

На правах рукописи



ПЕРЕВЕЗЕНЦЕВ Григорий Александрович

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

Специальность: 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент **Горбунов Владимир Александрович**

Официальные оппоненты:

Гаряев Андрей Борисович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», заведующий кафедрой «Тепломассообменные процессы и установки»;

Нешпоренко Евгений Григорьевич, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова», заведующий кафедрой «Теплотехнические и энергетические системы».

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Череповецкий государственный университет», г. Череповец.

Защита состоится « 24 » июня 2022 года в 11-30 на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 150003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте Ивановского государственного энергетического университета.

Текст диссертации размещен: http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Perevezencev_G.A._0.pdf

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан « ___ » _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.064.01



Ледуховский
Григорий Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 садков.

Степень разработанности темы исследования. Проблемами повышения эффективности работы нагревательных печей при нагреве насыпных садков 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 садков 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 садков.

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

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 садов с целью повышения энергетической эффективности;
- 6) разработка режима термической обработки насыпных садов модернизированной конструкции печи и определение экономической эффективности.

Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 05.14.04 - Промышленная теплоэнергетика.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности в *части формулы специальности*: «ведется поиск структур и принципов действия теплотехнологического оборудования, которые обеспечивают сбережение энергетических ресурсов, уменьшение энергетических затрат на единицу продукции...».

Соответствие диссертации *области исследования специальности*: пункту 3 «Теоретические и экспериментальные исследования процессов тепло- и массопереноса в тепловых системах и установках...»; пункту 5 «Оптимизация параметров тепловых технологических процессов ... установок, использующих тепло, с целью экономии энергетических ресурсов...».

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 садов, 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 садов в нагревательной печи; *результаты оценки влияния* фильтрации теплоносителя на время нагрева насыпных садов; *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 садов 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 садов 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 садов, 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 садов 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 садов 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 садов с различной величиной порозности в нагревательных печах при различных условиях нагрева.

Алгоритм расчета и результаты численных экспериментов по нагреву насыпных садов в термических печах при замене реальных насыпных садов 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.

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.

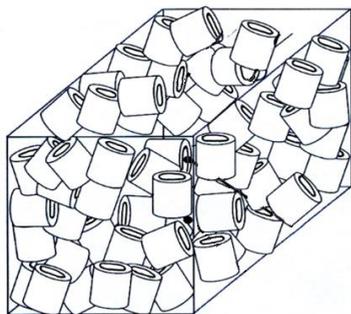
СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы работы, определены ее общая цель и решаемые задачи, указана научная новизна, практическая ценность и научная значимость, показана структура работы.

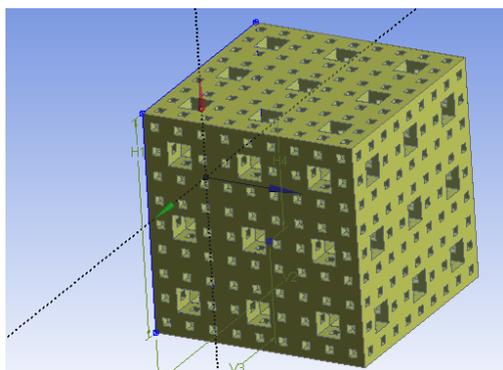
В **первой главе** показан обзор современной научно-технической литературы, проведен анализ существующих методов, как численного моделирования, так и расчетных методов определения тепловых потоков, а также эффективных теплофизических коэффициентов в стационарных и нестационарных процессах нагрева тел, имеющих поры.

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. Часто исследователями применяются не аналитические методы решения, а инженерные, включающие ряд допущений и упрощений, применимых только в ряде конкретных задач.

В результате анализа численных моделей теплообмена в насыпных структурах, было выявлено, что при нагреве металла часто сложная модель, заменяется однородным эквивалентным сплошным телом с эффективными теплофизическими свойствами. В таких задачах параметры теплопроводности, теплоемкости зависят от температуры, и их поиск является трудновыполнимой задачей.



а)



б)

Рисунок 1 – Общий вид: а)-контейнер с насыпной садкой, б)-геометрическая фрактальная модель

Моделирование насыпных структур со сложной геометрией вызывает ряд непреодолимых затруднений, в частности построение модели садки, состоящей из большого количества хаотично расположенных элементов. Для разрешения затруднений, связанных с построением подобных сложных геометрических структур, предлагается использовать фрактальную геометрию. Были рассмотрены

типы фракталов, была дана характеристика известных фрактальных структур, включающая фрактальную размерность.

По результатам обзора литературных источников были сформулированы основные задачи исследования.

Во **второй главе** приведена методика проведения численного эксперимента по расчету процесса нагрева насыпной садки в нагревательной печи. При численном эксперименте насыпная садка заменяется геометрической фрактальной структурой (рисунок 1), построенной на основе 3-D фрактала «губки Менгера».

