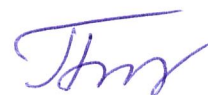


Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»

На правах рукописи



Гнитиев Павел Александрович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТИВНЫХ
ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛА
В КАМЕРНЫХ ПЕЧАХ**

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Донецк – 2016

Работа выполнена на кафедре технической теплофизики ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк.

Научный
руководитель:

доктор технических наук, профессор
Бирюков Алексей Борисович,
ГОУ ВПО «Донецкий национальный
технический университет»
заведующий кафедрой технической
теплофизики

Официальные
оппоненты:

Недопекин Федор Викторович,
доктор технических наук, профессор,
ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»/
профессор кафедры физики неравновесных процессов,
метрологии и экологии им. И.Л. Повха;

Лукьянов Александр Васильевич,
доктор технических наук, профессор,
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия
строительства и архитектуры»/
заведующий кафедрой теплотехники,
теплогазоснабжения и вентиляции.

Ведущая
организация:

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«Луганский государственный университет
имени Владимира Даля», г. Луганск.**

Защита состоится «10» июня 2016 года в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 01.016.03 при ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет» по адресу: 83001, г. Донецк, проспект Театральный 13, ауд. 264. Тел. факс: +38 (062) 302-06-00, e-mail: d0101603-donnu@ya.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Донецкого национального университета по адресу: 83001, г. Донецк, ул. Университетская 24, <http://donnu.ru>.

Автореферат разослан «07» апреля 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 01.016.03



Моисеенко Игорь Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В условиях усиления конкуренции на рынке металлургической и машиностроительной продукции возникает необходимость постоянной работы над повышением качества продукции с одной стороны, и снижением ее ресурсоэнергоемкости – с другой.

Одну из основных ролей в управлении качеством стальных изделий играет термообработка, во многих видах которой (нормализации, отжиге) важное место занимает процесс воздушного охлаждения (ВО).

На сегодняшний день процесс ВО при термообработке стальных изделий осуществляется в термических печах периодического действия, что накладывает на этот процесс ряд требований, таких как обеспечение заданной скорости и сокращение времени охлаждения. Используемые на сегодня подходы к расчету этих параметров несовершенны. Это влечет за собой перерасход энергоресурсов и увеличение времени пребывания материала в печи вследствие недостаточного исследования влияния различных конструктивных и технологических параметров на процесс съема тепла с металла. Создание новых печей и реконструкция существующих требуют научно обоснованных методик расчета рациональных параметров и оптимизации технико-экономических характеристик процесса ВО. Выбору рационального расхода воздуха мешает недостаточная изученность рабочего процесса охлаждения в реальных условиях, отсутствие достаточно простых и надежных методик его проектного расчета и др. Для соответствия предъявляемым требованиям необходимо разработать методики инженерного расчета процесса, математические модели определения теплового состояния металла, системы диагностики и контроля. Вместе с этим на современном этапе возникла необходимость создания прогнозных математических моделей, участвующих в управлении технологией ВО металлов.

Таким образом, тема диссертационного исследования, посвященная совершенствованию технологических и конструктивных параметров систем ВО металла в термических печах периодического действия, является актуальной.

Связь с научными программами, планами, темами. Работа выполнена в соответствии с планами научного направления кафедры технической теплофизики Донецкого национального технического университета «Развитие теоретических и технологических основ рационального управления тепло-массообменными процессами в различных технологиях» и является частью исследований, проведенных в рамках госбюджетной темы «Совершенствование технологических и конструктивных параметров процессов воздушного охлаждения материалов» № Н10-15, при выполнении которой автор принимал участие в качестве соисполнителя.

Цель и задачи исследования. Целью работы является совершенствование технологических и конструктивных параметров систем ВО металла в термических печах периодического действия.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– провести анализ имеющихся сведений о технологических и конструктивных параметрах механизма ВО металла в термических печах

периодического действия, влияющих на его конечную структуру и свойства в цикле термической обработки;

- разработать математическую модель для изучения теплообменных процессов при ВО металлических заготовок цилиндрической формы в термических печах периодического действия;

- создать лабораторную модель камерной печи и провести экспериментальные исследования реальной картины натекания воздуха при обдуве тел различной геометрической формы для получения критериальных зависимостей, описывающих конвективный теплообмен при взаимодействии твердых поверхностей с потоком газообразной среды в условиях, моделирующих производственные;

- исследовать влияние технологических и конструктивных параметров на длительность операции ВО металла;

- разработать технические средства интенсификации технологии ВО за счет импульсной подачи охлаждающего воздуха;

- разработать аналитические подходы для анализа энергетической эффективности интенсификации процессов ВО металла;

- разработать инженерную методику проектного расчета процессов ВО металла и выполнить ее проверку в реальных условиях;

- разработать теплофизические основы диагностики и автоматического контроля процесса ВО металла и выполнить их проверку в реальных условиях.

Объект исследования – системы воздушного охлаждения металлов в термических печах камерного типа.

Предмет исследования – теплообменные процессы при воздушном охлаждении металла в камерных печах.

Методы исследования. Экспериментальные исследования конвективного теплообмена в камерных печах проводились на лабораторной модели, геометрически подобной одной из типовых камерных печей с выкатным подом, кафедры технической теплофизики со статистической обработкой полученных результатов.

Математическая модель исследования процесса охлаждения создана на базе решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности при помощи метода наименьших квадратов и неявной схемы аппроксимации. Компьютерная программа, реализующая разработанный алгоритм создана в пакете Delphi, а для визуализации результатов моделирования использовано программное обеспечение для инженерных вычислений MathCAD.

Достоверность полученных результатов обеспечивается благодаря корректно поставленной задаче, использованию фундаментальных законов конвективного и лучистого теплообмена, известных закономерностей теории турбулентных струй.

Научная новизна полученных результатов:

1. Впервые получены критериальные уравнения, описывающие конвективный теплообмен в камерах печей формы прямоугольного параллелепипеда и соотношением размеров, типовом для печей с выкатным подом, при безимпульсной подаче теплоносителя и поперечном обтекании тел, имеющих форму куба и цилиндра. Степени при Рейнольдсе 0,62 и 0,5 множитель перед

уравнением 0,14 и 1,49 соответственно. Полученные уравнения справедливы для $Re > 3000$.

2. Впервые получены критериальные уравнения, описывающие конвективный теплообмен в камерах печей формы прямоугольного параллелепипеда и соотношением размеров, типовом для печей с выкатным подом, при импульсной подаче теплоносителя и поперечном обтекании тел, имеющих форму куба. Дополнительным критерием для учета импульсного режима подачи среды является критерий Струхаля Sh . Степени при Рейнольдсе 0,62 множитель перед уравнением 0,73 и степени при Струхале 0,226. Полученные уравнения справедливы для $Re > 3000$ и $Sh = 0,016-0,021$. Импульсный режим подачи демонстрирует интенсификацию в диапазоне 15-22% в сравнении с безимпульсным режимом.

3. Получили развитие научные представления о реализации технологий ВО металла в печи за счет систематизации представлений о влиянии параметров футеровки камеры печи на время, необходимое для реализации процесса. Установлено, что при использовании керамоволокнистых материалов взамен плотного огнеупора показано среднее ускорение процесса на 43-50% в зависимости от расхода охладителя. При использовании плотной подины и керамоволокнистого покрытия стен и свода ускорение составляет 30-41% в зависимости от тех же параметров.

4. Получили развитие научные представления о механизме съема тепла при ВО металла в печи за счет установления доли тепла, которая непосредственно снимается с поверхности металла конвекцией и составляет 10-30% в зависимости от массы садки печи и расхода охлаждающего воздуха. Остальное тепло передается излучением на поверхность футеровки и снимается с нее охлаждающим воздухом конвекцией.

5. Впервые установлено среднее значение коэффициента местного сопротивления вращающейся круглой заслонки с отступом до 5% от внутреннего диаметра трубопровода, вращающейся с частотами 0,8-1,6 Гц заслонки, которое составляет 20,95, и в пределах инженерной погрешности соответствует коэффициенту местного сопротивления круглой неподвижной заслонки при угле поворота 45° .

Практическая ценность результатов:

1. Создана математическая модель расчета процесса охлаждения, способная интегрироваться в АСУ ТП, быстрая и безусловно устойчивая, позволяющая производить вычисления для различного типа садки печи и типа используемой футеровки камеры.

2. Создана инженерная методика проектного расчета ВО, позволяющая выбрать требуемый расход воздуха и характеристики нагнетателя на основании заданной скорости охлаждения в инерционный период.

3. Созданы основы системы диагностики процесса ВО и предложена система автоматического контроля процесса ВО, основанные на анализе количества тепла, отводимого из печи.

4. Даны рекомендации по совершенствованию конструктивных параметров футеровки термических печей, показано количественное ускорение операции ВО при использовании керамоволокнистых огнеупоров взамен плотных.

5. Создан и запатентован способ определения коэффициентов конвективной теплоотдачи (ККТ) для разных схем контакта газообразной среды и металла [15].

Личный вклад соискателя. Определены цели и поставлены задачи исследования, произведен обзор публикаций по современному состоянию технологий воздушного охлаждения металла в печах; подготовлены основные публикации по теме диссертационной работы; проведены экспериментальные и расчетно-теоретические исследования конвективного и лучистого теплообмена в камерных печах; выполнено математическое моделирование процесса воздушного охлаждения; разработана методика для определения температурного состояния обрабатываемого металла в печах; выполнена оценка влияния параметров процесса воздушного охлаждения на показатели ресурсосбережения; разработаны в научном плане и технически обоснованы подходы для работы системы контроля тепловой работы устройств термообработки.

