

На правах рукописи



ТИТАЕВ Александр Анатольевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ НАГРЕВА
ГОРЯЧЕДЕФОРМИРОВАННЫХ ТРУБ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2015

Работа выполнена на кафедре «Теплофизика и информатика в металлургии» Института материаловедения и металлургии ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Лисиенко Владимир Георгиевич

Официальные оппоненты: **Парсункин Борис Николаевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», профессор кафедры автоматизированных систем управления;

Вохмяков Александр Михайлович, кандидат технических наук, ООО «Научно-производственная компания «УралТермоКомплекс», начальник производственно-технического отдела

Ведущая организация ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники», г. Екатеринбург

Защита состоится «25» декабря 2015 г. в 17:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.05 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://dissovet.science.urfu.ru/news2/>

Автореферат разослан «09» ноября 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Сулицин Андрей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время в России происходит значительное расширение сектора трубного производства. Традиционно для нашей страны большая часть объема трубной продукции используется нефтегазодобывающей отраслью: идет разработка новых месторождений, проектируется и расширяется система трубопроводов, коммуникаций, создаются новые нефтегазоперерабатывающие комплексы. Определяющее воздействие на прочностные и пластические свойства трубного продукта оказывает этап нагрева труб в пламенных печах. При этом параллельно с ужесточением требований к точности производства наблюдается тенденция к повышению энергосбережения и увеличению эффективности использования имеющихся производственных ресурсов. Значительные объемы природного топлива, сжигаемого в процессе нагрева металла, требуют как разработки новых экономичных схем использования данного ресурса, так и повышения эффективности старых. Существенным препятствием на пути к этой цели является сложность и дороговизна требуемых промышленных экспериментов. Выходом в этой ситуации может стать анализ теплофизических процессов, происходящих в печи, с использованием математической модели.

Степень разработанности темы

В настоящее время возможности различных расчетных методик для анализа теплообмена излучением, как основного механизма теплопередачи при нагреве труб в печи, ограничены. Классические упрощенные методики не позволяют рассчитать детальную картину температурного профиля при нагреве металла. В то же время, все большее распространение получает расчет теплофизических процессов с использованием коммерческих программ для расчета вычислительной гидродинамики (CFD). Альтернативой данным методам являются варианты зонального метода расчета теплообмена излучением. Однако они нуждаются в усовершенствовании в части упрощения расчета обобщенных угловых коэффициентов, учитывающих свойства излучающей и поглощающей печной атмосферы.

Другим аспектом проблемы является большое количество возмущающих факторов, возникающих в процессе работы печи. Учет этих факторов при моделировании является трудной, или, зачастую, невозможной задачей. Альтернативный подход состоит в стабилизации режима работы печи за счет дополнительных технических решений, что уменьшит количество возмущающих факторов, увеличит прогнозируемость процессов и упростит моделирование.

Цели и задачи работы

На основании вышеизложенного были сформулированы цели настоящей работы:

1. Разработка методики корректировки и совершенствования существующей технологии нагрева и выдержки горячедеформированных труб в нагревательных печах, работающих на органическом топливе, с использованием анализа процессов тепломассопереноса в печном пространстве,

2. Усовершенствование конструкции и алгоритмов управления режимом работы печи для нагрева труб с целью повышения стабильности контролируемых в процессе нагрева величин.

В рамках поставленных целей работы сформулированы следующие **задачи**:

1. Провести анализ существующего печного оборудования для нагрева горячедеформированных труб нефтегазового сортамента, определить особенности тепловых процессов, протекающих в ходе нагрева. По результатам анализа выявить проблемные, с точки зрения нагрева, режимы на имеющемся оборудовании цеха №4 ОАО “Первоуральский Новотрубный Завод” и выбрать оборудование, требующее анализа и моделирования его работы.

2. Усовершенствовать зональный метод моделирования теплообмена излучением для расчета теплообмена при нагреве труб: 1) разработать простую с вычислительной точки зрения и быструю модель излучения продуктов сгорания, как одного из основных источников тепла в печи; 2) разработать метод расчета переноса излучения в случае сложной геометрической конфигурации, характерной для печного пространства с трубами.

3. Разработать методику определения допустимого диапазона параметров работы печи (темпа шагания блок печи и температуры выдержки труб) с использованием проведенного анализа тепловых процессов для получения заданного теплового режима нагрева труб. Применить данную методику для совершенствования режимов нагрева труб на печах ОАО “Первоуральский Новотрубный Завод”. Определить максимальную производительность и температуру в печи, позволяющие избежать получения брака вследствие невозможности поддержания заданного режима работы из-за технических ограничений (тепловой мощности печи).

4. Провести анализ процессов, происходящих в печах, и разработать усовершенствования с целью минимизации влияния возмущающих факторов на стабильность режима их работы: 1) разработать схему установки и алгоритм стабилизации газодинамического режима работы печи, минимизирующие влияние подсосов холодного воздуха; 2) усовершенствовать систему контроля температуры труб пирометром излучения с учетом особенностей печи.

Научная новизна

На основании проведенных исследований были получены новые научные результаты:

- усовершенствован зональный метод моделирования теплообмена излучением применительно к нагреву труб в печах, отапливаемых органическим топливом, и разработана методика определения параметров нагрева на его основе, что позволило создать новые технологические режимы нагрева горячедеформированных труб нефтяного сортамента из стали 13ХФА;

- разработана модель расчета излучения печной атмосферы, содержащей смесь диоксида углерода и водяных паров, основанная на аппроксимирующей формуле с подстраиваемыми коэффициентами;

- разработан метод вычисления обобщенных угловых коэффициентов для случая сложной геометрической системы (печь-трубы-продукты сгорания топлива), сокращающий время вычисления за счет дискретизации направлений излучения;

- разработан и внедрен новый способ управления газодинамическим режимом в печи путем корректирования задания регулятора давления с учетом содержания кислорода в отходящих продуктах сгорания, что позволило минимизировать влияние подсосов холодного воздуха на работу печи;

- сформирован научный подход и разработан алгоритм расчета оптимального расстояния между объективом пирометра и поверхностью металла при установке монохроматического высокотемпературного пирометра в печи, что позволило уменьшить влияние стороннего излучения, пыли и потоков воздуха на показания прибора.

Теоретическая и практическая значимость

Совершенствование тепловых режимов нагрева труб направлено на повышение эффективности нагрева труб с помощью анализа теплофизических процессов в печи. Реализация предлагаемых технических решений способствует улучшению технологии финишной обработки труб нефтяных сортов, сокращает издержки, связанные с получением брака в процессе отладки новых терморезимов на опытных партиях труб, позволяет добиться стабильной работы печей.

Рекомендации по совершенствованию режимов нагрева труб внедрены на линии обработки труб Цеха №4 ОАО “Первоуральский Новотрубный Завод”. Использование рекомендаций позволило сократить объем повторного нагрева горячедеформированных труб из стали 13ХФА с 4,3% (278т.) в 2013г до 0,7% (15,9т.) в 2014 г.

Система стабилизации газодинамического режима была апробирована и внедрена в штатную работу на печи нагрева труб под закалку в 2012г. Проведенные испытания системы показали сокращение количества подсосов холодного воздуха в печь до 7 раз, а также уменьшение массы образующейся окалины на 12%.

Методология и методы исследования

Методологической основой исследования являются зональный метод моделирования теплообмена излучением, типовые методы расчета тепловых параметров работы нагревательных печей.

В качестве объекта исследования были выбраны нагревательные методические печи с шагающими балками для нагрева труб в процессе их заключительной отделки.