Подобная модель позволяет исследовать разнообразные структуры, величина порозности которых может изменяться в пределах от 0,2 до 0,99. Еще одним достоинством подобной структуры, является возможность производить расчет процессов теплообмена для газовой и твердой сред напрямую, не используя эффективные теплофизические коэффициенты. Для расчета составляющей теплообмена в твердом скелете применяется дифференциальное уравнение Фурье-Кирхгофа с зависимостью теплоемкости и теплопроводности от температуры. При расчете массообмена газовой среды в порах используется система дифференциальных уравнений Навье-Стокса.

Для замены реальной структуры эквивалентной геометрической фрактальной моделью необходимо определить требуемое значение ранга фрактального разбиения, для чего на графике (рисунок 2) представлена зависимость величины порозности от ранга разбиения.

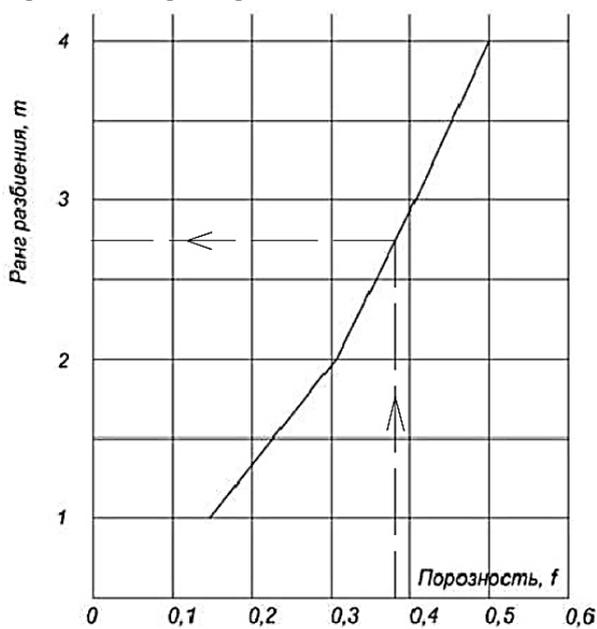


Рисунок 2 – Значение порозности при 1-4 рангах фрактального разбиения

При выборе эквивалентной модели реальной структуры одной этой зависимости недостаточно. В связи с этим необходимо ввести параметр, который учитывает степень развития поверхности пор, приближая 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.

$$R_v = \frac{V}{F_{пор}}, \quad (1)$$

где V -объем тела $м^3$,

$F_{пор}$ -площадь поверхности пор, $м^2$.

Для учета геометрии и структуры садок, величина порозности которых отличается от вариативного ряда, характерного для классической фрактальной структуры, предлагается ввести понятие коэффициента модификации модели.

$$k_m = \frac{a}{h}, \quad (2)$$

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

Связь между эффективным размером пор, R_v и числом разбиений исходного рангового элемента фрактальной модели, т.е. коэффициентом модификации, k_m приведена на рисунке 3, на котором представлена зависимость R_v от k_m для пяти рангов фрактального разбиения m . Совместное использование графиков (рисунок 2 и рисунок 3) дает возможность корректного подбора фрактальной модели. Например, определив величину порозности насыпной садки, по рисунку 2 находим предварительный ранг разбиения фрактальной модели. Определяем эффективный размер пор насыпной садки. Затем по рисунку 3 по заданному значению R_v и требуемому рангу разбиения модели определяем коэффициент модификации модели.

Например, для садки со значением порозности 0,38 (рисунок 3 пунктирная линия) ранг разбиения фрактальной модели может быть выбран как 2-й, так и 3-й. Величина R_v для садки со значением порозности равным 0,38, состоящей из элементов типа кольца 32 мм, толщина стенки 2 мм, длиной 20 мм составляет $R_v = 2,02 \cdot 10^3$. По рисунку 2 (пунктирная линия) под заданные параметры подходят модели с рангом разбиения равным 2 при коэффициенте модификации $k_m = 1,1$, и модель с рангом разбиения равным 1 с коэффициентом модификации равным 2,9.

