

*На правах рукописи*



Попов Евгений Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ  
ТЕХНОЛОГИИ НАГРЕВА МЕТАЛЛА И КОНСТРУКЦИИ  
НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ**

05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2014

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

Научный руководитель: Дружинин Геннадий Михайлович  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Беленький Анатолий Матвеевич,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС»,  
профессор кафедры теплофизики и экологии  
металлургического производства;

Сеничкин Борис Кронидович,  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный  
технический университет имени Г.И. Носова»,  
доцент кафедры теплотехнических и энергетических  
систем

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный  
индустриальный университет», г. Новокузнецк

Защита диссертации состоится 03 октября 2014 года в 15:00 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, Главный учебный корпус, Зал ученого совета (ауд. I).

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 «\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Сулицин Андрей Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время одной из важнейших проблем является экономия топливно-энергетических ресурсов. При этом особое значение энергосбережение имеет для энергоемких отраслей промышленности, к которым относится металлургия и, в частности, прокатное и термическое производства.

О значимости металлургической промышленности в развитии страны говорится в «Стратегии развития металлургической промышленности России на период до 2020 года». В данном документе отмечается, что доля металлургии в ВВП России составляет около 5%, промышленном производстве – порядка 18%, экспорте – 14%.

Обработка металла в нагревательных печах – неотъемлемый этап в производстве металлопродукции, стоимость которой напрямую зависит от эффективности этого процесса.

Необходимыми условиями получения высококачественной продукции и повышения эффективности работы нагревательных печей являются правильный выбор конструкции теплового агрегата и точное соблюдение температурного графика обработки металла.

Экспериментальные исследования в производственных условиях являются дорогостоящим, сложным и длительным процессом. Современное состояние вычислительной техники и средств математического обеспечения, включая численные методы реализации сложных математических моделей, позволяют получать достаточно точную и обширную информацию о различных тепловых процессах путём проведения вычислительных экспериментов. Этот метод исследования существенно сокращает сроки и затраты на разработку рациональных тепловых режимов.

**Целью диссертационной работы является** разработка конструкции современной печи для нагрева заготовок рельсовых накладок и исследование особенностей её тепловой работы.

Для достижения цели настоящего исследования необходимо обеспечить решение следующих **задач**:

1. Разработка методов расчета нагрева металла в переходных режимах работы печи с учетом изменения теплофизических свойств стали и окалинообразования.
2. Определение термической неоднородности нагрева садки и разработка способов её уменьшения.
3. Разработка конструкции энергоэффективной печи для нагрева заготовок рельсовых накладок.
4. Экспериментальные исследования тепловой работы промышленной печи для нагрева рельсовых накладок.

**Методы исследования.** Для достижения поставленной цели разработана математическая модель по расчету температурного поля внутри заготовок, а также методика проведения промышленного эксперимента, включающая в себя алгоритм обработки данных, полученных в ходе исследований. Промышленный эксперимент выполнен на проходной толкательной печи ОАО «Нижнесалдинский металлургический завод» г. Нижняя Салда. Измерения осуществлялись современными стационарными и переносными приборами, прошедшими государственную поверку, что определило достоверность полученных результатов. При обработке экспериментальных данных использован расчетно-теоретический анализ, основу которого составили положения теории тепло- и массообмена, теории металлургических процессов, при этом противоречий известным физическим положениям установлено не было.

**Научная новизна работы:**

1. Разработана математическая модель для расчета температурного поля по сечению заготовки на всем промежутке времени нагрева металла с учетом длительных остановок печи, а также с учетом процессов окалинообразования и теплоты фазового перехода перлит-аустенит и его влияния на теплопроводность и теплоемкость металла.

2. Впервые предложен метод расчета параметров разводки глиссажных труб, основанный на расчетах температурного поля внутри нагреваемой заготовки. Предложена методика по устранению «темных пятен», образующихся в результате экранирования подовыми трубами металла.

3. Предложена методика расчета окалинообразования при нагреве металла в толкательной печи, позволяющая оценить угар с учетом особенностей температурно-теплового режима.

4. Разработана математическая модель расчета теплообмена излучением на основе скорректированного уравнения теплопроводности (концепция С.Н.Шорина), впервые позволяющая учесть циркуляцию продуктов сгорания через рекуперативные горелки и режим импульсного сжигания топлива (режим незатухающих колебаний).