Основные научные результаты диссертации получены соискателем лично и при непосредственном участии автора. Отдельные составляющие теоретических и экспериментальных исследований диссертационной работы выполнены с соавторами научных работ, которые указаны в перечне научных публикаций.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты диссертационной работы докладывались на 9 научных конференциях.

Публикации. Основные результаты диссертационных исследований изложены в 6 печатных работах, в том числе в 4 рецензируемых научных изданиях: 2 работы опубликованы в изданиях, входящих в перечень специализированных научных журналов, утверждённый МОН Украины; 2 – в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утверждённый ВАК РФ, одном патенте на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из содержания, введения, четырех разделов, общих выводов, списка использованной литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 150 страниц, на 133 которых расположен основной текст, на 13 страницах список использованных источников, состоящий из 129 наименований, на 4 страницах приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновано состояние проблемы, отмечена актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, приведена научная и практическая новизна полученных результатов, сведения об апробации проведенных исследований и публикации научных статей.

В первом разделе выполнен анализ литературных источников по основам процессов термообработки, показана важность роли операции ВО в формировании конечных свойств металла. Проанализированы различные способы реализации операции охлаждения металла, от медленного – охлаждения с печью без подачи охладителя, до резкого – охлаждения в жидкостях. Показано место операций ВО

металла при реализации таких технологических операций как отпуск и различного рода отжиг. Обосновано, что несоблюдение требуемого темпа ВО может привести к изменению структуры металла в операциях отжига и нормализации, а также сохранению остаточных напряжений в металле. Проиллюстрирована эволюция операции ВО: от охлаждения заготовок в пространстве цеха до охлаждения внутри печи с принудительной подачей охладителя, что стало возможным благодаря применению современных низкоинерционных материалов в качестве футеровки печи – керамоволокна. Отмечена актуальная проблема машиностроительных и металлургических предприятий, связанная с ускорением операции ВО в печах.

Проанализированы известные сведения о теплофизических особенностях протекания конвективного теплообмена при взаимодействии твердых поверхностей с потоком газообразной среды; рассмотрены существующие способы расчета процесса ВО, выделены основные проблемы, связанные с отсутствием критериальных уравнений, описывающих конвективный теплообмен при охлаждении металла в реальных условиях, невозможность прямого определения требуемого количества охлаждающего воздуха. Показана важная роль измерения температуры поверхности заготовок в процессе охлаждения для адаптации расчетных инженерных методик и математических моделей; рассмотрены существующие контактные способы измерения температуры обрабатываемого материала; рассмотрены существующие системы управления параметрами операции охлаждения, выделены тенденции их развития и указаны моменты, нуждающиеся в доработке.

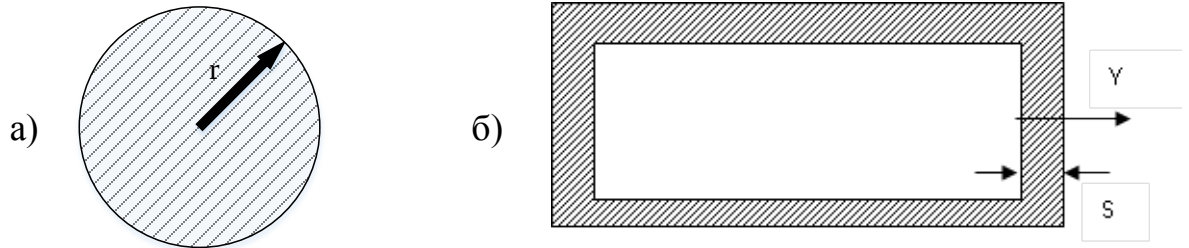
Анализ состояния вопросов, посвященных исследованию теплофизических аспектов и совершенствованию операций ВО металла в печах в отечественных и зарубежных источниках, позволил сформулировать цель и задачи исследований диссертационной работы.

Во втором разделе отработаны методологические основы проведения научных исследований, направленных на решение поставленных в диссертации задач. Представлены основные этапы создания математической модели, описывающей процесс ВО металла в печах, базирующейся на решении дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности в одномерной постановке для металла (в цилиндрической системе координат) и футеровки (в прямоугольной декартовой системе координат). Согласно оценкам значений критерия Био, соответствующих реальным условиям охлаждения массивных заготовок в печах, получен диапазон значений 0,2-0,4, что позволяет рассматривать такие заготовки как термически тонкие тела. Учитывая это соображение, а также то, что площадь торцевых поверхностей заготовок во много раз меньше площади боковой поверхности, для описания теплового состояния заготовок выбрана запись дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности в одномерной постановке. Аналогичный подход выбран для описания теплового состояния футеровки в связи с существенно меньшим одним из геометрических размеров (толщины) по сравнению с двумя другими (длиной, высотой).

Отработана схема задания условий однозначности для заготовок и футеровки, включающая в себя геометрические, начальные, граничные условия и

задание зависимости теплофизических характеристик сред и материалов, участвующих в теплообмене от температуры.

Геометрические условия теплообмена для металла и футеровки представлены в одномерных постановках на рис. 1.



r – произвольный радиус в поперечном сечении заготовки; S – толщина огнеупора; Y – выбранное положительное направление на координатной оси

Рисунок 1 – Геометрические условия для металла (а) и футеровки (б)

При задании граничных условий теплообмена (ТО) учтены следующие элементы теплового взаимодействия: конвективный ТО металла с воздухом; конвективный ТО футеровки с воздухом; лучистый ТО металла с футеровкой.

Граничные условия теплообмена для металла и футеровки выглядят следующим образом:

металл:

$$\begin{cases} r = r_3 : -\lambda \frac{\partial t}{\partial r} = \alpha_{\text{конв}}^{\text{мет}} \cdot (t_{\text{м}} - t_{\text{ср}}) + \alpha_{\text{луч}}^{\text{мет-ф}} \cdot (t_{\text{м}} - t_{\text{ф}}); \\ r = 0 : \lambda \frac{\partial t}{\partial r} = 0, \end{cases}$$

футеровка:

$$\begin{cases} y = 0 : -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} = \alpha_{\text{конв}}^{\text{ф}} \cdot (t_{\text{ф}} - t_{\text{п}}) - \left[\alpha_{\text{луч}}^{\text{мет-ф}} \cdot (t_{\text{м}} - t_{\text{ф}}) \right] \frac{F_{\text{м}}}{F_{\text{ф}}}; \\ y = s : -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} = \alpha_{\text{ос}} \cdot (t_{\text{ф}}^{\text{нар}} - t_{\text{ос}}), \end{cases}$$

где $\alpha_{\text{конв}}^{\text{мет}}$ - ККТ от металла к охлаждающему воздуху, Вт/(м²·К); $t_{\text{м}}$ - температура поверхности охлаждаемого металла, °С; $t_{\text{ср}}$ - температура среды, омывающей металл, °С; $\alpha_{\text{луч}}^{\text{мет-ф}}$ - лучистый коэффициент теплоотдачи от металла к футеровке, Вт/(м²·К); $t_{\text{ф}}$ - температура внутренней поверхности футеровки, °С; $\alpha_{\text{конв}}^{\text{ф}}$ - ККТ от футеровки к охлаждающему воздуху в печи, Вт/(м²·К); $t_{\text{п}}$ - средняя температура в камере печи, °С; $\alpha_{\text{ос}}$ - ККТ от наружной поверхности футеровки в атмосферу, Вт/(м²·К); $t_{\text{ф}}^{\text{нар}}$ - наружная температура футеровки, °С; $t_{\text{ос}}$ - температура окружающей среды, °С; $F_{\text{м}}$ - площадь поверхности металла, м²; $F_{\text{ф}}$ - площадь поверхности футеровки, м².

Значение $t_{\text{ср}}$ определяется на основании теории турбулентных струй, с учетом смешения свежего воздуха, поданного на охлаждение, с газовой средой печной камеры имеющей температуру $t_{\text{п}}$.

Если некоторые элементы футеровки выполнены из различных материалов, то для каждого из них отдельно решается дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности с соответствующими условиями однозначности. При составлении условий однозначности для металла учитывается, что имеет место лучистый теплообмен с различными элементами футеровки, а для элементов футеровки предусмотрен учет лучистого теплообмена друг с другом.

При этом при расчете приведенного коэффициента излучения в системе тел «металл-футеровка», учитываются соответствующие угловые коэффициенты, степени черноты металла и внутренней поверхности футеровки.

Подтверждение адекватности разработанной математической модели проводится в результате сопоставления кривых, описывающих закон изменения температуры на поверхности заготовок при аттестационном режиме термической обработки в промышленной печи с результатами математического моделирования.

ККТ от металла может быть упрощенно определен при помощи известных критериальных уравнений, характеризующих простейшие гидродинамические схемы взаимодействия. Но в связи с тем, что реальная картина обтекания тел отличается от простейших теоретических схем, обоснована необходимость экспериментального изучения этих процессов.