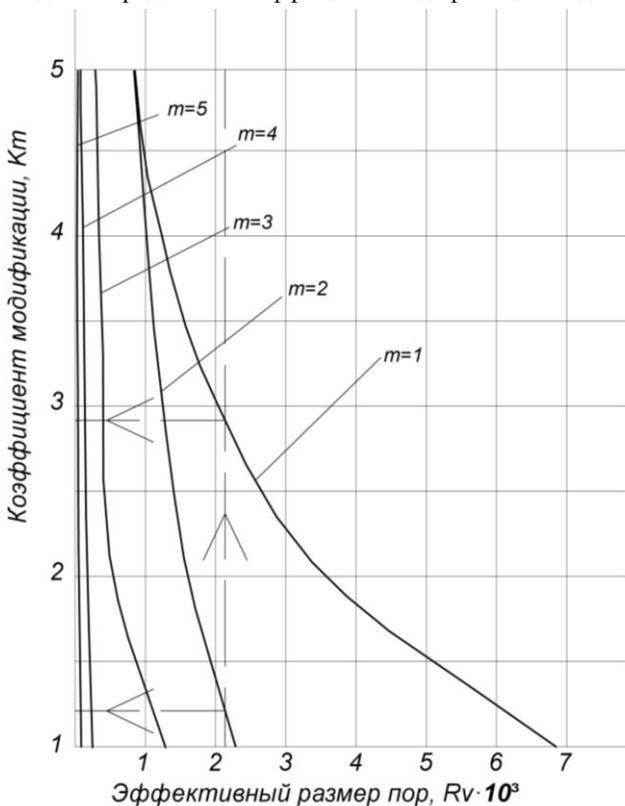


Рисунок 3 – Зависимость R_v от k_m

В нашем случае, исходя из условий точности расчета, а также экономии времени, необходимого для численного моделирования, выбор останавливаем на модели 2-го ранга разбиения.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию нагрева насыпных садок, состоящих из 4-х типов конструктивных элементов.

Исследование было проведено на базе кафедры «Энергетика технологий и газоснабжение» Ивановского государственного энергетического университета им. В.И. Ленина.

Целью исследования являлось экспериментальное определение температурного поля насыпной садки при 4-х режимах нагрева.

Экспериментальный нагрев насыпной садки проводился в нагревательной камерной электрической печи СНОЛ 36/14. Нагреваемая насыпная садка, представляла собой множество одинаковых, хаотично расположенных структурных элементов, помещенных в стальной контейнер. Форма контейнера - прямоугольный параллелепипед с размерами $0,1 \times 0,1 \times 0,25$ м. Нижняя стенка перфорирована отверстиями диаметром 10 мм с шагом 20 мм. Заготовки в контейнере располагались хаотично. Подача предварительно подогретого воздуха осуществлялась через входное отверстие диаметром 20 мм.

Насыпная садка формировалась из 4-х типов садок, состоящих из следующих структурных элементов:

- кольца $d_{к1}=22$ мм, толщина стенки $\delta=2$ мм, длиной $l_к=20$ мм;
- кольца $d_{к2}=32$ мм, толщина стенки $\delta=2$ мм, длиной $l_к=20$ 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.

В ходе эксперимента в разогретую печь через загрузочную дверь помещался контейнер с нагреваемой садкой. Для исключения затрат энергии на аккумуляцию

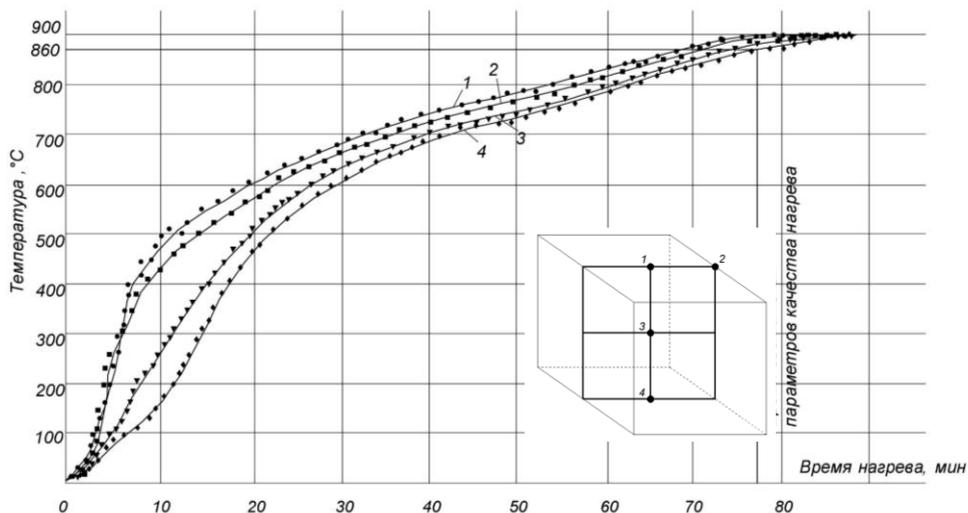


Рисунок 4 – Результаты измерения температурного поля насыпной садки с величиной порозности $f=0,858$ при отсутствии фильтрации при температуре внутри печи 900 °C

кладкой печи и нагревательными элементами насыпная садка помещалась в предварительно разогретую печь. Измерение температурного поля садки при нагреве производилось при помощи термопар, закрепленных в характерных точках. Сигнал с термопар подавался на аналоговый модуль МВА-7 и далее обрабатывался на компьютере.