Использованы методы промышленного эксперимента, методы расчета тепловых параметров печей с учетом как результатов моделирования, так и экспериментальных данных. Моделирование проведено с использованием специально разработанных комплексов компьютерных программ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Оптимизация зонального метода моделирования теплообмена излучением для расчета нагрева труб: модель излучения печных газов при отоплении печи органическим топливом; метод расчета обобщенных угловых коэффициентов и взаимных поверхностей излучения для трехмерной геометрии системы “печь-трубы-продукты сгорания топлива”;

2. Методика определения допустимого диапазона параметров работы печи для получения заданного теплового режима нагрева горячедоформированных труб на основе анализа теплофизических процессов в печном пространстве с использованием математического моделирования процессов теплопереноса;

3. Результаты применения методики для совершенствования режима нагрева труб нефтяного сортамента из стали 13ХФА в нагревательной методической печи для снятия остаточных напряжений;

4. Методика повышения эффективности использования нагревательной печи для снятия остаточных напряжений в металле в виде определения и использования зависимости между максимальной производительностью печи, поддерживаемой температурой в ней и температурой труб;

5. Схема установки и алгоритм стабилизации газодинамического режима в печи, основанный на анализе влияния возмущающих факторов (подсосов холодного воздуха, выбивания продуктов сгорания из окон печи).

Степень достоверности полученных результатов

Достоверность полученных результатов определяется использованием современных методик анализа и методов расчета числовых характеристик. Достоверность разработанных моделей тепловых процессов, выполняемых в ходе финишной обработки труб, подтверждается согласованием рассчитанных результатов с экспериментальными данными о тепловой работе печей Финишного центра ОАО “Первоуральский Новотрубный Завод”.

Апробация результатов работы

Результаты работы представлялись на студенческих, всероссийских и международных конференциях. В том числе: XV уральская школа-семинар металлургов - молодых ученых (г. Екатеринбург, 2015), Международная научно-практическая конференция «Творческое наследие В.Е.Грум-Гржимайло» (г.Екатеринбург, 2014), IV международный конгресс “Новые направления в области теплотехнического строительства. Конструкции, технологии, материалы. Энергосбережение, экология и промышленная безопасность” (Москва, 2013), Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (San-Diego, 2013; Montreal, 2014).

Публикации

По результатам исследований, связанных с диссертацией, опубликованы 17 научных работ в различных российских и международных журналах, сборниках студенческих, всероссийских и международных конференций. Среди них 4 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК России. Оформлен 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа изложена на 165 страницах машинописного текста, включая 38 рисунков, 27 таблиц, и состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка из 66 источников отечественных и зарубежных авторов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** представлен обзор существующих методик расчета теплофизических процессов в нагревательных печах. Анализ методик показал, что их возможности для расчета теплообмена излучением, как основного механизма теплопередачи при нагреве труб в печи, ограничены. Классические упрощенные методики не позволяют рассчитать детальную картину температурного профиля при нагреве металла. В настоящее время все большее распространение получает расчет теплофизических процессов с использованием коммерческих программ для

расчета вычислительной гидродинамики (CFD). Альтернативой данным методам являются различные варианты зонального метода расчета теплообмена излучением. Зональный метод имеет преимущество благодаря своей скорости, высокой точности, возможности многократного использования одних и тех же результатов вычислений. Однако он нуждается в усовершенствовании в части расчета обобщенных угловых коэффициентов, поскольку существующие методики расчета либо требуют больших вычислительных затрат (в случае численного интегрирования по поверхностям и объемам), либо характеризуются простотой программирования, однако имеют недостаток в виде вероятностного характера получаемых результатов (при использовании имитационного моделирования методом Монте-Карло).

Одновременно отмечается возрастающая сложность применяемого для нагрева труб оборудования. В качестве примера была рассмотрена линия финишной обработки труб в цехе №4 ОАО «Первоуральский Новотрубный Завод». Основными элементами линии являются печи для нагрева труб под закалку и для снятия остаточных термических напряжений. Современная методология печестроения состоит в увеличении универсальности печей за счет использования современных материалов при их конструировании. Однако, требование универсальности (возможность обрабатывать горячедеформированные трубы в широком диапазоне сортаментов и марок сталей) ведет к ужесточению соблюдения параметров технологических процессов при нагреве труб. В пункте 1.3 данной главы показано, что несоответствие фактических параметров нагрева труб (скорости и длительности нагрева) ведет к получению брака в механических свойствах готовых труб. Выявлены сортаменты и марки стали труб, нагрев которых требует корректировки с использованием анализа теплофизических процессов в печи.

На основании вышеизложенного были сформулированы цели и задачи настоящей работы.

Во **второй главе** представлено развитие зонального метода моделирования теплообмена излучением в приложении к анализу нагрева труб в печах с использованием органического топлива, в частности, природного газа. Особенности применения метода к обозначенным условиям накладывают на него ряд ограничений и требуют корректировки алгоритмов с целью повышения быстродействия и точности расчета.

Отмечается, что, так как основным источником тепла в печи является сжигаемое в горелках топливо, то особое внимание необходимо уделить составу печной атмосферы. Для органических топлив продукты сгорания представляют собой смесь диоксида углерода и воды ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$). Эти газы являются основными

излучающими и поглощающими компонентами печной атмосферы, а их высокая температура и значительный объем делает их одним из основных источников излучения в печи в целом. Ключевой характеристикой, определяющей степень излучения печной атмосферы, является коэффициент поглощения k , который может быть получен из выражения:

$$k(T, p_{CO_2}, p_{H_2O}) = \frac{1}{L} \ln(1 - \varepsilon(T, p_{CO_2}, p_{H_2O})) \quad (1)$$

где ε – интегральная степень черноты рассматриваемого объема газовой смеси; L – характеристический путь луча в данном объеме.

Для определения интегральной степени черноты ε используется ряд численных методов: номограммы Хоттеля, различные модели полос поглощения газов (EWBM), методы интегрирования по спектру (LBL-модели), аппроксимирующие методы. Для практических целей используется модель взвешенной суммы серых газов (WSGG), предложенная Смитом. Основой данной модели является представление исходной смеси веществ как смеси нескольких идеальных газов с постоянными коэффициентам поглощения. Существенным преимуществом данного метода является его вычислительная простота. Однако, если количество расчетных объемов, различающихся составом газа, велико, преимущества данного метода неочевидны. Для каждого из расчетных объемов требуется вычисление своего набора коэффициентов $b_{\varepsilon,i,j}$, k_i , что значительно увеличивает время вычисления.

В ходе данной работы на основе формулы, предложенной в работе Гурвича и Митора, была разработана аппроксимирующая модель степени черноты смеси CO_2+H_2O с использованием оптимизируемых параметров:

$$p_{\Sigma} = p_{H_2O} + p_{CO_2}, \quad (2)$$

$$C = \frac{a_i}{L} + b_i, \quad D = 2,15 \cdot 10^{-4} \left(1 + e^{-\frac{p_{\Sigma} L}{0,2}} \right) \quad (3)$$

$$\alpha_{\Gamma} = \left((0,78 + 1,6p_{H_2O}) / \sqrt{p_{\Sigma} L} - C \right) (1 - DT), \quad (4)$$

$$\varepsilon = 1 - e^{-\alpha_{\Gamma} p_{\Sigma} L}, \quad (5)$$

Параметры a_i, b_i выбираются с учетом заданного состава газа (что отражено в формуле использованием нижнего индекса i) с помощью поиска наилучшего согласования формулы с данными, полученными с помощью одной из высокоточных моделей (EWBM, LBL). Данный поиск выполняется одним из методов поиска минимума целевой функции многих переменных.