**Практическая значимость работы.** Проведены исследования тепловой работы промышленной печи для нагрева заготовок рельсовых накладок. Получены новые экспериментальные данные по динамике нагрева, термической неоднородности и окалинообразованию. Выполнены пусконаладочные и режимно-наладочные работы на печи, по результатам которых установлены соответствие фактических показателей тепловой работы проектным и адекватность методики расчета.

**Личный вклад автора работы** заключается в постановке задач исследования, разработке его методологии, в разработке математической модели

для расчета температурного поля по сечению заготовки, а также в организации и проведении промышленного эксперимента и обработке полученных данных.

**На защиту выносятся:**

1. Математическая модель для расчета температурного поля по сечению заготовки на всем промежутке времени нагрева металла.
2. Способ устранения «темных пятен» и методику снижения окалинообразования в процессе нагрева заготовок.
3. Конструкция и результаты расчетно-экспериментальных исследований тепловой работы толкательной печи для нагрева заготовок рельсовых скреплений.
4. Методика учета импульсной системы отопления печи при расчетах по разработанной математической модели.

**Апробация работы.** Материалы диссертации доложены и обсуждены на международной интерактивной научно-практической конференции "Инновации в материаловедении и металлургии" (г.Екатеринбург, 2011 г.), всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных "Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве" (г.Екатеринбург, 2012 г.), международном конгрессе «Новые направления в области теплотехнического строительства. Конструкции, технологии, материалы. Энергосбережение, экология и промышленная безопасность» ассоциации печетрубостроений», (г.Москва, 2013 г.), конгрессе прокатчиков (г.Череповец, 2013 г.), научно-техническом семинаре «Совершенствование тепловой работы и конструкций нагревательных печей станов горячей прокатки» (г.Москва, 2013 г.).

**Публикации.** Основное содержание диссертационной работы изложено в 10 научных статьях, из них 3 опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, изложена на 152 страницах машинописного текста и содержит 12 таблиц, 71 рисунок, 4 приложения и список литературы, содержащий 76 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, указана её научная новизна и практическая значимость.

В **первой главе** «Применение толкательных печей для нагрева металла перед прокаткой» рассмотрены существующие конструкции печей толкательного типа и особенности их работы.

Проходная нагревательная печь толкательного типа на сегодняшний день является самым доступным и предпочтительным (низкая себестоимость, простота конструкции и эксплуатации) прототипом для решения основного вопроса работы

– разработка конструкции печи для нагрева под закалку заготовок рельсовых накладок.

Между тем особое место в исследовании занимает изучение работы печи при незапланированных простоях. В работе представлены факты, приводящие к необходимости организации автоматического управления тепловым режимом нагревательной печи в случаях длительного простоя.

Рассмотрены различные системы отопления проходных нагревательных печей. В настоящее время всё большую популярность получают рекуперативные горелочные устройства с температурой подогрева воздуха до 400-600°C. Из известных горелок этого класса необходимо отметить скоростные рекуперативные горелки немецких фирм «Kromschroeder» и «WS», выпускающих горелочные устройства для нагревательных и термических печей в широком интервале тепловых мощностей. Кроме того, на рынке представлены и другие производители рекуперативных горелок: IBS (Германия), Bloom Combustion (США), ОАО «ВНИИМТ», НПФ «Горелочный центр» и ООО «КОМАС» (Россия).

Исходя из изучения данных вопросов представлено необходимым и актуальным решение следующих задач:

- разработать методы расчета металла в переходные периоды (с простоями печи) с учетом теплофизических свойств стали и окалинообразования;
- расчетным методом исследовать влияние подовых устройств (глиссажных труб) на термическую неоднородность нагрева металла и способа ее уменьшения;
- разработать конструкцию энергоэффективной печи для нагрева заготовок рельсовых накладок;
- провести экспериментальные и расчетные исследования тепловой работы промышленной печи при нагреве заготовок рельсовых накладок.

Во **второй главе** «Разработка конструкции печи для нагрева заготовок рельсовых накладок» представлены результаты разработки и обоснования концепции печи для нагрева заготовок рельсовых накладок. Цель разработки – обеспечение технологических требований по нагреву заготовок при минимизации стоимости строительства и нагрева.