Для определения ККТ при различных схемах гидродинамического взаимодействия воздуха и исследуемых тел создана физическая модель (рис. 2а), геометрически подобная типовой камерной печи для термообработки. Экспериментальная установка включает в себя камеру, двадцать сопел для истечения воздуха, двойной под, устройство для стока жидкости. Двухуровневая подина состоит из верхнего решетчатого уровня, на котором располагаются заготовки и нижнего, имеющего двойной уклон, предназначенного для сбора жидкости, образованной в результате оплавления тел (рис. 2б).

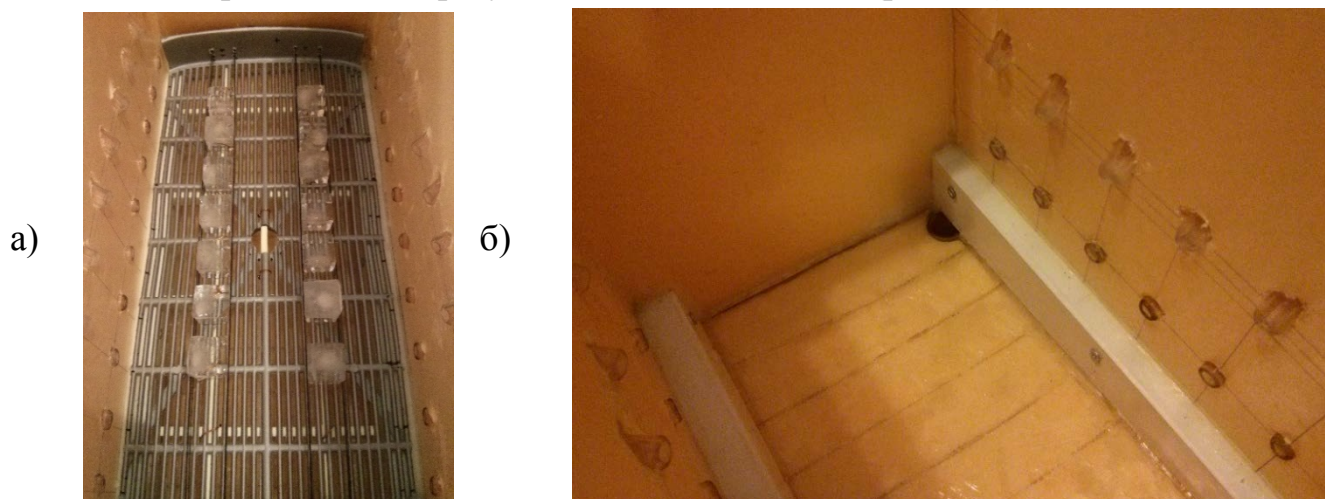
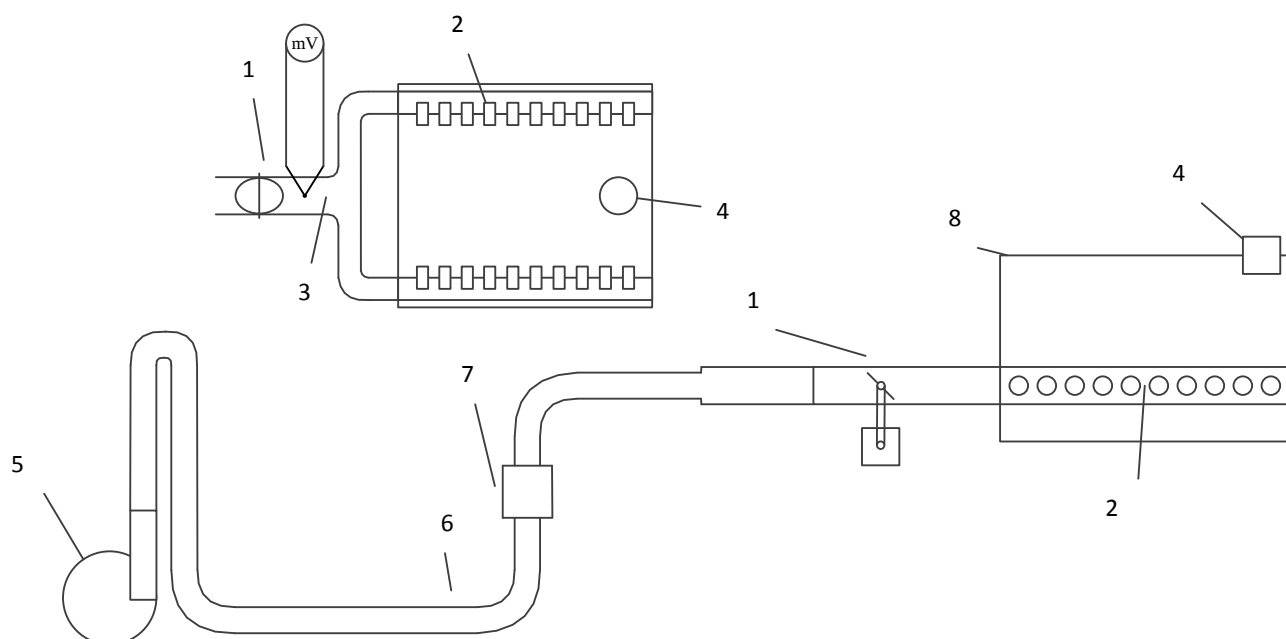


Рисунок 2 – Внутренняя камера экспериментальной установки

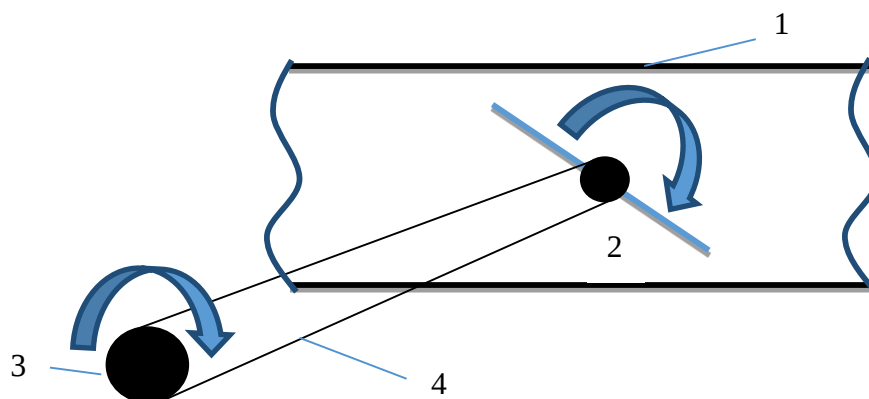
Нагнетатель через гидравлическую сеть и коллектор подключается к камере печи (рис. 3).



1 – заслонка; 2 – сопла; 3 – воздушный коллектор; 4 – отверстие для удаления воздуха; 5 – нагнетатель; 6 – аэродинамическая сеть; 7 – расходомер; 8 – модель камеры печи

Рисунок 3 – Схема аэродинамической сети лабораторной модели

Для исследования импульсного режима ВО в подводящем трубопроводе установлен пульсатор, представляющий собой заслонку, создающую 87% перекрытие сечения канала при повороте на 90°. Заслонка приводится в движение электроприводом, обеспечивающим рабочий диапазон частот вращения в интервале 0,8-1,6 Гц. Схематическое изображение заслонки представлено на рис. 4.



1 – подводящий трубопровод, 2 – вращающаяся заслонка, 3 – электродвигатель, 4 – ременная передача

Рисунок 4 – Заслонка в подводящем трубопроводе

Авторами получен патент на способ определения ККТ при ВО тел в камерных печах [21].

В качестве исследуемых тел в модели камерной печи использованы тела из льда, имеющие кубическую и цилиндрическую форму. Выбор льда в качестве материала обдуваемых тел исключает необходимость измерения температуры поверхности, а контроль стока воды позволит судить о текущем их размере. Замеры стока проводились через каждые 15 секунд.

Результатом проведения экспериментов стало получение темпа стока жидкости во времени, который позволяет определить изменение диаметра исследуемых тел, тепловой поток, отводимый от тел, и собственно ККТ:

например, для цилиндра:

$$\alpha_i = \frac{\rho_v \cdot q_{\text{плав}} \cdot [u_{r_i} - u_{r_{i-1}}]}{(t_{\text{ср}} - t_{\text{пов}}) \cdot \left[\left[\pi \cdot \left[\frac{d_i + d_{i-1}}{2} \right] \cdot L \right] + 2 \cdot \pi \cdot \frac{d_i^2}{4} \right]},$$

где ρ_v – плотность воды, кг/м³; $q_{\text{плав}}$ – удельная теплота плавления льда, 335 кДж/кг; u_{r_i} , $u_{r_{i-1}}$ – значения объемов воды в мензурке, взятые в рассматриваемый (i-ый) и предыдущий (i-1 ый) моменты времени, м³; $(t_{\text{ср}} - t_{\text{пов}})$ – разность температур натекающего воздуха и поверхности цилиндра, °С, d_i , d_{i-1} – диаметры тела в рассматриваемый (i-ый) и предыдущий (i-1 ый) моменты времени, м; L – длина цилиндра, м.

Аналогичная формула получена для тел кубической формы.

Для определения числа Рейнольдса на основании теории турбулентных струй рассчитана средняя скорость воздуха у поверхности омываемых тел в четырех условно выделенных точках. После чего прологарифмированные значения критериев Nu и Re отображаются в декартовой системе координат и при помощи линейной регрессии получены коэффициенты критериального уравнения, описывающего конвективный теплообмен в данных условиях.