Результат расчета по формулам (2)-(5) для случая сгорания природного газа и сравнение полученных данных с моделированием по методу EWBM показаны на рисунке 1.

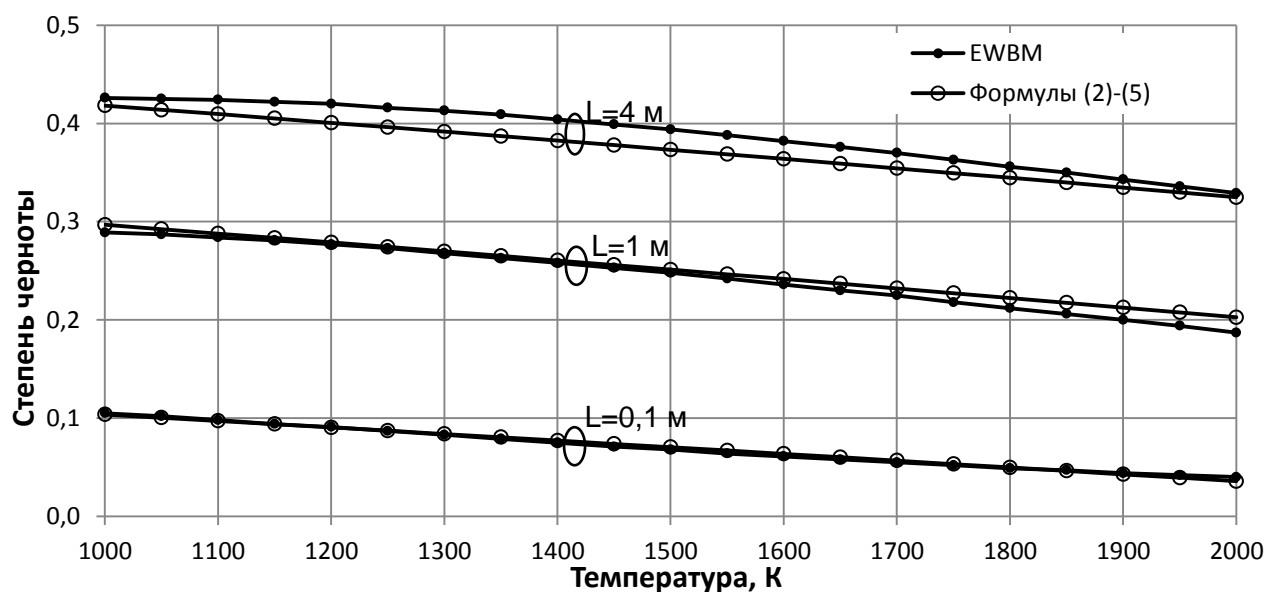


Рисунок 1 – Интегральная степень черноты смеси водяного пара и углекислого газа при $p_{H_2O} = 0,2$ атм, $p_{CO_2} = 0,1$ атм.

Преимуществом данного метода является скорость вычисления, простота программирования, хорошая точность получаемых результатов. При этом, однако, диапазон применимости формулы ограничен теплофизическими параметрами, характерными для атмосфер пламенных печей ($T=1000..2000$ К, $p_{H_2O} = 0,02..0,3$ атм, $p_{CO_2} = 0..0,3$ атм, $L=0,1-5,0$ м).

Результаты сравнения времени вычисления приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение времени вычисления степени черноты газовой смеси для различных методов расчета

Метод расчета степени черноты	Время вычисления одного значения степени черноты, мкс
Метод EWBM	30,5
Метод WSGG (Смит)	0,466
Расчет по формулам (2)-(5)	0,157

Другой особенностью моделирования теплообмена при нагреве труб является сложность моделируемой геометрической конфигурации: зоны труб имеют относительно большой размер в одном направлении и малые размеры в остальных (в направлении на торец трубы). Ключевым в этом случае становится максимально точное получение значений обобщенных угловых коэффициентов излучения с ограничивающих поверхностей печи и газовых зон на поверхность трубы. Для решения данной задачи предлагается новый метод вычисления данных коэффициентов с использованием дискретизации направлений излучения.

В практических задачах основным методом нахождения элементов матрицы обобщенных угловых коэффициентов является численное интегрирование. Если в системе выделены поверхностные зоны s_1, s_2, s_3, \dots и объемные зоны g_1, g_2, g_3, \dots , тогда прямая взаимная поверхность двух поверхностных зон s_i и s_j по определению может быть найдена в виде:

$$\psi_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} e^{-\tau(dA_j, dA_i)} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi L^2} dA_j dA_i, \quad (6)$$

где dA_i и dA_j – элементарные площадки, выделенные на поверхности зон i и j ; A_j и A_i – площади поверхности зон i и j ; θ_i и θ_j – углы между нормальными к поверхности зон и лучем, связывающим их между собой; $\tau(dA_j, dA_i)$ – степень поглощения излучения слоем газовой среды, находящимся на пути луча между площадками dA_i и dA_j ; L – расстояние между элементарными площадками зон;

Данный интеграл требует двойного численного интегрирования по площади. В случае вычисления углового коэффициента между объемными зонами g_i и g_j требуется двойное численное интегрирование по объему с выбором пространственной сетки промежуточных узлов внутри каждого объема. Очевидно, что при таком подходе большое число объемных и поверхностных зон, формирующих сложную геометрическую конфигурацию, существенно увеличивает требуемый объем вычислений.

Особенностью предлагаемой методики расчета обобщенных угловых коэффициентов является сокращение количества отслеживаемых лучей за счет использования информации, собранной при вычислении одних элементов матрицы (типа “поверхность-поверхность”), для нахождения других элементов (типа “поверхность-объем” и “объем-объем”). При отслеживании лучей, соединяющих поверхностные зоны между собой, параллельно собирается информация об объемных зонах, пересекаемых этими лучами. Собранная информация используется для вычисления элементов типа “поверхность-объем” и “объем-объем”, что позволяет избавиться от численного интегрирования с поверхности на объем и с объема на объем, составляющего большую часть вычислений при нахождении этих элементов. Пример случая, иллюстрирующий разбиение поверхностей системы на зоны, изображен на рисунке 2.