В процессе экспериментального исследования были получены данные для 4-х различных типов садок. Исследование проводилось при 4 режимах нагрева:

- 1) температура внутри печи 900 °С, без фильтрации;
- 2) температура внутри печи 400 °С, фильтрация теплоносителя отсутствует;
- 3) температура внутри печи 400 °С, расход теплоносителя, подаваемого для фильтрации 0,0039 м³/с;
- 4) температура внутри печи 400 °С, расход теплоносителя, подаваемого для фильтрации 0,0092 м³/с.

Первый режим соответствует полному отжигу стали. Второй режим соответствует операции среднетемпературного отпуска.

Для каждого из проведенных опытов были построены графики, представляющие собой изменение температуры в характерных точках насыпной садки во времени. В качестве примера на рисунке 4 приведен график изменения температуры садки в характерных точках до достижения времени с заданными параметрами качества нагрева насыпной садки.

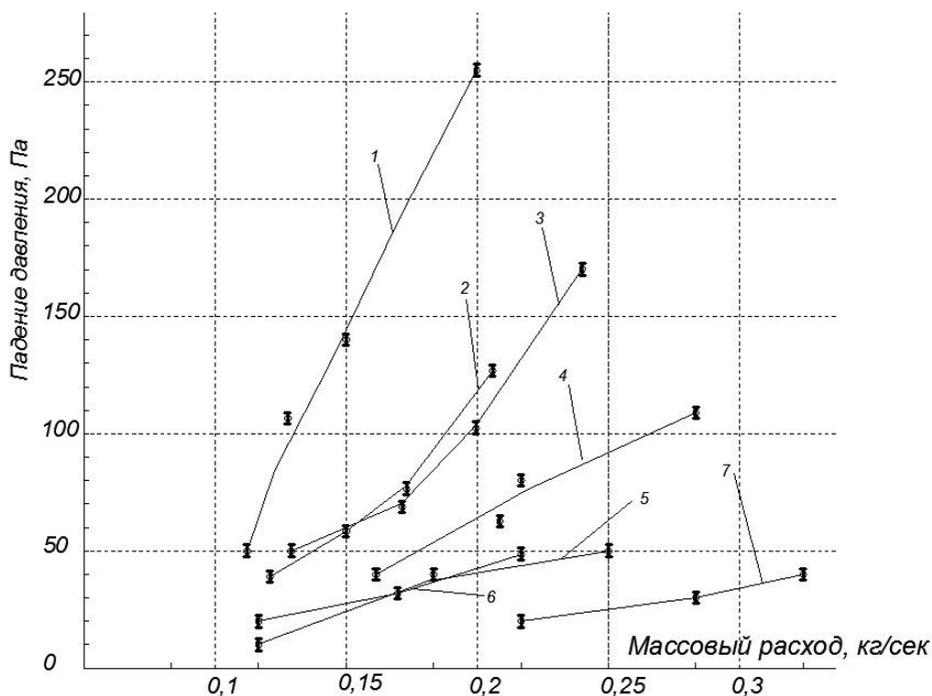


Рисунок 5 – Падение давления в садках с величиной порозности f : 1) 0,345; 2) 0,485; 3) 0,733; 4) 0,836; 5) 0,888; 6) 0,846; 7) 0,881

При нагреве до $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ - параметром качества нагрева является температурный перепад в $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, при нагреве до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ - параметром качества нагрева является перепад в $10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При нагреве насыпных садок с фильтрацией теплоносителя важным параметром также является значение гидродинамического сопротивления слоя садки, для определения которого было проведено экспериментальное исследование.

В ходе эксперимента по воздуховоду с помощью дутьевого вентилятора подается воздух для фильтрации через насыпную садку. Измерялся расход воздуха и перепад давления в точке входа потока воздуха в насыпную садку, и в точке верхней границы насыпной садки.

В результате исследования были получены зависимости величины падения давления в насыпной садке для слоя высотой $h_{ст}=0,1\text{ м}$, показанные на рисунке 5. Суммарная погрешность эксперимента составила $9,93\%$.

На основе экспериментальных данных была получена зависимость $\Delta P=f(G, f)$ с погрешностью не более 5% , где массовый расход G изменялся в пределах $0,1 - 0,3\text{ кг/с}$, а величина порозности f в диапазоне $0,345$ до $0,888$.

Полученная зависимость имеет следующий вид:

$$\Delta P(G, f) = -69,8 - 142 \cdot G + 113 \cdot f + 227 \cdot G^2 - 1,75 \cdot f^2 - 102 \cdot G \cdot f, \quad (3)$$

где f - величина порозности, G – массовый расход, кг/сек .