Таким образом, отработана методология определения ККТ для конкретных схем взаимодействия воздуха с телами. Использование полученных коэффициентов в математической модели позволит с высокой точностью задавать граничные условия теплообмена на поверхности, а значит получать распределение температур по толщине исследуемых тел, рассчитывать время ВО металла.

В третьем разделе представлены результаты физического моделирования при исследовании ККТ при ВО изделий в печах. На созданной лабораторной модели печи обдували тела кубической и цилиндрической формы с фиксацией объема стока во времени (рис.5) для тел кубической (а) и цилиндрической формы (б). Различная продолжительность экспериментов обусловлена различными исходными размерами тел. Так, например, тела кубической формы в начальный момент времени имели размер граней 17 мм, а диаметр цилиндрического тела равен 62 мм.

На основании этих данных построены графики изменения условного диаметра во времени. Для тел кубической формы учтено изменение от кубической к сферической форме тела при определении изменения ККТ во времени. Изменения условных диаметров тел представлены на рис. 6.

Весь диапазон значений объемов стока жидкости был интерполирован для того, чтобы получить возможность использовать не только узловые точки во времени, но и промежуточные значения между узлами.

Получено изменение ККТ при тех же условиях и приведено на рис. 7.

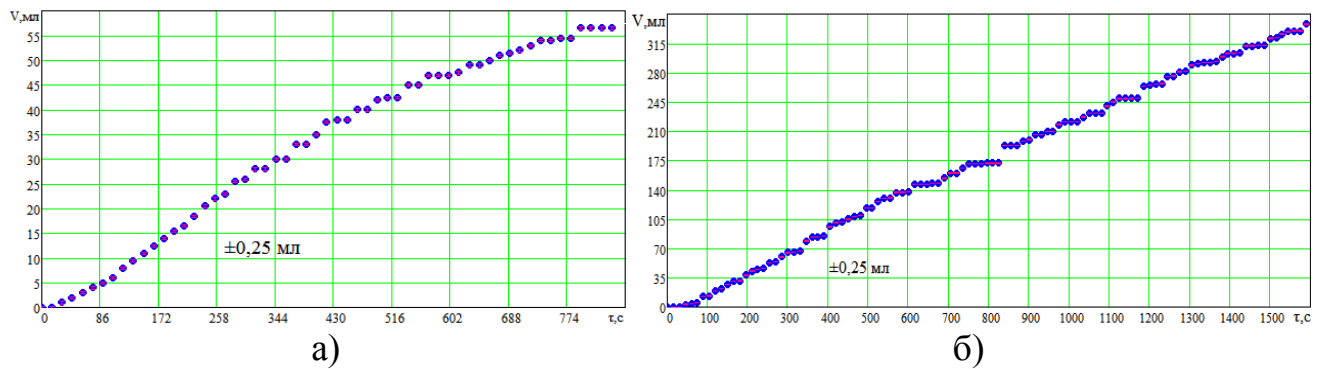


Рисунок 5 – Изменение темпа стока жидкости в экспериментах

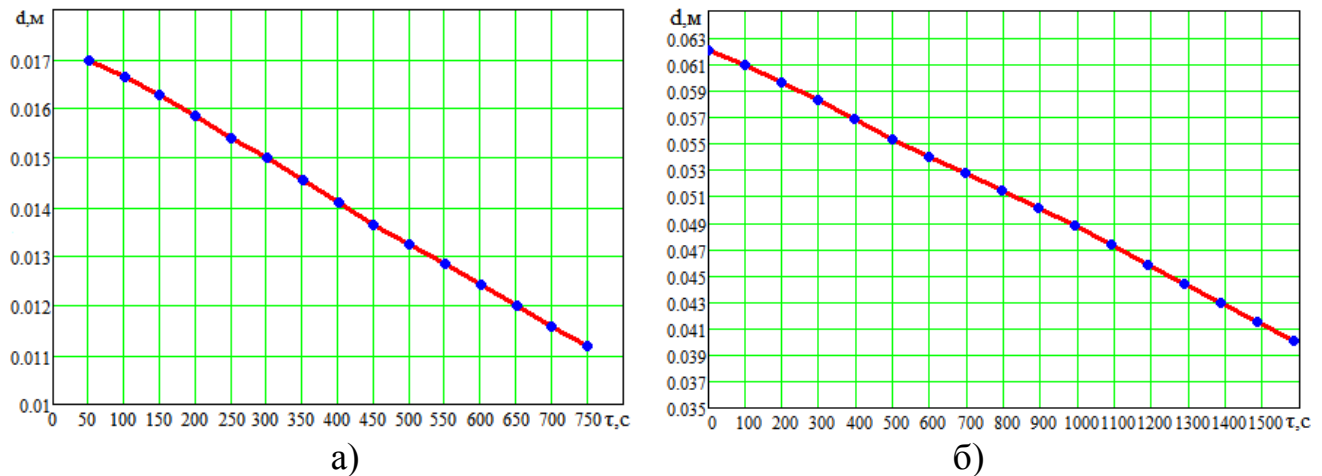
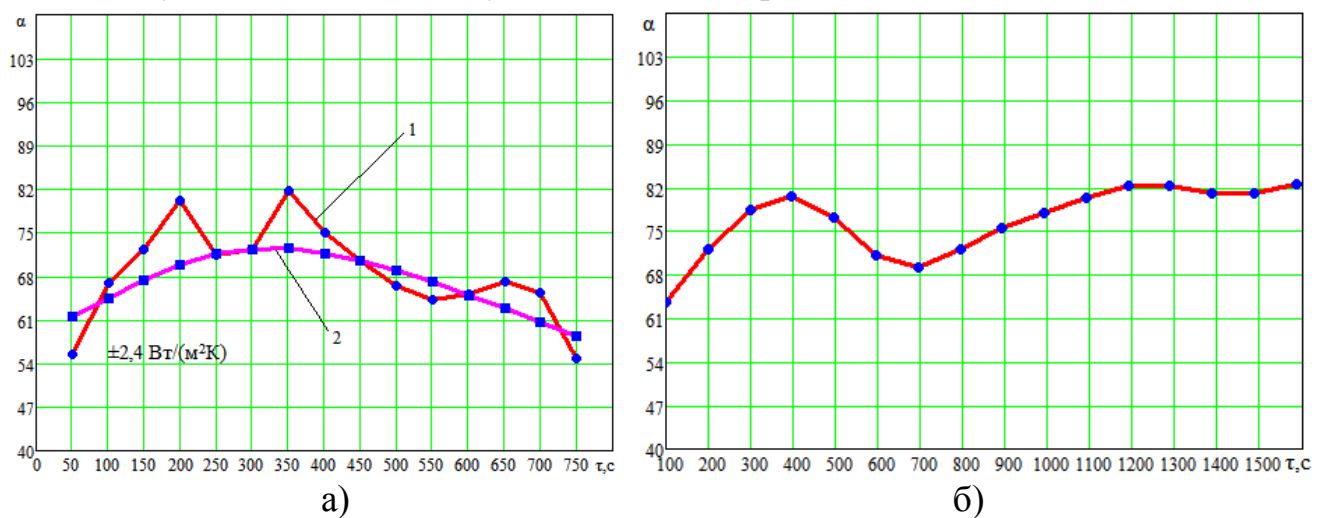


Рисунок 6 – Изменение условных диаметров тел



1 – линия, иллюстрирующая изменение коэффициента теплоотдачи в течение времени протекания эксперимента, 2 – регуляризованная кривая при помощи распределения Гаусса

Рисунок 7 - Изменение ККТ при воздушном обдуве тел различной формы

При помощи регрессионного анализа получены критериальные уравнения, описывающие конвективный теплообмен в рассматриваемых условиях для тел кубической и цилиндрической формы соответственно:

$$Nu = 0,14 \cdot Re^{0,62} \cdot Pr_{ж}^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} ; \quad Nu = 1,49 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr_{ж}^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25},$$

Полученные уравнения имеют коэффициенты корреляции на уровне 0,97 и 0,86 соответственно, что, согласно шкале Чаддока свидетельствует о высокой качественной характеристике силы связи.

Оценка погрешности экспериментальных значений ККТ выполнена при помощи стандартных подходов к оценке погрешности косвенных измерений. При этом погрешность определения искомой величины – ККТ, рассмотрена как функция погрешностей измерения температуры натекающего воздуха и изменения объема воды, стекшей за заданный промежуток времени. На основании параметров использованных измерительных средств, максимально возможная абсолютная погрешность определения изменения объема принята 0,25 мл, а температуры 0,6 °С. Таким образом, установлено, что для диапазона полученных значений ККТ относительная погрешность их определения составляет 3,5 %.

В данном разделе подтверждена адекватность разработанной математической модели с использованием данных ЗАО «Термосталь», полученных при проведении термометрического эксперимента на мощностях предприятия ОАО «Юргинский машзавод» при термической обработке 12 цилиндрических заготовок диаметрами от 360 до 470 мм и длинами от 3 до 6,82 метра суммарной массой 81358 кг. Результатом сравнения изменения температур поверхности металла в математической модели с данными из термограммы в процессе ВО в диапазоне температур 900-300 °С стала 5% погрешность.