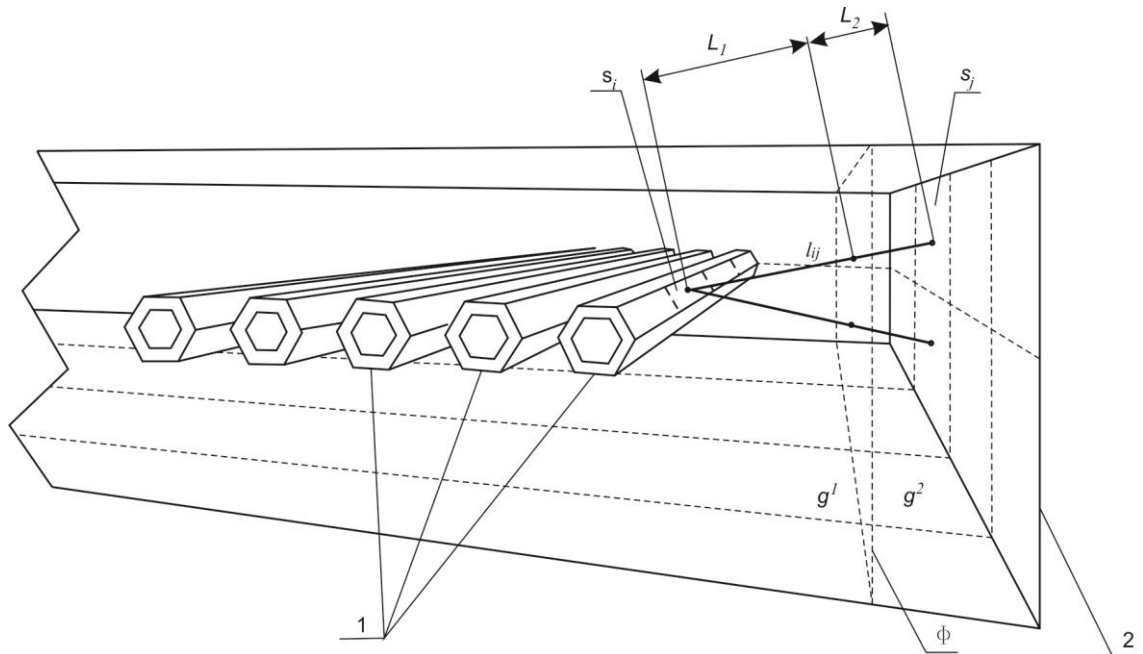


Рисунок 2 – Иллюстрация особенностей геометрической конфигурации системы “газ-кладка-трубы”. 1 – трубы в печном пространстве, 2 – ограничивающие конструкции (кладка) печи.

Для определения доли падающего излучения на трубе выделяется участок поверхности s_i , достаточно малый по площади для того, чтобы считать разницу температур в различных точках его поверхности пренебрежимо малой. Все пространство печной кладки разбивается на поверхностные зоны так, что тепловые параметры в пределах каждой из них предполагаются неизменными. Пример такого разбиения приведен на вертикальной боковой стенке печи пунктирными линиями. Печное пространство поделено на объемные зоны с постоянным химическим составом (на рисунке 2 обозначены две такие зоны g^1 и g^2 , разделенные виртуальной плоскостью Φ), для каждой из которых вычисляется коэффициент поглощения k_r на основании предварительных данных о составе и температуре газовой смеси.

В работе доказано, что обобщенный угловой коэффициент излучения для двух поверхностных зон может быть найден по формуле:

$$\psi_{ij} = \frac{1}{A_i} \sum_{m_i=1}^{M_i} \sum_{n_j=1}^{N_j} e^{-\sum_{r=1}^R k_r L_r} A_{m_i} \psi_{i_m j_n}^0. \quad (7)$$

Также показано, что обобщенные угловые коэффициенты вида “поверхность-объем” и “объем-объем” целесообразно находить параллельно с отслеживанием лучей, соединяющих поверхностные зоны. Пример расчета коэффициента ψ_{ih} (поверхность-объем):

$$\psi_{ih} = \sum_{j=1}^J \sum_{m_i=1}^{M_i} \sum_{n_j=1}^{N_j} \psi_{ih_{s_i^m \rightarrow s_j^n}} = \sum_{j=1}^J \sum_{m_i=1}^{M_i} \sum_{n_j=1}^{N_j} \psi_{i_m j_n}^0 e^{-\sum_{r=1}^{h-1} k_r L_r} (1 - e^{k_h L_h}). \quad (8)$$

Видно, что данная формула не требует численного интегрирования по объемам и поверхностям зон.

Таким образом, в данной главе представлено развитие зонального метода моделирования теплообмена излучением в приложении к моделированию нагрева труб в печах с использованием органического топлива.

В третьей главе “Совершенствование режимов нагрева труб с использованием математической модели процессов теплопереноса” разработана методика совершенствования режимов нагрева с использованием анализа теплофизических процессов в нагревательной печи.

Выделены основные этапы, необходимые для эффективного применения анализа теплофизических процессов в печах с целью совершенствования тепловых режимов нагрева труб:

1. В качестве исследуемых тепловых режимов целесообразно выбрать те режимы, которые показывают наибольшую нестабильность в получаемых механических свойствах готовых изделий на выходе. Косвенно эту нестабильность можно оценить по объему повторной термообработки, вызванной первичным браком труб по каким-либо результатам механических испытаний.

2. Необходимо провести моделирование тепловых процессов, происходящих на выбранном участке, что, в свою очередь, позволит определить направление корректировки режима с целью устранения причин появления брака. Динамика температуры на поверхности и в объеме трубы, полученная в процессе моделирования, позволяет определить время ее нагрева и выдержки с более высокой точностью, чем штатные средства контроля температуры в печи.

3. Для апробации и подстройки параметров модели используется контрольное моделирование фактического режима нагрева. После проверки адекватности модели производится моделирование с различными базовыми параметрами работы печи (производительность, заданная температура в печи) для выявления взаимосвязи между параметрами нагрева (время нагрева трубы, время и температура выдержки) и получаемыми в результате свойствами. Выбор базовых режимов для моделирования производится на основе имеющегося объема промышленных данных о нагревах и результатах испытаний свойств труб.

4. В результате моделирования определяется допустимый диапазон параметров нагрева труб для получения требуемых свойств готового продукта. Полученный диапазон дополняется расчетом граничных условий для базовых параметров работы печи с учетом технических возможностей оборудования (максимальной производительности печи, мощности горелочных устройств).

В качестве ключевого параметра, комплексно характеризующего процесс нагрева и выдержки и определяющего механические свойства труб после обработки было выбрано выражения вида:

$$P = T_{\text{выд}}(20 + \lg \tau), \quad (9)$$

где $T_{\text{выд}}$ – температура выдержки труб, кК, τ – время выдержки, ч.

По результатам статистического анализа всего объема обработки труб в цехе №4 ОАО “Первоуральский Новотрубный Завод” за 2013г, методика была применена для совершенствования режима нагрева и выдержки горячедеформированных труб повышенной эксплуатационной надежности для нефтяной промышленности из стали 13ХФА в методической печи с шагающими балками для снятия остаточных напряжений (высокий отпуск). Печь представляет собой прямоугольную замкнутую полость длиной 25м и высотой 2,2м с тремя пережимами, высота которых составляет 1,3м (см. рисунок 3).

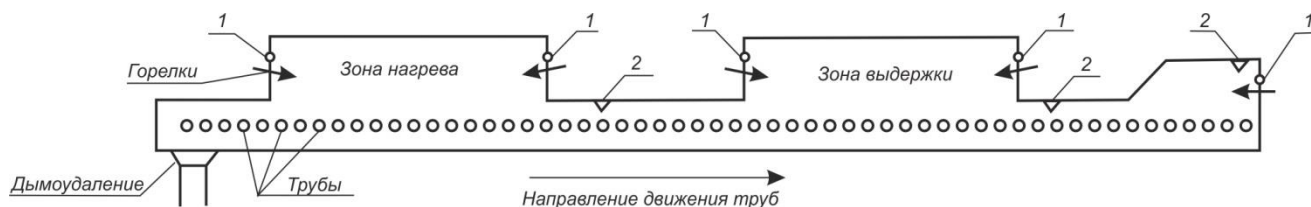


Рисунок 3 – Продольный разрез печи отпуски. 1 – точки контроля температуры печной атмосферы с помощью термопар; 2 – точки контроля температуры труб с помощью инфракрасных пирометров.

В нижней части печи по всей ее длине расположены шагающие балки, ориентированные вдоль длинной стороны печи. С одного конца в печь с помощью подающего ролик и вталкивающего механизма загружаются трубы. Укладка труб происходит на балки в один ряд перпендикулярно направлению движения труб в печи. От момента загрузки до момента выгрузки трубы перемещаются по печи с постоянной скоростью, определяемой темпом шагания балок.