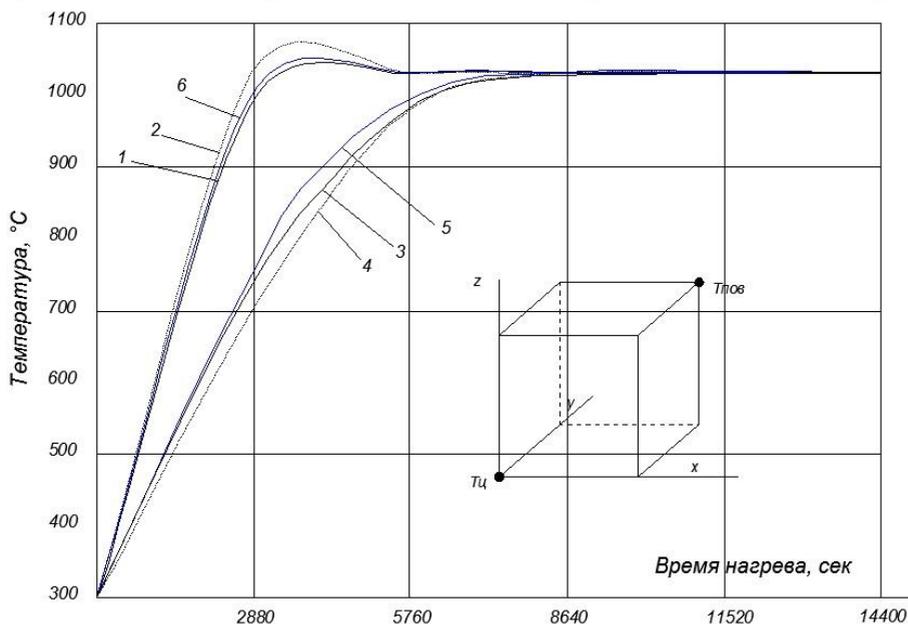


Рисунок 6 – Температурное поле в точках: 1 - твердая структура на поверхности, 2 - газовая среда на поверхности, 3 - газовая среда в тепловом центре, 4 - твердая структура в тепловом центре, 5 - тепловой центр (пористая призма), 6 - поверхность (пористая призма)

Четвертая глава посвящена верификации предложенной геометрической фрактальной модели. Для подтверждения предложенной методики кроме сравнения с экспериментальными данными было проведено сравнение с результатами, полученными другими учеными.

В одной из работ Гусенковой Н.П. 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.

Результаты численного моделирования процесса нагрева пористой садки по предложенной методике сравнивались с результатами, полученными в работе, где пористую садку предлагается заменить на анизотропную призму с эффективными теплофизическими свойствами. Результаты сравнения представлены на рисунке 6.

Другой автор – Крылова О.Б. рассматривает нагрев неограниченной пористой пластины с учетом фильтрации газа. Результаты, представленные в работе автора (А), сравнивались с результатами, полученными при расчете нагрева по предложенной методике (М). Результаты сравнения представлены на рисунке 7.

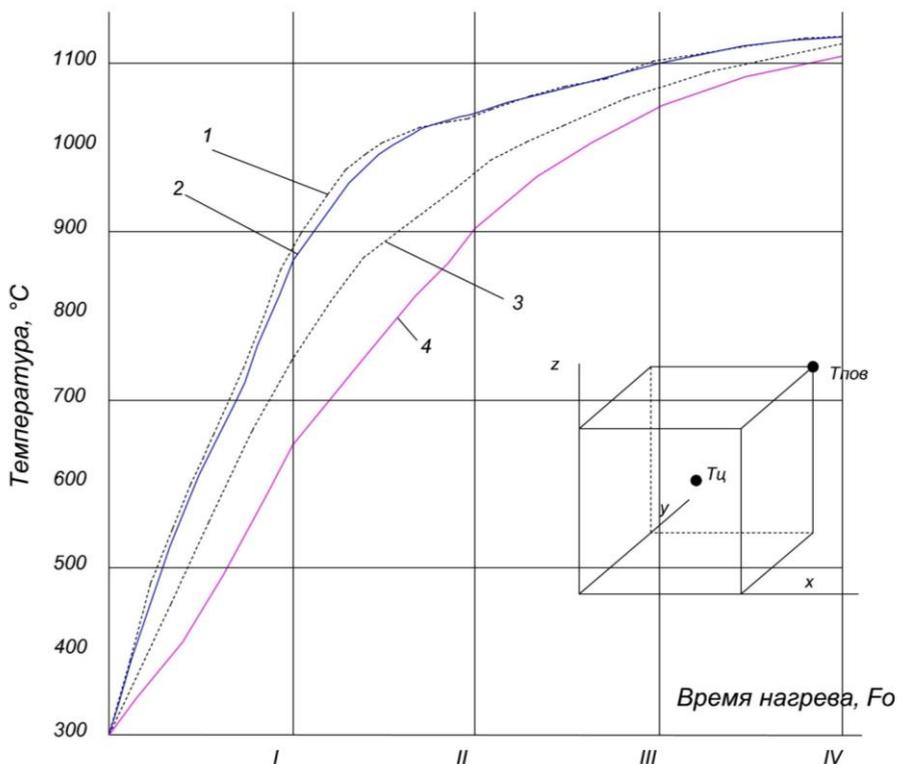


Рисунок 7 – Температурное поле моделей: 1 - поверхность (М); 2 - поверхность, (А); 3 - тепловой центр (М); 4 - тепловой центр (А)