Используя разработанную математическую модель, проведены исследования влияния параметров футеровки на длительность процесса охлаждения. Выделены три условных типа футеровки:

- вся футеровка выполнена из шамотного кирпича;
- подина выполнена из шамота, стены и свод покрыты керамоволокном;
- концептуальный тип – применение керамоволокна на всех внутренних поверхностях печи, в том числе и на подине.

Приняты три садки печи по две, четыре и шесть заготовок цилиндрической формы, диаметром 1 метр, длиной 6 метров. Выбраны четыре расхода воздуха: 5, 10, 15, 20 тыс. м³/ч. Результаты исследования для четырех заготовок представлены на рис. 8.

Отмечено закономерное ускорение при использовании керамоволокна в среднем на 31-45% при сравнении первого и второго вариантов компоновки футеровки и 44-52% при сравнении первого и третьего вариантов.

Исследован механизм съема тепла с металла, с целью установления доли лучистой и конвективной составляющих. Для типичной компоновки печи – плотная подина и керамоволокно на стенах и своде доля конвективной составляющей в зависимости от расхода охлаждающего воздуха приведена на рис. 9а. Для концептуальной футеровки – полностью состоящей из керамоволокна – доля конвективной составляющей представлена на рис. 9б.

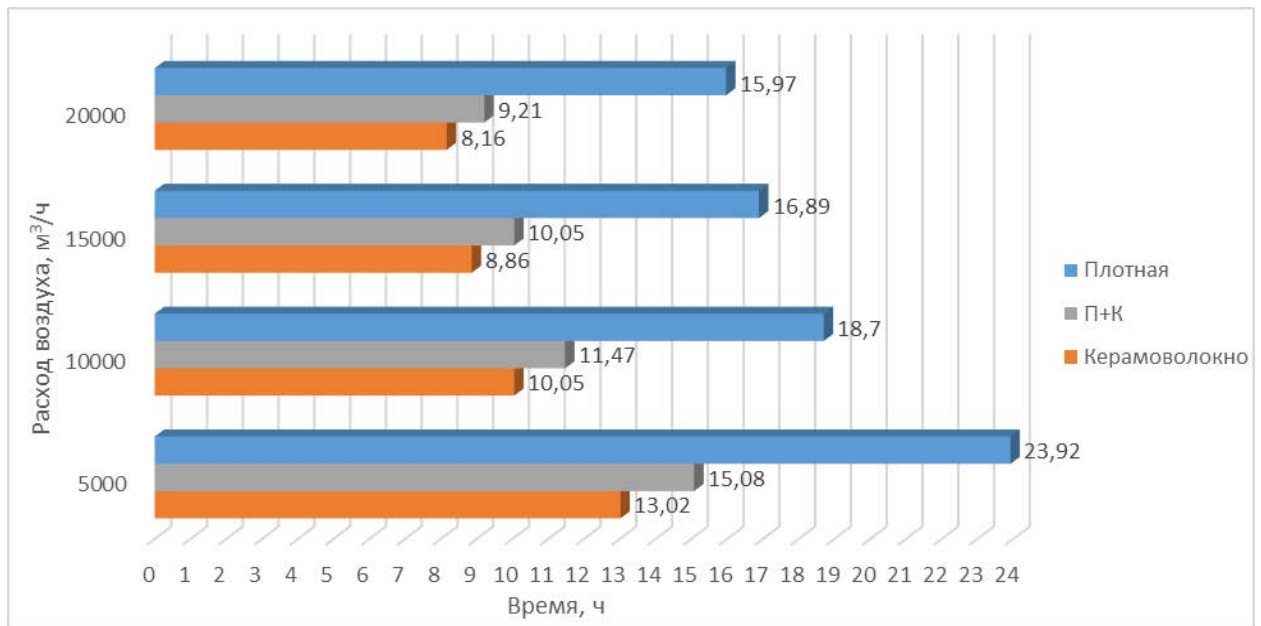


Рисунок 8 – Сравнение времени ВО при различных параметрах футеровки

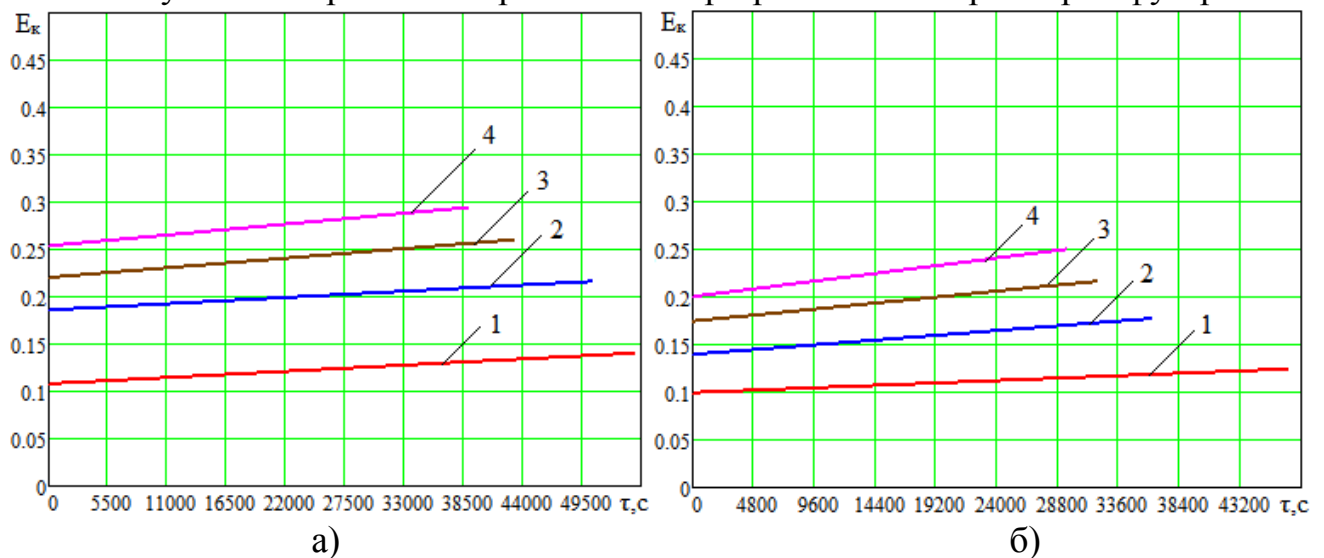
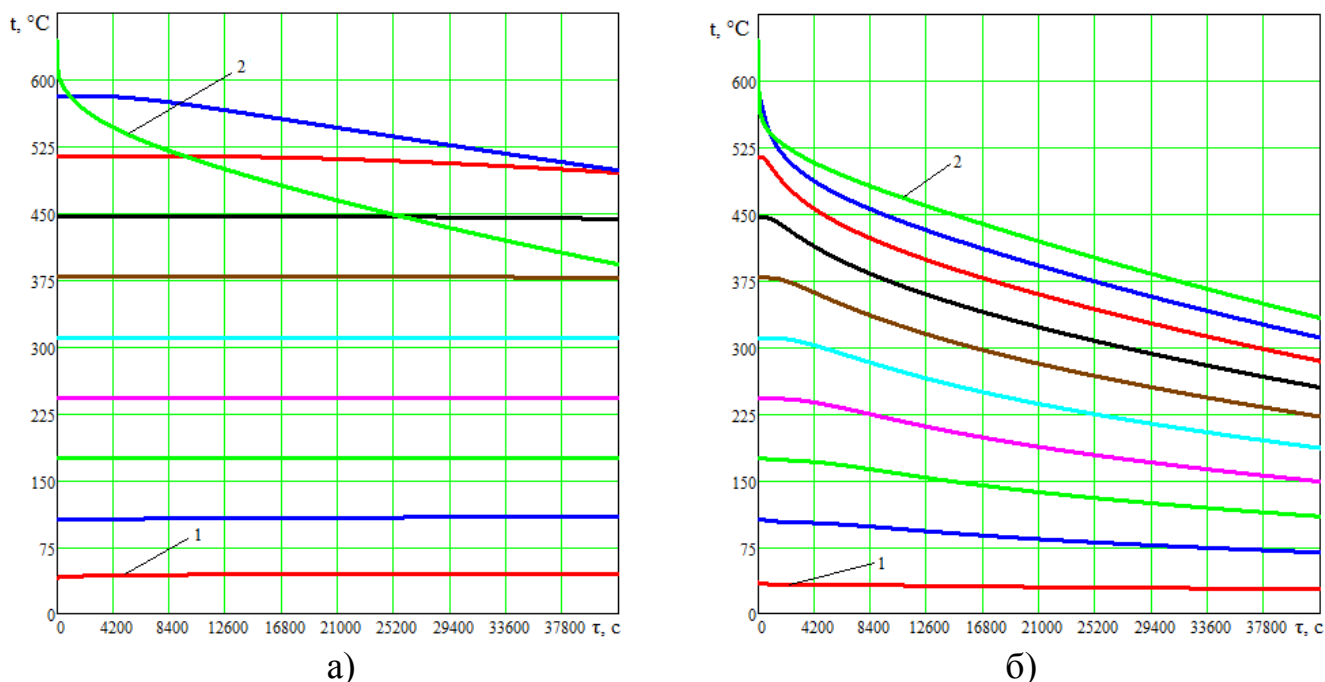


Рисунок 9 – Доля конвективной составляющей в общем количестве отводимой теплоты в зависимости от расхода воздуха (кривые 1 - 5, 2 - 10, 3 - 15, 4 - 20 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$)

Таким образом, получили развитие научные представления о механизме съема тепла при ВО металла в печи, за счет установления доли тепла, которая непосредственно снимается с поверхности металла конвекцией и составляет 10-30% в зависимости от массы садки печи и расхода охлаждающего воздуха. Остальное тепло передается излучением на поверхность футеровки и снимается с нее охлаждающим воздухом конвекцией.