Для моделирования тепловых процессов в данной печи была построена ее трехмерная модель с трубами. В процессе моделирования были выполнены следующие этапы: построена геометрическая модель системы; рассчитаны обобщенные угловые коэффициенты зон с помощью разработанного алгоритма дискретизации направлений излучения; заданы граничные условия, характеризующие каждый из моделируемых режимов нагрева; выполнен расчет тепловых и массовых потоков в печном пространстве. Статистические параметры модели приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры модели нагревательной методической печи с шагающими балками для снятия остаточных напряжений в металле.

Параметр	Значение
Кол-во поверхностных зон внутреннего пространства печи в модели излучения	48
Кол-во поверхностных зон труб в модели излучения	28
Кол-во объемных зон в модели излучения	24
Кол-во объемных ячеек в модели расчета газодинамики	117024
Кол-во объемных ячеек в модели расчета теплопроводности в объеме трубы	1996

Математическое моделирование процессов тепломассопереноса в печи позволило рассчитать фактический момент начала и температуру изотермической выдержки для режима нагрева, в результате которого не были достигнуты необходимые механические свойства изделий. Участок перехода от нагрева к выдержке детально показан на рисунке 4.

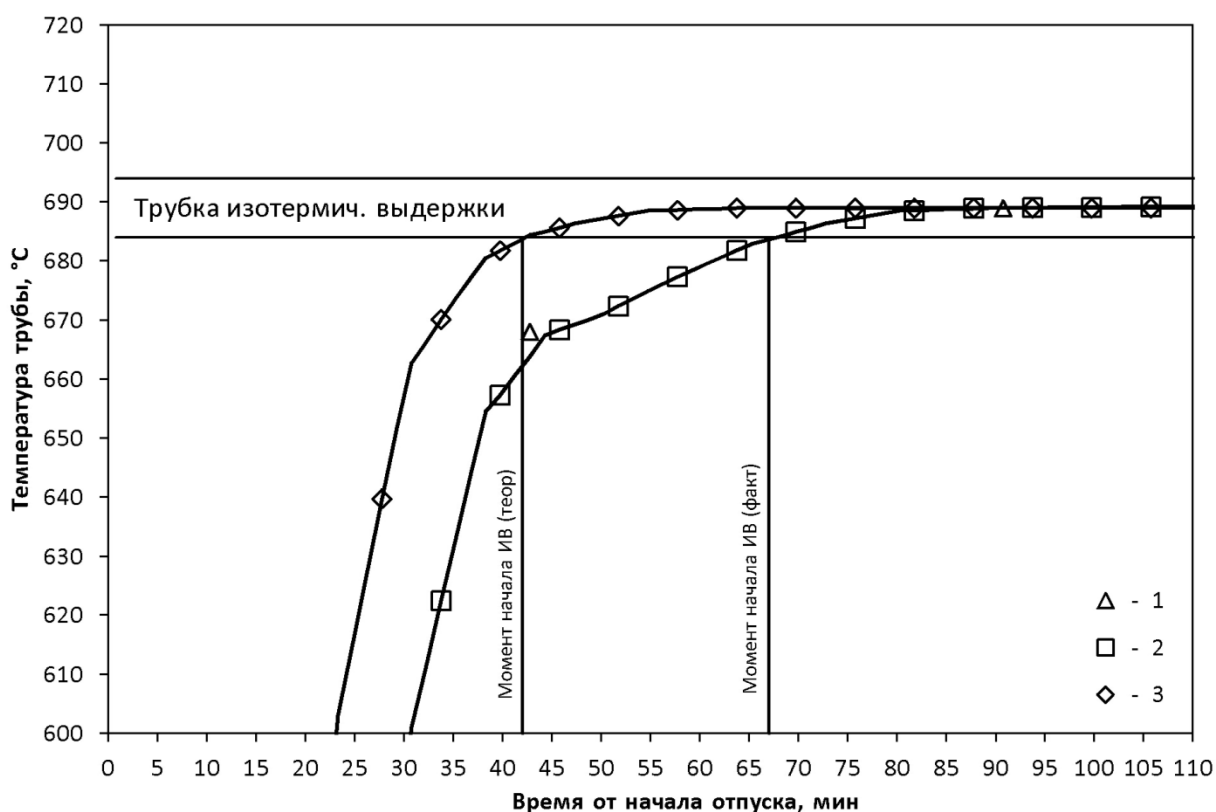


Рисунок 4 – Моделирование нагрева и выдержки труб 219x16 сталь 13ХФА в печи отпуска: 1 – показания стационарных пирометров после зоны нагрева и зоны выдержки; 2 – траектория нагрева при фактическом режиме; 3 - траектория нагрева для теоретического режима.

Из рисунка 4 видно, что длительность изотермической выдержки в фактическом режиме значительно сокращена по сравнению с длительностью на теоретической траектории нагрева. Если теоретически расчет показывает прогрев труб к 57-й ячейке печи, то моделирование фактического режима показывает прогрев трубы только к 90-93 ячейкам от начала печи. Это вызвало сокращение длительности выдержки с 67 мин до 40 мин.

По результатам выборки из массива промышленных данных было проведено моделирование нагревов для ряда режимов с различными базовыми параметрами работы печей (скорость движения труб в печи, заданные температуры в зонах регулирования). В результате моделирования и расчета полученного комплексного параметра P были получены зависимости между результатами испытаний и параметром P (рисунок 5).

