. – т. 13. – с. 897-902.
73. Федер Е. Фракталы / Федер Е. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
74. Федосеев, С.В. Использование фрактальной геометрии при создании моделей установки фильтрации ТБО в пакете Ansys / Федосеев С.В., Горбунов В.А. // Вестник ИГЭУ. – № 7. – 2015.
75. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / Фокин К.Ф. – М.: Госстройиздат, 1953. – 252 с.

76. В. Хейлигенштедт . Теплотехнические расчеты для конструкции печей и их эксплуатации: переводное издание / В. Хейлигенштедт ; ред. В. Н. Можаров ; пер. В. Н. Новаковский. - Харьков: ОНТИ НКТП Гос. научно - техн. изд-во Украины, 1937. – 170 с.
77. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов / Чудновский А.Ф. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1962 г. - 456 с.
78. Шипилов, В.М. Планирование теплофизического эксперимента / В.М. Шипилов, Е.Н. Гнездов // Иваново: ИВГУ, 1981. – 76 с.
79. Шишков М.М., Шишков А.М. СНГ. Марочник сталей и сплавов ведущих промышленных стран мира. Справочник. Изд. третье, дополненное / Шишков М.М., Шишков А.М. – Донецк: Юго-Восток, 2005. – 576 с.
80. Шишков М.М. Марочник сталей и сплавов. Справочник. / Шишков М.М. – С.-ПБ.: АНО НПО Профессионал, 2002. – 1066 с.
81. Янковский А.П. Численно-аналитическое моделирование процессов теплопроводности в пространственно-армированных композитах при интенсивном тепловом воздействии / Янковский А.П. // Тепловые процессы в технике. – 2011. – Т.3 – № 11. – с. 500-516.
82. Al-Amiri A. Steady-state conjugate natural convection in a fluid-saturated porous cavity / Al-Amiri A., Khanafer K., Pop I. // Int. J. Heat Mass Transfer. — 2008. — Vol. 51. — P. 4260–4275.
83. ANSYS Fluent User's Guide. Release 15.0. – ANSYS, Inc. November 2013. – 2692 p.
84. Brinkman H.C. A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles / Brinkman H.C. // Appl. Sci. Res. – 1947. – Vol. A1.
85. Chen Y.-M. Ultra high thermal conductivity polymer composites / Chen Y.-M., Ting J.-M. // Carbon. 2002. Vol.40, no.3. P. 359—362.
86. Dauphinee T.M. McDonald D.K. Proc.Roy.Soc., A 221, № 1145, 1954.
87. Mandelbrot B. Fractals: Form, Chance and Dimension. / Mandelbrot B. – San Francisco (CA): W.H. Freeman and Co. – 1977. – 265 p.
88. Mandelbrot B. The Fractal Geometry of Nature / Mandelbrot B. – New York: W.H. Freeman and Co. – 1982. – 461 p.
89. Mobedi M. Conjugate natural convection in a square cavity with finite thickness horizontal walls / Mobedi M. // Int. Comm. Heat Mass Transfer. — 2008. — Vol. 35. — P. 503–513.
90. Nan C.-W. Effective thermal conductivity of particulate composites with interfacial thermal resistance / Nan C.-W., Birringer R., Clarke D.R., Gleiler H. // Journal of Applied Physics. – 1997. – Vol. 81

91. Saeid N.H. Conjugate natural convection in a vertical porous layer sandwiched by finite thickness walls / Saeid N.H. // *Int. Comm. Heat Mass Transfer*. — 2007. — Vol. 34. — P. 210–216.

92. Saeid N.H. Conjugate natural convection in a porous enclosure: effect of conduction in one of the vertical walls / Saeid N.H. // *Int. J. Thermal Sciences*. — 2007. — Vol. 46. — P. 531–539.

93. Vafai K. Boundary and inertial effects on flow and heat transfer in porous media / Vafai K., Tien C.L. // *Int. J. Heat Mass Transfer*. — 1981. — Vol. 25. — P. 195–203.

94. Wegst C.W. STAHLSCHLUSSEL (Key to steel). – VERLAG STAHLSCHLUSSEL WEGST GMBH. 2004. – 720 p.

95. Патент на изобретение РФ №139405 Проходная термическая пламенная печь / Горбунов В.А., Колибаба О.Б., **Перевезенцев Г.А.**, Сулейманов М.Г. заявл. 04.12.2013; зарегист. 17.03.2014.

96. Федеральный закон "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации" от 23.11.2009 N 261-ФЗ. [Электронный ресурс]. – Режим доступа http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978.

97. Государственная программа Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года». [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://docs.cntd.ru/document/902256884>.

98. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://minenergo.gov.ru/node/1026>.

99. Пористость // Малый энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона : в 4 т. — СПб., 1907. — 1909 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Акт внедрения в производство



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящий акт составлен в том, что в кузнечно-прессовом цехе ООО «ССМ-Тяжмаш» рассмотрена модель «Проходная термическая пламенная печь» (рег. № 2013153798 от 04.12.2013г.), разработанная в Ивановском Государственном энергетическом университете имени В.И. Ленина Горбуновым В.А., Колибабой О.Б., Перевезенцевым Г.А., Сулеймановым М.Г. Внедрение модели позволит сократить время пребывания металла в печи за счет организации фильтрации продуктов сгорания через садку.

Данная модель признана полезной и предложена для включения в стратегический план развития.

Старший менеджер

Жульков С.Р.

Старший менеджер
по металлургической теплотехнике

Голубенков К.Е.

Патент на полезную модель