При помощи созданной математической модели оценено изменение температуры различных частей комбинированной футеровки в течение процесса ВО. Так, например, на рис. 10 представлено изменение температурного поля плотной (а) и керамоволокнистой (б) частей футеровки при охлаждении четырех цилиндрических заготовок в камерной печи расходом 15 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$.



1 – температуры наружной части футеровки; 2 – температуры внутренней части футеровки; а) температурное поле плотной футеровки; б) температурное поле керамиволокнистой футеровки

Рисунок 10 – Изменение температуры различных частей футеровки по толщине

На данном рисунке видно, что плотная часть футеровки остывает медленнее и по толщине в целом она более горяча, чем керамиволокнистая часть. Вследствие лучистого теплообмена между металлом и плотной футеровкой ВО замедляется.

В четвертом разделе приведена инженерная методика проектного расчета процесса ВО металла в камерных печах, целью которой является определение требуемого расхода воздуха для поддержания заданной скорости охлаждения заготовок. В основу методики входит определение теплового потока в начальный (инерционный) период времени, составление функциональной зависимости между средней скоростью (w) у охлаждаемых тел, расходом воздуха (V) и расстояние тела от сопел истечения (S) согласно теории турбулентных струй по следующей формуле:

$$w(V, S) = \frac{V}{F_{\text{соп}}} \cdot \frac{0,96}{\frac{2 \cdot a \cdot S}{D_0} + 0,29} \cdot \frac{9}{35};$$

$$F_{\text{соп}} = \left(\frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \right) \cdot n_{\text{соп}},$$

где a – коэффициент турбулентной струи, равный 0,07-0,08; D_0 – диаметр сопла, м; $n_{\text{соп}}$ – количество сопел истечения, шт.

Обработка результатов математического моделирования позволила получить итоговое критериальное уравнение съема тепла с металла с учетом как комбинированного механизма передачи тепла металлом, так и роли футеровки со степенью при критерии Рейнольдса равной 0,4 и множителем уравнения 6,47.

Согласно полученному критериальному уравнению можно записать аналогичную зависимость для итогового коэффициента теплоотдачи α :

$$\alpha(V, S) = 6,47 \cdot \left(\frac{w(V, S) \cdot R}{\nu} \right)^{0,4} \cdot Pr^{0,43} \cdot \frac{\lambda_B}{2 \cdot R}$$

где R – радиус исследуемых заготовок, м.

В качестве характерной температуры, используемой при определении теплового потока, отводимого от металла, взята температура свежего воздуха на входе в печь.

При этом необходимо решить следующее уравнение, позволяющее определить требуемый расход охлаждающего воздуха:

$$q = \alpha(V, S) \cdot \left(\frac{t_{\text{пов}}^{\text{нач.}} - t_{\text{пов}}^{\text{кон.ин.}}}{2} - t_{\text{св.в.}} \right);$$

$$q = \frac{(s_{\text{охл}} \cdot \tau_{\text{ин}}) \cdot k_2 \cdot \lambda_M}{R},$$

где $t_{\text{пов}}^{\text{нач.}} - t_{\text{пов}}^{\text{кон.ин.}}$ – разность температур поверхности в начальный и конечный момент инерционного времени, °С; $t_{\text{св.в.}}$ – температура свежего воздуха, подаваемого в печь, °С; $s_{\text{охл}}$ – требуемая скорость охлаждения, °С/с; $\tau_{\text{ин}}$ – время инерционного периода, с; λ_M – коэффициент теплопроводности материала заготовки, Вт/(м·К); k_2 – коэффициент усреднения теплового потока для цилиндра.

При помощи разработанной инженерной методики находим температуру внутри печной камеры, характерные температуры металла в конце инерционного периода, тепловые потоки во всех периодах, общее время охлаждения и среднюю скорость охлаждения по традиционным зависимостям. Данная методика позволит давать прогноз по необходимому расходу воздуха в зависимости от требуемой скорости охлаждения.

В работе проведен теплотехнический анализ интенсификации процесса ВО путем увеличения расхода охлаждающего воздуха. Такой способ нуждается в исследовании, так как он является наиболее распространенным решением проблемы интенсификации процесса. Для проведения анализа получена следующая зависимость:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{\delta} = \frac{a \cdot Re^b \cdot Pr^c \cdot \lambda}{\delta} = \frac{a \cdot k^b \cdot V^b \cdot Pr^c \cdot \lambda}{F^b \cdot \delta^{1-b} \cdot \nu^b} = V^b \cdot d;$$

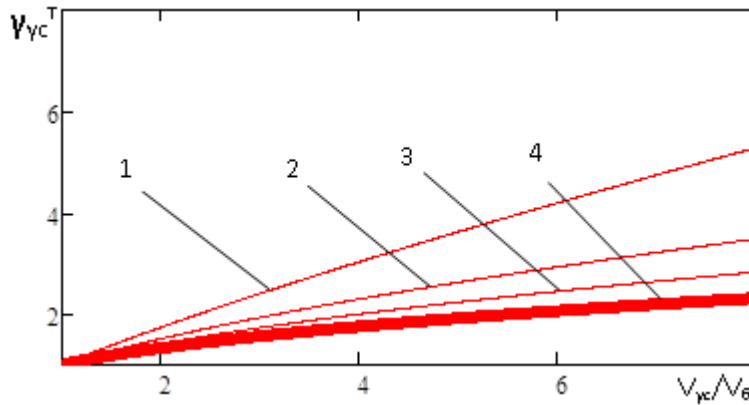
$$d = \frac{a \cdot k^b \cdot Pr^c \cdot \lambda}{F^b \cdot \delta^{1-b} \cdot \nu^b},$$

где V – расход охлаждающей среды на печь, м³/с; k – коэффициент, учитывающий снижение скорости среды по сравнению с начальным значением при достижении поверхности обдуваемых тел, м/с; F – площадь поперечного сечения каналов, из которых вытекает охлаждающая среда, м²; ν – кинематическая вязкость охлаждающей среды, м²/с; δ – характерный геометрический размер обтекаемых тел, м; λ – коэффициент теплопроводности охлаждающей среды, Вт/(м·К).

Интенсификация, выраженная при помощи отведенного теплового потока в базовом и усиленном режимах, может быть записано как:

$$\gamma_{yc}^T = \frac{q_{yc}}{q_{баз}} = \frac{\alpha_{yc}}{\alpha_{баз}} = \left(\frac{V_{yc}}{V_{баз}} \right)^b.$$

Исследования проведены для ряда показателей степени при Рейнольдсе, результаты которых показаны на рис. 11:



здесь 0,8 – соответствующий конвективному съему тепла при движении среды вдоль плоской поверхности (кривая 1); 0,6 – соответствующий конвективному съему тепла при поперечном обтекании цилиндра (кривая 2); 0,5 – экспериментально установленное значение, для сложного конвективного

теплообмена в камерных печах (кривая 3); 0,4 – полученный на основании анализа результатов численных экспериментов и соответствующий критериальному уравнению, описывающему итоговый, комбинированный съем тепла с поверхности металла (кривая 4).

Рисунок 11 - Зависимость усиления интенсивности ВО от относительного увеличения расхода охладителя

Анализ наглядно показывает, что резервы регулирования процесса охлаждения металла путем увеличения расхода воздуха достаточно ограничены.

Исследована энергетическая эффективность данного способа интенсификации, которую можно оценить следующим образом.

Энергетический коэффициент представляет собой:

$$K_{баз} = \frac{q_{баз} \cdot F_m \cdot \eta}{\Delta P_{баз} \cdot V_{баз}}; \quad K_{yc} = \frac{q_{yc} \cdot F_m \cdot \eta}{\Delta P_{yc} \cdot V_{yc}};$$

где $q_{баз}$ q_{yc} – тепловой поток, отводимый от металла в базовом и усиленном режимах, Вт/м²; $\Delta P_{баз}$ – потери давления на транспорт и истечение охладителя при его базовом и усиленном расходах, Па; F_m – площадь поверхности охлаждаемого металла, м²; V – расход охлаждающего воздуха, м³/с.

Относительное изменение энергетической эффективности:

$$\gamma_{эн}^{yc} = \frac{K_{yc}}{K_{баз}} = \left(\frac{V_{yc}}{V_{баз}} \right)^{b-3} = \left(\gamma_{yc}^T \right)^{1-\frac{3}{b}}$$

Графическая зависимость изменения энергетической эффективности охлаждения от относительного увеличения расхода охладителя для степени при Рейнольдсе равной 0,4 представлена на рис. 12.