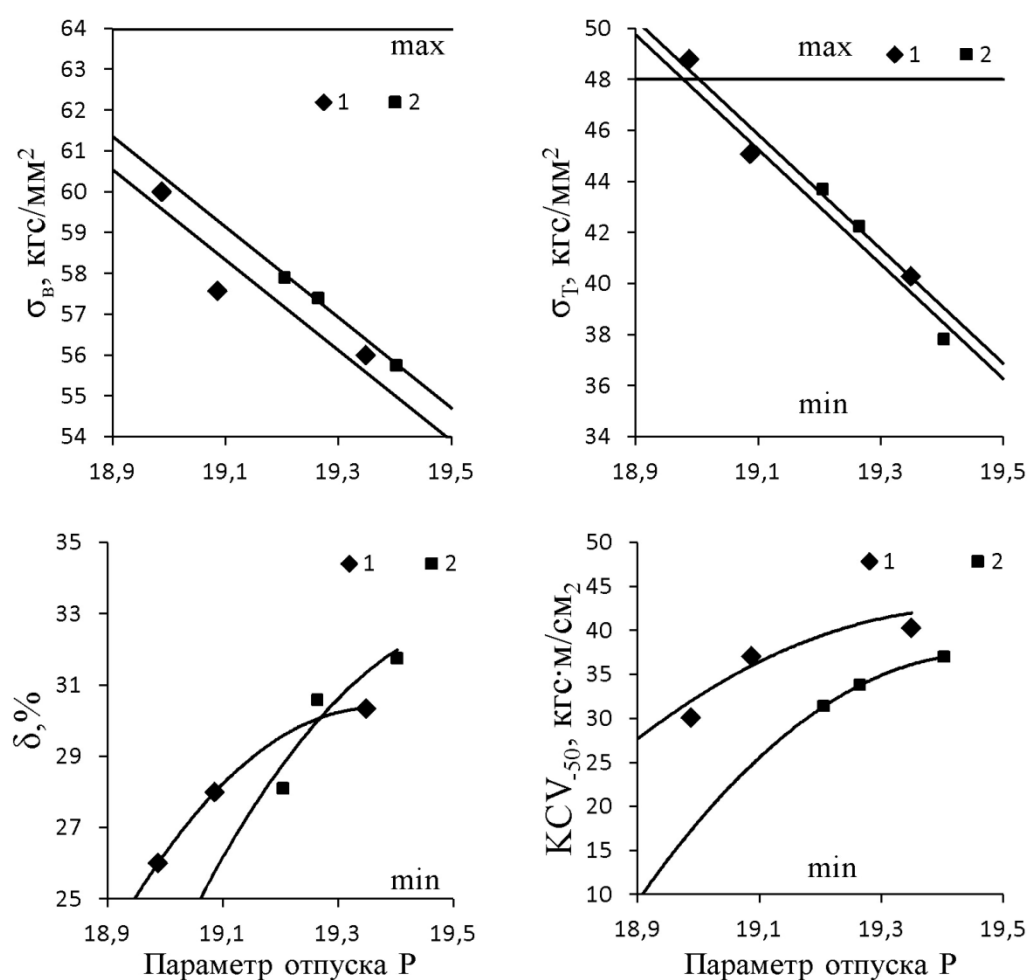


Рисунок 5 – Влияние параметра P на механические свойства труб из стали 13ХФА 219x8, 219x12, 219x16. 1 – сталь с $S_{экв}=0,36..0,38\%$; 2 – сталь с $S_{экв}=0,39..0,41\%$. Линии min и max показывают минимальный и максимальный предел допустимых значений в соответствии с заданными техническими условиями на производство данной группы сортаментов.

По полученным зависимостям определено, что для удовлетворения предъявляемым техническими условиями требованиям необходимо обеспечение поддержания величины параметра P при нагреве труб в диапазоне $P=19,1..19,5$.

Еще одним применением анализа теплофизических процессов в рассмотренной печи было построение зависимости между производительностью печи и максимально достижимой температурой нагрева труб. Для практического применения предлагается использовать диаграммы пересчета, позволяющие оценить минимальный цикл шагания балок при заданной температуре в печи для труб диаметром 219мм, что обеспечивает необходимую температуру труб в начале зоны изотермической выдержки. Полученная зависимость максимальной температуры в печи и температуры труб в конце зоны нагрева от производительности при работе печи на предельной тепловой мощности изображена на рисунке 6.

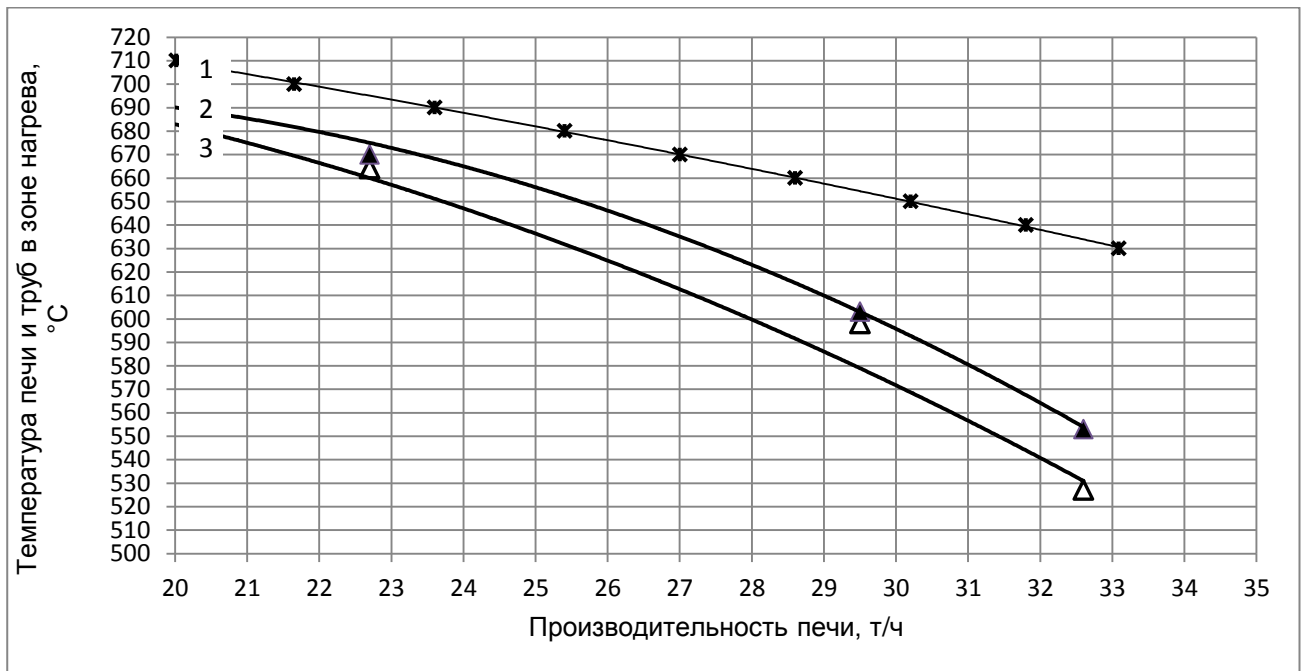


Рисунок 6 – График предельных температур печи и соответствующих им температур центральной части трубы. Линия 1 – температура печи в зоне нагрева; линия 2 – температура трубы, соответствующая средней длине труб 10м, линия 3 – температура трубы, соответствующая длине труб 8м; незакрашенные точки – фактические средние температуры труб; закрашенные точки – рассчитанные температуры труб при условиях, соответствующих фактическим.

По данному рисунку и заданному диапазону температуры трубы на выходе из зоны нагрева можно определить: 1) максимальную производительность печи, при которой возможно достижение заданной температуры труб к началу ее

изотермической выдержки; 2) задание температуры печи в зоне нагрева (линия 1), обеспечивающее требуемую температуру трубы.

Применение полученных результатов позволяет стабилизировать время изотермической выдержки и избежать ее сокращения за счет недогрева труб в конце зоны нагрева.

Однако, использование разработанной методики ограничено все возрастающей сложностью реальных объектов (печей) для анализа теплофизических процессов с использованием математического моделирования. Несмотря на проведенную проверку на адекватность, построенная модель, возможно, будет нуждаться в корректировке в случае расширения сферы ее применения на другие группы режимов. Для повышения прогнозируемости свойств печи целесообразным является внесение изменений в конструкцию и алгоритмы управления печью, способствующих повышению стабильности анализируемых параметров и измеряемых величин, а также уменьшению влияния возмущающих факторов. Данный вопрос более подробно раскрывается в следующей главе.

В четвертой главе “Совершенствование конструкций и алгоритмов управления печью для повышения стабильности параметров нагрева” описаны разработанные и внедренные в производство усовершенствования, позволяющие повысить эффективность работы печи, расширить диапазон обрабатываемой номенклатуры металла, повысить точность регулирования технологических параметров.

Значительное влияние на стабильность режима нагрева труб в печи с импульсной системой отопления оказывает внутripечное давление. Для поддержания давления, как правило, используется контур регулирования, включающий в себя в качестве сигнала обратной связи значение, измеренное датчиком давления, а в качестве исполнительного механизма – заслонку, частично перекрывающую дымоходный тракт печи (шибер). Однако сложная геометрия внутripечного пространства и значительные колебания гидродинамических течений в нем, вызванные периодическими включениями и выключениями импульсных горелок, делают поддержание избыточного давления (составляет в среднем 40..100 Н/м² или 4..10 мм.вод.ст) во всем объеме печи сложной задачей.