Полученные результаты позволяют говорить о корректности предложенной геометрической фрактальной модели насыпной садки. Величина отклонения составляет порядка 10%. Наибольшее отклонение наблюдается при времени нагрева от 2500 до 5000 с. Можно сделать вывод о возможности использования предложенной модели геометрической фрактальной структуры насыпной садки, т.к. определенные таким образом значения температурного поля, согласуются с расчетными данными других авторов, полученными расчетными методами с использованием эффективных теплофизических свойств.

Для верификации предлагаемой модели была выбрана насыпная садка с величиной порозности $f=0,858$, состоящая из конструктивных элементов в форме колец 22 мм, толщиной стенки 2 мм, длиной 20 мм. В программном комплексе ANSYS была построена 3-D геометрическая фрактальная модель насыпной садки в камерной нагревательной печи. На рисунке 8 в качестве примера представлены полученные при моделировании значения изменения температур в характерных точках предложенной модели при наличии и отсутствии фильтрации теплоносителя.

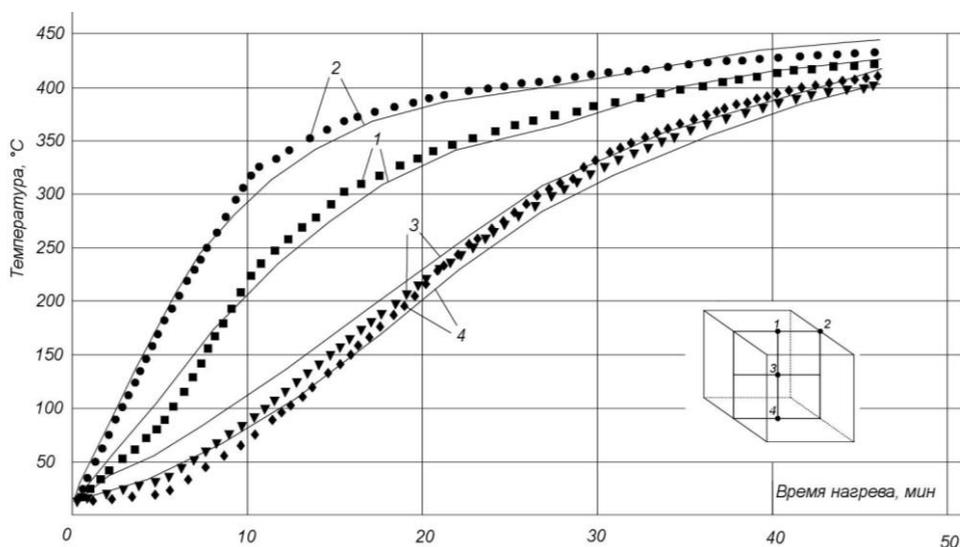


Рисунок 8 – Значения температур в точках насыпной садки, состоящей из конструктивных элементов в форме колец $d=22$ мм, (величина порозности $f=0,858$) при отсутствии дугтя:

сплошная линия – 1- расчетное значение температуры по предложенной методике в характерной точке №1; ■ - экспериментальное значение температуры в характерной точке №1, сплошная линия – 2- расчетное значение температуры по предложенной методике в характерной точке №2; ● - экспериментальное значение температуры в характерной точке №2, сплошная линия – 3- расчетное значение температуры по предложенной методике в характерной точке №3; ▼ - экспериментальное значение температуры в характерной точке №3, сплошная линия – 4- расчетное значение температуры по предложенной методике в характерной точке №1; ◆ - экспериментальное значение температуры в характерной точке №4

Для верификации численной модели процесса нагрева насыпной структуры недостаточно моделирования только одного процесса стационарного нагрева. Насыпная садка обладает гидродинамическим сопротивлением, в конечном итоге влияющим на весь процесс теплообмена. Поэтому в этой же главе приводятся результаты верификации модели с учетом гидродинамического сопротивления при процессе фильтрации теплоносителя через насыпные садки различной плотности. Для верификации было выбрано экспериментальное исследование величины падения давления воздуха при прохождении через слой насыпной садки состоящей из колец, диаметром 22 мм, для чего была построена геометрическая фрактальная модель насыпной садки.

В качестве начальных условий задавался массовый расход потока газа, соответствующий задаваемой при проведении эксперимента скорости газа при фильтрации через насыпную структуру. Вход газа в модели осуществлялся в нижней части модели, выход осуществлялся через верхнюю стенку. На боковых стенках задавалось свойство непроницаемости, что соответствует закрытому контейнеру.