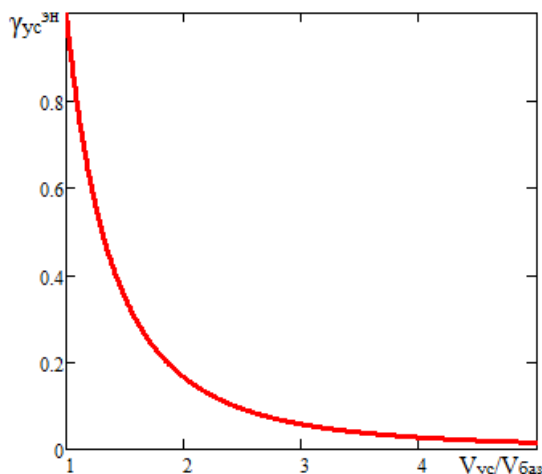


Рисунок 12 - Зависимость изменения энергетической эффективности охлаждения от относительного увеличения расхода охладителя

В работе экспериментально исследован способ усиления конвективного теплообмена путем импульсной подачи теплоносителя. Методика проведения эксперимента аналогична проведению безимпульсного эксперимента с использованием тел кубической формы. Величина стока жидкости по окончании эксперимента продемонстрировала рост на 7% относительно безимпульсных экспериментов.

Результатом обработки экспериментальных данных стало критериальное уравнение конвективного теплообмена воздуха и охлаждаемых тел:

$$Nu = 0,73 \cdot Re^{0,62} \cdot Pr_{ж}^{0,36} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \cdot Sh^{0,23},$$

где Sh – число Струхала, характеризующее нестационарность течения среды.

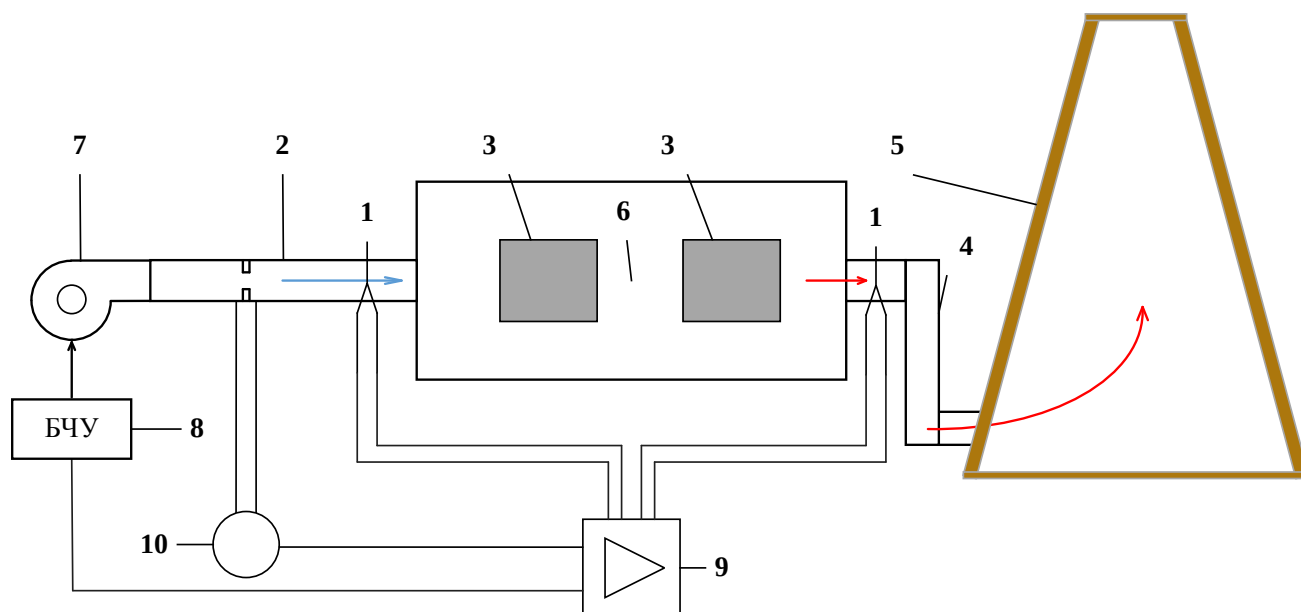
Сравнивая коэффициенты теплоотдачи в случае импульсной подачи теплоносителя с безимпульсной, можно сделать вывод об его увеличении на 15-22% во всем диапазоне времени. Такой эффект усиления достигается за счет срывания воздушного пограничного слоя у поверхности кубиков. При стационарном процессе обдува присутствие этого слоя несколько занижает теплообмен между средой и телом.

При интенсификации теплообмена на 15% путем подачи воздуха в импульсном режиме энергетический коэффициент на 54% выше, чем в случае равнозначного усиления теплообмена путем увеличения расхода воздуха.

Для создания пульсаций использовалось устройство в форме вращающегося диска внутри воздухопровода с 87% перекрытием. Так как данное устройство не стандартного перекрытия, проведены исследования по определению коэффициента местного сопротивления заслонки.

Согласно ряду проведенных экспериментов, расход воздуха при различных частотах пульсаций в диапазоне от 0,8 до 1,6 Гц оставался неизменным, что позволяет судить об отсутствии влияния частоты вращения на коэффициент местного сопротивления заслонки, который составляет величину 20,95, что в пределах инженерной погрешности согласуется с коэффициентом местного сопротивления заслонки полного перекрытия, повернутой на 45°.

Разработана система автоматического контроля и мониторинга теплового состояния металла в печи, основанная на анализе теплоты, удаляемой из печи (рис. 13). Для реализации технологии управления необходимо разместить две термодары в каналах для подачи и удаления воздуха, регулятор, а также блок частотного управления приводом двигателя вентилятора для оперативного изменения количества подаваемого воздуха в печь.



1 – термопары для измерения температур воздуха; 2 – трубопровод охлаждающего воздуха; 3 – охлаждаемые изделия; 4 – трубопровод нагретого воздуха; 5 – дымовая труба; 6 – камера печи; 7 – вентилятор; 8 – блок частотного управления вентилятором; 9 – ПИД регулятор; 10 – датчик давления с цифровой обработкой сигнала

Рисунок 13 – Схема размещения устройств автоматизации в камерной печи

Предлагаемая система автоматического контроля и мониторинга технологического процесса охлаждения заготовок в камерной печи позволит вести учет количества отведенной теплоты от охлаждаемых изделий, а также контролировать количество охлаждающего воздуха для поддержания заданной скорости охлаждения в течении операции. Данная система дополнительно может служить источником дополнительной информации для математической модели, задавая граничные условия II рода.

Рассчитаны два основных направления, по которым планируется получение экономического эффекта при внедрении предлагаемых мероприятий: за счет увеличения производительности термической печи, а также за счет снижения процента брака металла. В результате расчетов суммарный экономический эффект составит 3,078 млн. рублей в год.

Выводы.

1. На основании литературного обзора выделены основные проблемы, связанные со значительным влиянием воздушного охлаждения на свойства металла в цикле термической обработки; отсутствием в открытых литературных источниках критериальных уравнений, описывающих конвективный теплообмен в камерных печах при условиях обдува тел, приближенных к реальным телам в натуральную величину; отсутствием общепринятой инженерной методики расчета процесса воздушного охлаждения.

2. Разработана математическая модель для исследования процесса конвективного теплообмена в камерных печах. Математическая модель базируется на решении дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности с

дифференциальным учетом участков футеровки, взаимным теплообменом металла с элементами футеровки, а также определении температуры натекания воздушной среды на тело на основании теории турбулентных струй, с учетом смешения свежего воздуха с газовой средой печной камеры, принимающая в расчет долю конвективной и лучистой составляющей в общем количестве отводимой теплоты от металла. Модель позволяет вести расчет в 60-100 раз быстрее темпа реального времени за счет использования одномерной постановки задачи при гарантированном достижении заданного уровня точности. Адекватность математической модели подтверждена.

3. Разработана лабораторная модель камерной печи для определения коэффициента конвективной теплоотдачи, получения критериальных уравнений для конкретных схем натекания воздуха. В дальнейшем полученные критериальные уравнения использованы в математической модели для исследования реальной картины натекания.

4. В результате проведения физического эксперимента получены критериальные уравнения, описывающие теплообмен в камерной печи при обдуве тел кубической и цилиндрической формы с характерными степенями при Рейнольдсе и множителями перед уравнением равными 0,62; 0,14 и 0,5; 1,49 соответственно.

5. Исследовано влияние параметров футеровки на процесс воздушного охлаждения в печи. Показано среднее ускорение данной операции при использовании низкоинерционных материалов футеровки взамен плотного огнеупора на 43-50% в зависимости от расхода охладителя. При использовании плотной подины и керамоволокнистого покрытия стен и свода ускорение составляет 30-41% в зависимости от тех же параметров.

6. Проведен анализ доли лучистой и конвективной составляющей при охлаждении металла в печи при различных параметрах садки, расходах и параметрах футеровки, благодаря чему установлен механизм съема тепла с металла. Установлено, что доля конвективной составляющей находится в пределах 10-30% в зависимости от массы садки печи и расхода охлаждающего воздуха.

7. Разработана инженерная методика проектного расчета процесса воздушного охлаждения металла в печи, позволяющая определять необходимое количество воздуха для поддержания заданного темпа охлаждения.

8. Предложена и проанализирована возможность интенсификации охлаждения при помощи подачи воздуха в импульсном режиме в диапазоне частот 0,8-1,6 Гц. Получено критериальное уравнение, описывающее конвективный теплообмен при импульсной подаче воздуха для тел кубической формы:

$$Nu = 0,73 \cdot Re^{0,62} \cdot Pr_{ж}^{0,36} \cdot (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25} \cdot Sh^{0,23}.$$

В импульсном режиме среднее увеличение коэффициента конвективной теплоотдачи составляет 17,5%. Энергетический коэффициент в данном случае на 53% выше, чем при аналогичной интенсификации, достигнутой путем повышения расхода.