Показано, что исправить недостатки описанного выше метода можно при наличии возможности оценки величины подсосов в рабочее пространство печи. Такая оценка выполняется с помощью измерения содержания кислорода в отходящих дымовых газах посредством установки на дымоходном тракте печи газоанализатора на кислород. На основании измеренных значений концентрации кислорода, а также с учетом известных расходов газа и воздуха через горелки

вычисляется расход дыма и величина подсосов атмосферного воздуха в рабочее пространство агрегата, определяемая по формуле:

$$G_{\text{п}} = G_{\text{г}} \left[\frac{C_{\text{к}} V_0}{0,21 - C_{\text{к}}} - (\alpha - 1) L_0 \right], \quad (10)$$

где $G_{\text{п}}$ - объем подсосов атмосферного воздуха, м³/ч; $G_{\text{г}}$ - расход топлива, м³/ч; $C_{\text{к}}$ - концентрация кислорода в продуктах сгорания, объемные доли; α - коэффициент избытка воздуха по соотношению “топливо-воздух для горения”; L_0 и V_0 - теоретически необходимое для горения 1 м³ топлива количество воздуха и теоретический выход продуктов сгорания на 1 м³ топлива соответственно, м³/м³. С учетом полученной величины подсосов задание регулятора давления в печи корректируется до достижения величины подсосов атмосферного воздуха, равной нулю ($G_{\text{п}} = 0$).

Реализация вышеописанного способа представлена на рисунке 7.

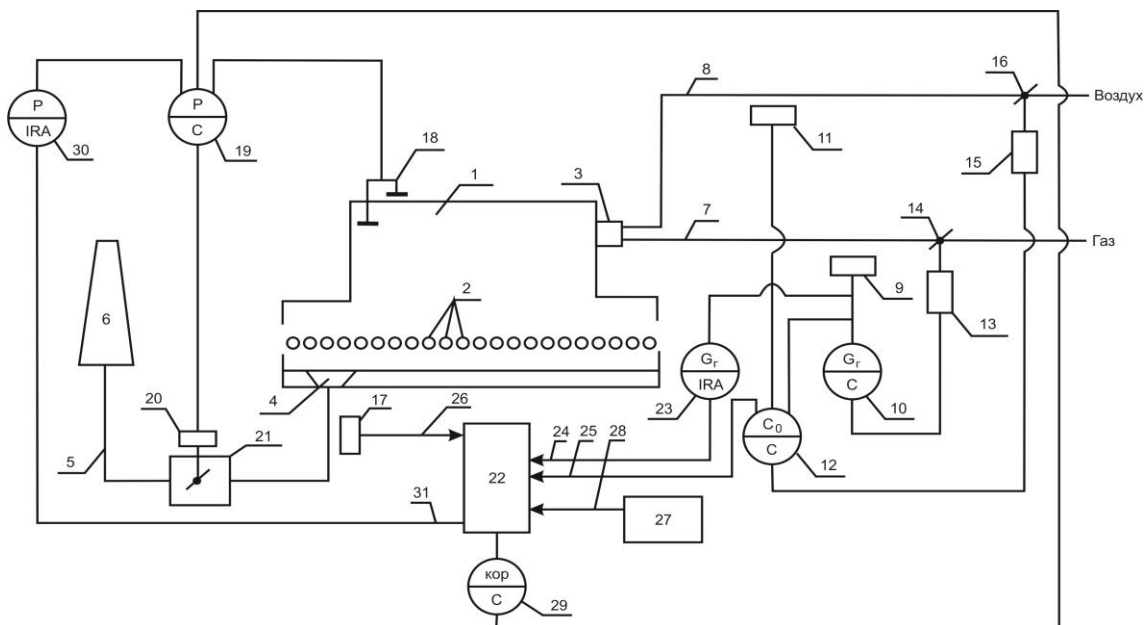


Рисунок 7 – Схема установки для регулирования давления в печи нагрева труб.

На рисунке 7 показаны: рабочее пространство 1, нагреваемый материал 2, горелочное устройство 3, канал отходящих продуктов сгорания 4, дымоход 5, дымовую трубу 6, подводы топлива 7 и воздуха 8, датчик расхода топлива 9, регулятор расхода топлива 10, датчик расхода воздуха 11, регулятор соотношения “топливо-воздух для горения” 12, исполнительный механизм 13 и регулирующий орган 14 расхода топлива, исполнительный механизм 15 и регулирующий орган 16 расхода воздуха, датчик концентрации кислорода 17, датчик давления под сводом 18, регулятор давления под сводом 19, заслонка в дымовом тракте 20, исполнительный механизм регулирования положения заслонки в дымовом тракте 21, вычислительное устройство 22, расходомер подачи газа 23, ввод данных в

вычислительное устройство 22 (о расходе топлива 24, о соотношении “топливо-воздух для горения” 25, о концентрации кислорода в продуктах сгорания 26, ручной ввод данных 28 из банка данных 27), корректирующий регулятор 29, вторичное измерительное устройство давления под сводом 30, ввод данных о давлении под сводом 31 в вычислительное устройство 22. Обозначения: С – регулятор; ИРА – показывающий, регистрирующий и сигнализирующий вторичный прибор; кор – корректирующий регулятор; G_T - расходомер топлива; C_0 - регулятор соотношения “топливо-воздух для горения”, P – давление под сводом.

В контур регулирования давления дополнительно вводятся показания концентрации кислорода в отходящих газах. В режиме реального времени вычисляется величина подсосов холодного воздуха в печь по формуле (10), полученное значение используется для корректировки заданного значения давления в печи так, чтобы величина подсосов была равна $G_{\Pi} = 0$. Если достичь данного значения невозможно, задание давления устанавливается равным максимально возможному $P_{\text{св макс}}$ с целью минимизации величины G_{Π} .

Испытания работы устройства на печи нагрева труб под закалку Цеха №4 ОАО “Первоуральский Новотрубный Завод” показали, что при исходном давлении под сводом печи $P_{\text{св}} = 0,9$ мм.вод.ст и скорректированном давлении $P_{\text{св корр}} = 1,1$ мм.вод.ст. удалось снизить значение подсосов атмосферного воздуха с $G_{\Pi} = 1385$ м³/ч до $G_{\Pi \text{ мин}} = 200$ м³/ч, т.е. величина подсосов атмосферного воздуха в результате регулирования атмосферы печи по предложенному алгоритму была снижена в 7 раз. Был выполнен расчет теплового баланса печи при работе с производительностью 28 т/ч (близкая к предельной). Расчет баланса показал, что после перехода к режиму управления по содержанию кислорода, потери тепла за счет нагрева подсасываемого в печь холодного воздуха сократились более чем в 2 раза (с 681 кВт до 313 кВт), а расход газа на печь уменьшился на 9% (с 770 нм³/ч до 698 нм³/ч). Была выполнена оценка расхода металла на окалинообразование. Определено, что после применения предложенного способа регулирования режима давления в рабочем пространстве печи масса образующейся окалины уменьшилась на 12% (с 0,84 кг/тр. до 0,75 кг/тр.).

По результатам проведенных исследований подана заявка на изобретение и оформлен патент RU 2496070 С1 “Способ регулирования газоплотности рабочего пространства энерготехнологических агрегатов”. Приоритет от 20.10.2013.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ существующих методик расчета теплофизических процессов в нагревательных печах, показавший, что их возможности для расчета теплообмена излучением, как основного механизма теплопередачи при нагреве труб в печи, ограничены, а сами методики нуждаются в усовершенствовании. Печи, используемые для нагрева труб, рассмотрены на примере нагревательных печей линии финишной обработки цеха №4 ОАО “Первоуральский Новотрубный Завод”. Статистический анализ результатов испытаний готовых труб выявил существующие недостатки в технологии нагрева труб определенных групп сортов и марок сталей в данных печах.