На рисунке 9 показана зависимость величины падения давления от скорости фильтрации, при численном моделировании в сравнении с экспериментально измеренным значением для садки, имеющей аналогичную величину порозности.

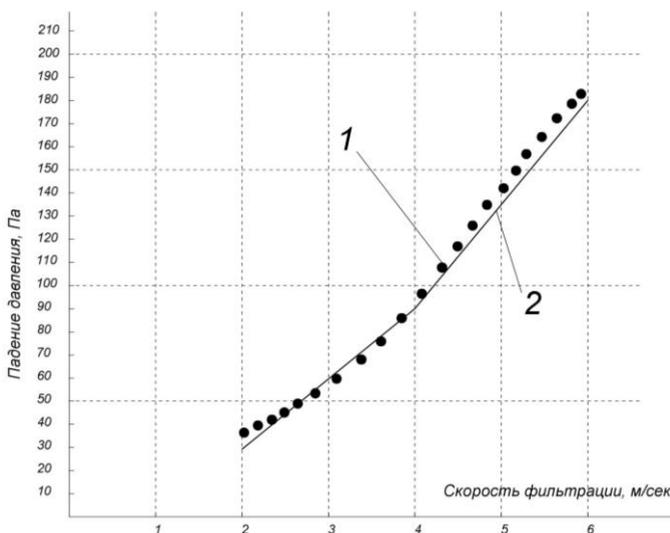


Рисунок 9 – График зависимости величины падения давления для садки с величиной порозности $f=0,439$: 1 - экспериментальные значения; 2 - численная модель

В **пятой главе** описывается методика повышения энергетической эффективности процесса нагрева в нагревательной печи, а именно, предлагается организовать процесс фильтрации теплоносителя через объем насыпной садки. Это позволит интенсифицировать процесс теплообмена.

Предлагается в печи организовать дополнительную фильтрацию теплоносителя сквозь объем садки в продольном направлении с помощью

равномерно расположенных подовых каналов, идущих из подподовых топков. Повышение эффективности процесса нагрева достигается за счет того, что через равномерно расположенные подовые каналы поступает смесь, которая фильтруется через объем насыпной садки в вертикальном направлении, интенсифицируя процесс нагрева (рисунок 10).

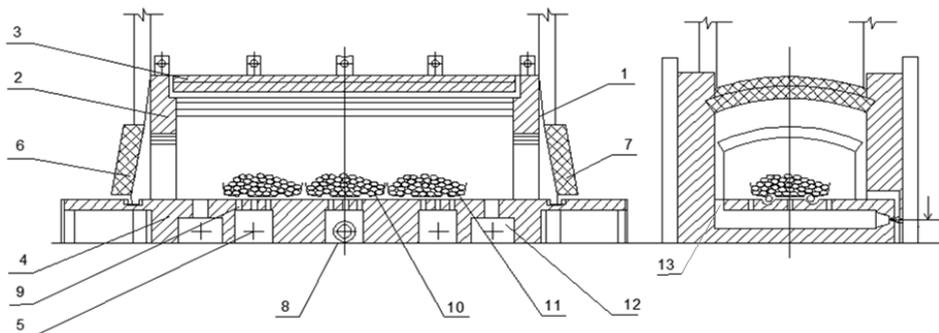


Рисунок 10 – Схема печи с подовыми каналами: 1 - наружная обмуровка печи; 2 - внутренняя обмуровка печи; 3 - верхняя обмуровка печи; 4 - под печи; 5 - подподовые топки; 6 - окно загрузки; 7 - окно выгрузки; 8 - газовые горелки; 9 - подовые каналы; 10 - поддоны; 11 - перфорированное основание поддонов;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

В работе предлагается организовать работу печи следующим образом. В предварительно разогретую печь, загружают на поддонах подвергаемые термообработке мелкие изделия.

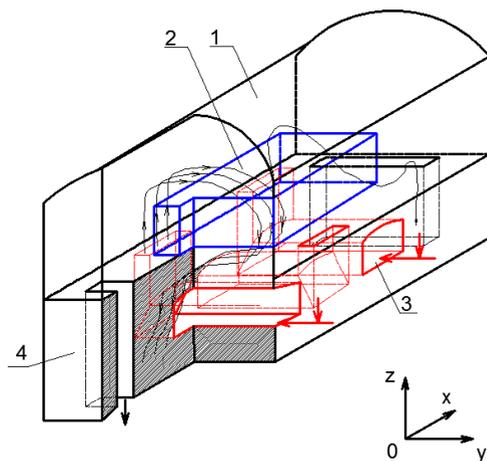


Рисунок 11 – Модель печи с подовыми каналами: 1 - рабочее пространство печи, 2 - нагреваемая садка, 3 - подподовые топки, 4 – дымопады

Поддоны представляют собой сплошные открытые в верхней части контейнеры. Для обеспечения процесса фильтрации сквозь насыпную садку основания поддонов перфорированы. В результате сжигания газа, образующиеся в подподовых топках, продукты сгорания попадают в рабочее пространство печи обычным способом, а также через специальные подовые каналы,

выполненные в поду печи.