9. Получена формула для определения коэффициента местного сопротивления вращающихся заслонок неполного перекрытия. Установлено, что

на малых частотах вращения Кмс заслонки с 87% перекрытием составляет 20,95. Значение может быть использовано для расчета аэродинамической сети печи с учетом пульсатора и выбора нагнетателя.

10. Предложена система автоматического контроля процесса охлаждения, основанная на анализе количества удаляемого тепла из печи, который выполняется на основании расчетной обработки текущих значений температур свежего и удаляемого воздуха, а также расхода воздуха. Преимуществом данной системы являются минимальная стоимость составных компонентов оборудования, надежность и достаточная точность результатов. Работая в паре с разработанной математической моделью, данная система может параллельно задавать дополнительную информацию в виде граничных условий II рода.

Основные научные положения диссертации изложены в работах:

– публикации в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН Украины:

1. Бирюков А.Б. Изучение гидродинамических параметров работы устройств, предназначенных для создания низкочастотного пульсирующего расхода газообразных сред: [Текст] / А.Б. Бирюков, **П.А. Гнитиев**. // Металл и литье Украины. – К.: Наш формат, 2014. – № 2 (249). – С. 32-34.

2. **Гнитиев П.А.** Конвективный теплообмен в печах при импульсном и безимпульсном режимах подачи теплоносителя: [Текст] / П.А. Гнитиев // Промышленная теплотехника. – К.: Академперіодика, 2015. - № 2. – С. 39-47.

– публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

3. Бирюков А.Б. Анализ современного состояния технологии воздушного охлаждения металла в печах: [Текст] / А.Б. Бирюков, С.М. Сафьянц, **П.А. Гнитиев**. // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – М.: Черметинформация, 2014. - № 11 (1379). – С. 42-47.

4. Бирюков А.Б. Математическая модель для изучения процессов воздушного охлаждения металла в печах: [Текст] / А.Б. Бирюков, А.И. Волошин, **П.А. Гнитиев**. // Сталь. – М.: Печатный дом, 2015. - № 7. – С. 77-81.

– публикации в других изданиях:

5. Бирюков А.Б. Исследование возможности ускорения операции воздушного охлаждения заготовок в печи за счет импульсной подачи охлаждающего воздуха: [Текст] / А.Б. Бирюков, **П.А. Гнитиев**. // Металлургическая теплотехника: сб. науч. трудов НМетАУ. – Днепропетровск: Новая идеология, 2013. – выпуск 5 (20). – С. 9-15.

6. Бирюков А.Б. Теплотехнический анализ интенсификации охлаждения металла в камерных печах: [Текст] / А.Б. Бирюков, **П.А. Гнитиев**. // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика: зб. наук. праць. – Дніпропетровськ: Нова ідеологія, 2015. – вип. 7. – С. 14-23.

– публикации по материалам научных конференций:

7. Бирюков А.Б. Исследование конвективного теплообмена в печах камерного типа: [Текст] / А.Б. Бирюков, **П.А. Гнитиев**. // Проект Sworld. Междунар. научно-практич. интернет-конф. «Современные направления

теоретических и прикладных исследований 2014» 18-30 марта 2014 г. / Маркова АД. – Иваново, 2014. – С. 48-53.

8. Бирюков А.Б. Сравнение интенсивности конвективного теплообмена при импульсном и безимпульсном режимах подачи теплоносителя: [Текст] / А.Б. Бирюков, Сафьянц С.М., **П.А. Гниatieв**. // Проект Sworld. Междунар. научно-практич. интернет-конф. «Современные направления теоретических и прикладных исследований 2014» 17-28 июня 2014 г. / Маркова АД. – Иваново, 2014. – С. 77-82.

9. Бирюков А.Б. Система контроля и мониторинга теплового состояния металла при воздушном охлаждении в камерной печи: [Текст] / А.Б. Бирюков, **П.А. Гниatieв**. // Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Пошук молодих. сб. науч. трудов XIV научно-технической конференции аспирантов и студентов в г. Донецке 22-24 апреля 2014 г. / ДонНТУ. – Донецк, 2014. – С. 288-289.

10. Бирюков А.Б. Повышение качества термической обработки изделий ответственного назначения как способ снижения ресурсоэнергопотребления: [Текст] / А.Б. Бирюков, **П.А. Гниatieв** // XXIV Всеукраинская научная конференция аспирантов и студентов «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов» ДонНТУ. – Донецк. – т. №2. – 2014 г. – С. 115-117.

11. Бирюков А.Б. Изучение гидродинамических параметров работы устройств, предназначенных для создания низкочастотного пульсирующего расхода газообразных сред: [Текст] / А.Б. Бирюков, **П.А. Гниatieв** // XXIV Международная научно-практическая конференция «Інноваційний потенціал світової науки – XXI сторіччя». – Запоріжжє. – 2014 г. – т. №2. – С. 54-56.

12. Бирюков А.Б. Аналитическая методика для определения температурного состояния заготовок при их воздушном охлаждении в печах: [Текст] / А.Б. Бирюков, **П.А. Гниatieв** // VII Международная научно-практическая конференция «Донбас 2020: Перспективи розвитку очима молодих вчених» ДонНТУ. –Донецк. – 20-23 мая 2014 г. – С. 9-12.

13. **Гниatieв П.А.** Исследование влияния расхода воздуха на механизм охлаждения металла в камерных печах: [Текст] / П.А. Гниatieв, А.Б. Бирюков // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии / Триакон. – Днепропетровск, 2015. – С. 165-168.

14. **Гниatieв П.А.** Система диагностики теплового состояния металла в камерной печи: [Текст] / П.А. Гниatieв // Молодежный форум: технические и математические науки / ВГЛУ, - Воронеж, 2015. – С. 266-269.

- патенты:

15. Пат. 85127 Украина, МПК F28F 13/10. Спосіб інтенсифікації конвективного теплообміну [Текст] / Бирюков А.Б., Гавриленко Б.В., Скоробогатова И.В., **Гниatieв П.А.**; заявитель Государственное высшее учебное заведение донецкий национальный технический университет. - u201306161; заявл. 18.05.2013; опубл. 11.11.2013, Бюл. № 21. – 5 с. : ил.

АННОТАЦИЯ

Гнитиев П.А. Совершенствование технологических и конструктивных параметров процессов воздушного охлаждения металла в камерных печах.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика» - Донецкий национальный технический университет, Донецк, 2016.

В работе исследован процесс воздушного охлаждения металла в камерных печах термообработки. Проведен анализ существующих технологий охлаждения, где показано значительное влияние механизма охлаждения на конечную структуру металла.

На экспериментальной модели исследовано конвективное охлаждения для тел кубической и цилиндрической формы, получены соответствующие критериальные уравнения.

Создана математическая модель для исследования процесса охлаждения с учетом различной компоновки футеровки и расхода воздуха в диапазоне 5-20 тыс. м³/ч. Исследован механизм охлаждения металла в печах с определением доли конвективной и лучистой составляющих. Представленная математическая модель позволила исследовать влияние расхода и типа футеровки на длительность воздушного охлаждения.

Составлена инженерная методика для расчета расхода воздуха для поддержания заданной скорости охлаждения.

Рассмотрены вопросы интенсификации воздушного охлаждения путем повышения расхода воздуха, показана их низкая энергетическая эффективность. Решена задача интенсификации конвективного охлаждения путем подачи воздуха в импульсном режиме.

Исследован теплообмен при охлаждении материала в модели камерной печи при импульсной подаче воздуха, получено соответствующее критериальное уравнение.

Предложена система автоматического контроля за процессом воздушного охлаждения, выступающая источником дополнительной информации (задает ГУ II рода) для математической модели.

Ключевые слова: воздушное охлаждение, конвективный теплообмен, математическое моделирование, футеровка из керамоволокна.

ABSTRACT

Gnitiev P.A. Improvement of technological and design parameters of metal air-cooling processes in chamber furnaces.

Thesis on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences, specialty 05.14.04 – «Industrial Heat-and-Power Engineering». Donetsk national technical university, Donetsk, 2016.

In the dissertation metal air-cooling process in chamber furnace was investigated. Analysis of existing cooling technology was carried out, which shows the significant impact of cooling mechanism on the final metal structure.

Convective cooling process of cubic and cylindrical bodies on the experimental model was studied.

Mathematical model for studying air-cooling process, which takes into account different lining design and air flow rate in the range 5-20 thousands m^3/h was created. Mechanism of metal air-cooling process in chamber furnace was studied with convective and radiant parts determination. Presented mathematical model allowed to investigate influence of air flow rate and lining type on cooling process duration.

Engineering method for calculating the air flow to maintain the desired cooling rate was made.

Problems of air-cooling process intensification by increasing of air flow rate was considered, their low energy efficiency was shown. Intensification problem of convective cooling process was solved by pulsed air supply.

Heat transfer during material air-cooling process in model of chamber furnace during pulsed air supply was studied, appropriate criterion equation is obtained.

Automatic control system of air-cooling process was offered, which was the source of additional information for mathematical model (specify boundary conditions of the second kind).

Key words: air-cooling process, convective heat exchange, mathematical modeling, ceramic fiber lining.