2. Усовершенствован зональный метод моделирования теплообмена излучением в приложении к анализу нагрева труб в печах с использованием органического топлива: а) для учета зависимости коэффициента поглощения продуктов сгорания от химического состава, температуры и объемной конфигурации газовой зоны была разработана аппроксимирующая модель определения степени черноты смеси газов в виде формулы с подстраиваемыми коэффициентами; б) разработан метод расчета обобщенных угловых коэффициентов зон с использованием дискретизации излучения по направлениям, позволивший значительно сократить объем вычислений за счет многократного использования полученной при отслеживании лучей информации.

3. Разработана методика совершенствования режима нагрева и выдержки труб в нагревательных печах путем определения допустимого диапазона параметров нагрева металла (динамики температуры, длительности нагрева) с помощью анализа и моделирования процессов теплопереноса в печном пространстве. Использование методики позволяет получить значения параметров нагрева и выдержки с точностью, превышающей точность штатных средств контроля процесса.

4. С использованием методики проанализированы режимы нагрева и выдержки труб повышенной эксплуатационной надежности из стали 13ХФА в методической печи с шагающими балками для снятия остаточных напряжений. Построена взаимосвязь параметров работы печи (с помощью расчета комплексного параметра нагрева P) с фактическими результатами нагрева труб для двух групп сталей с разным значением $S_{экв}$. Рассчитан допустимый диапазон данного параметра для обработки труб по требуемому режиму нагрева. Определенный диапазон дополнен полученной зависимостью между максимальной производительностью печи, поддерживаемой температурой в ней и температурой труб.

5. С целью стабилизации газодинамического режима в печи предложен новый способ управления давлением в печном пространстве, реализующий, в дополнение к классическому, поддержание величины подсосов на минимальном уровне. Величина подсосов вычисляется по содержанию кислорода в отходящих дымовых газах. Проведена оценка эффективности предложенного способа как с использованием экспериментальных данных, так и путем теоретического расчета теплового баланса печи и массы образующейся в процессе нагрева окалины.

Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в усовершенствовании разработанной методики для ее применения в других областях промышленного нагрева стальных изделий (заготовок перед прокаткой, слябов), что требует как модификации используемых алгоритмов расчета (для учета особенностей печных пространств), так и выявления взаимосвязи между параметрами нагрева и получаемыми свойствами.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:

1. Титаев А.А. Об одном из способов регулирования давления в печи с импульсной системой отопления // В.Г. Лисиенко, Ю.К. Маликов, А.А. Титаев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2012. – №12. – С.60-61. (0,1 п.л./0,05 п.л.).

2. Титаев, А.А. Простая аппроксимация степени черноты смеси CO₂-H₂O, используемая в зональном методе расчета теплообмена излучением / В.Г.Лисиенко, Г.К. Маликов, А.А. Титаев // Теплофизика и аэромеханика. – 2014. – Т. 21. № 6. – С. 811-814. (0,3 п.л./0,1 п.л.).

3. Титаев А.А. Метод расчета взаимных поверхностей излучения а математических моделях высокотемпературных агрегатов, основанный на дискретизации по направлениям / В.Г. Лисиенко, Г.К. Маликов, А.А. Титаев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2014. – Т. 57. №8. – С.47-50. (0,3 п.л./0,2 п.л.).

4. Титаев, А.А. Выбор режимов термической обработки нефтегазопроводных труб моделированием с учетом теплопереноса / В.Г.Лисиенко, М.Р. Нурмухаметова, А.А. Титаев // Сталь. – 2015. – №8. – С.62-66. (0,3 п.л./0,1 п.л.).

Патенты:

5. Пат. 2496070 С1 Российская Федерация, Способ регулирования газоплотности рабочего пространства энерготехнологических агрегатов / Лисиенко

Владимир Георгиевич, Маликов Юрий Константинович, Титаев Александр Анатольевич; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». Приоритет от 20.10.2013. Бюл. №29, 2013.

Другие публикации:

6. Титаев, А.А. Особенности конструкции и систем управления термических печей нового поколения // В.Г.Лисиенко, Ю.К. Маликов, И.Ю. Медведев, Г.К. Маликов, К.А. Сурганов, А.А. Титаев // Промышленные печи и трубы – 2006. – №1. – С. 13-21. (0,6 п.л./0,2 п.л.).

7. Титаев, А.А. Промышленная печь XXI века. Конструкция, тепловые режимы, автоматизация / В.Г. Лисиенко, Ю.К. Маликов, И.Ю. Медведев, Г.К. Маликов, К.А. Сурганов, А.А. Титаев, Е.Ю. Шахтарин, А.В. Васильев // Труды II международного конгресса «Пече-трубостроение: тепловые режимы, конструкции, автоматизация и экология». – Екатеринбург: Инженерная мысль. – 2006. – С. 24-26. (0,2 п.л./0,1 п.л.).

8. Титаев, А.А. Методология модернизации печей при переходе на импульсное отопление / В.Г.Лисиенко, Ю.К. Маликов, И.Ю. Медведев, К.А. Сурганов, А.А. Титаев // Промышленные печи и трубы. – 2007. – № 3. – С.35-36. (0,1 п.л./0,05 п.л.).

9. Титаев, А.А. Конструкция и автоматизация современной камерной термической печи / Лисиенко В.Г., Маликов Ю.К., Сурганов К.А., Титаев А.А // Metallurg. – 2008. – №12. – С.57-60. (0,3 п.л./0,1 п.л.).

10. Титаев, А.А. Совершенствование системы управления и конструкций современных проходных термических печей / В.Г. Лисиенко, Ю.К. Маликов, А.А. Титаев // Новые направления в области теплотехнического строительства. Конструкции, технологии, материалы. Энергосбережение, экология и промышленная безопасность: труды IV международного конгресса. – Москва. – 2013. – С. 6–11. (0,4 п.л./0,1 п.л.).

11. Титаев, А.А. Определение рекомендуемой производительности линии термообработки труб нефтяного сортамента с использованием математического моделирования процессов теплопереноса / В.Г. Лисиенко, А.А.Титаев // Сборник трудов XV Международной научно-технической уральской школы-семинара металлургов - молодых ученых. – Екатеринбург: УрФУ. – 2014. – С.19–22. (0,3 п.л./0,2 п.л.).

12. Titaev, A. Design and automation of a modern reverberatory heat-treatment furnace / Lisienko V., Malikov Yu., Surganov K., Titaev A. // Metallurgist. – 2008. – Vol.52. Issue 11-12. – pp.714-718.

13. Titaev, A. Simple expression for the emittance of $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ mixtures in zonal methods of Radiation transfer modeling / Lisienko V., Malikov G., Titaev A., Viskanta R. – Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2013. San-Diego, – 2013, Nov.15-21.

14. Titaev, A. Simple Expression for the Emittance of $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ Mixtures in Zonal Methods of Radiation Transfer Modeling / Lisienko V., Malikov G., Titaev A., Viskanta R. // Journal Heat Transfer, Volume 136(9), pp. 094501-1..3

15. Titaev, A. Simple approximation of total emissivity of $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ mixture used in the zonal method of calculation of heat transfer by radiation / Lisienko V., Malikov G., Titaev A. // Thermophysics and Aeromechanics. – 2014. – Vol. 21. Issue 9. – pp.779-782.

16. Titaev, A. Calculation of exchange areas in models of high-temperature radiant systems / Lisienko V., Malikov G., Titaev A. // Steel in translation. – 2014. – Issue 10, Vol. 44. – pp. 727–730.

17. Titaev, A. A new method for direct exchange area calculation in zonal method of radiant heat transfer modeling in combustion furnaces / Lisienko V., Malikov G., Titaev A., Viskanta R. – Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2014. Montreal. – 2014, Nov.14-20.