Дымовые газы поступают в рабочее пространство печи, омывают ее по поверхности и дополнительно фильтруются через нее. Нагретую до необходимой по техническим условиям температуры насыпную садку выгружают через окно выгрузки (7). Продукты сгорания удаляют из печи через дымопады, расположенные в поде у торцевых стен.

Для определения режимных параметров, получаемых в процессе нагрева, была построена подробная численная модель садочной печи (рисунок 11).

В качестве инструмента для определения режимов нагрева насыпных садок для предложенной конструкции печи использовалась модель печи, в которой нагреваемая садка представлялась в виде геометрической фрактальной структуры.

После верификации были рассчитаны 2 режима нагрева насыпной садки в модифицированной конструкции печи, до параметров качества (температурный перепад 40^0) с фильтрацией и без нее.

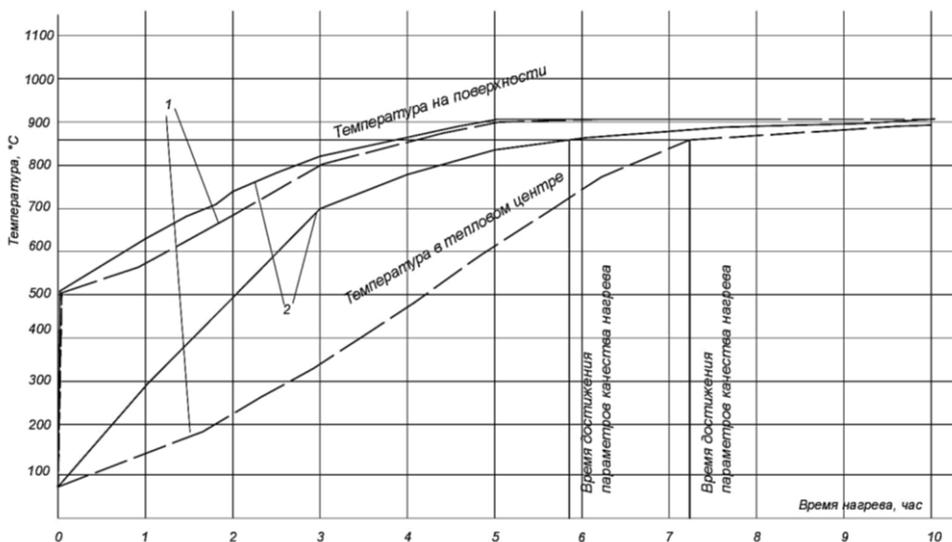


Рисунок 12 – Температурные поля на поверхности и в тепловом центре садки: 1 - при отсутствии фильтрации, 2 - при скорости фильтрации 0,05 м/с

На рисунке 12 приведен график температур на поверхности и в тепловом центре садки при различных режимах фильтрации теплоносителя через подовые каналы.

Как видно из рисунка при организации дополнительной фильтрации теплоносителя через каналы, расположенные в поду печи увеличивается интенсивность процесса нагрева садки. Уменьшается время нагрева технологического материала до заданных параметров на 1,3 часа. Снижение времени протекания технологического процесса влияет на величину потребления газа, потребляемого горелками печи, уменьшая на 19,3%.

Предлагаемая модернизация печи была предложена к внедрению на производстве ПАО «Северсталь» г. Череповец.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

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%.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По перечню рецензируемых изданий ВАК

1. Горбунов В.А. Использование фрактального подхода при моделировании температурных полей насыпных садок в термических печах / Горбунов В.А., **Перевезенцев Г.А.**, Колибаба О. Б. // Промышленная энергетика. – 2015. – № 2. – с. 38-43.

2. **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.

3. **Перевезенцев Г.А.** Метод фрактального моделирования насыпной садки при ее нагреве в термической печи. / Перевезенцев Г.А., Горбунов В.А., Колибаба О.Б. // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2017. – № 1. – 84-87с.

4. **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.

5. **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.

6. **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.

Публикации в других изданиях

7. **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. 141-146 с.

8. **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.

9. **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.

10. **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.

11. **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.

Результаты интеллектуальной деятельности

12. Патент на полезную модель 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.

ПЕРЕВЕЗЕНЦЕВ Григорий Александрович
ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ ПРИ НАГРЕВЕ НАСЫПНЫХ САДОК
Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Подписано в печать 14.04.2022 г. Формат 60×80¹/₁₆.
Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ № 15.
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34.
Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