Исходя из литературного обзора, на сегодняшний день более всего поставленной цели соответствует печь проходная толкательного типа. Наиболее простым и оптимальным способом выдачи заготовок из толкательной печи после их нагрева, является торцевая выдача.

Учитывая, что обычно применяемые в толкательных печах для транспортировки садки глиссажные водоохлаждаемые трубы увеличивают расход тепла на её нагрев, для данной печи выбраны неохлаждаемые опорные направляющие из жаропрочной стали. Это позволяет не только уменьшить расход

тепла на нагрев, но и практически свести к минимуму наличие темных пятен на опорной поверхности заготовок. В четвертой зоне (прилегающей к участку выдачи заготовок из печи) направляющие будут лежать на сплошном поду (для выравнивания температуры по сечению), а обогрев будет осуществляться только верхними горелками.

Одним из важных моментов концепции печи является система отопления, включающая в себя горелочные устройства и их компоновку (расположение) на печи, количество температурно-тепловых зон и возможность их регулирования для обеспечения заданного уровня температур и равномерности нагрева садки. Последнее является одним из определяющих факторов, так как после нагрева заготовка проходит процесс закалки.

Исходя из расчетной (по тепловому балансу) мощности печи (1920 кВт) и её предварительных размеров, была определена единичная тепловая мощность горелочных устройств (не более 300 кВт). Это позволило рекомендовать для сжигания природного газа рекуперативные горелочные устройства, обеспечивающее высокотемпературный нагрев воздуха горения (до  $500\div 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и равномерное температурное поле в объеме печи за счет импульсной системы регулирования расхода газа (включено-выключено), обеспечивающей высокую скорость истечения потоков из горелки в течение всего периода работы.

Печь разделена на 4 зоны управления. Зоны 1, 2 и 3 являются основными зонами двухстороннего нагрева металла. Зона 4 служит для выравнивания температуры по длине и толщине заготовок. На рисунке 1 представлена схема толкательной печи для нагрева заготовок рельсовых накладок.

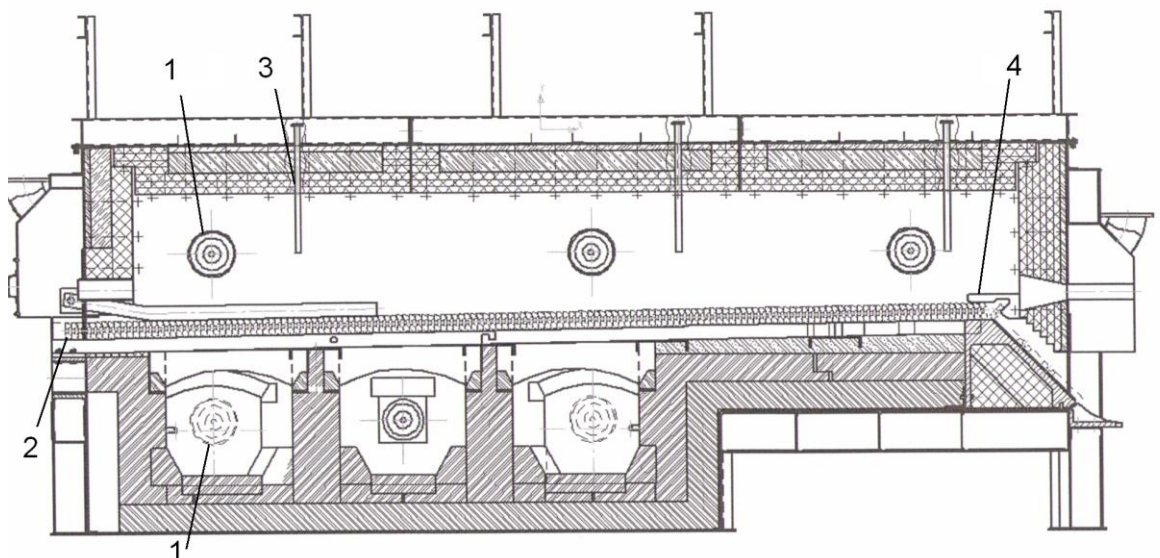


Рисунок 1 – Схема толкательной печи

1 – рекуперативные горелки; 2 – заготовки рельсовых накладок; 3 – сводовые термопары; 4 – устройство для разделения заготовок

Для сжигания природного газа применены рекуперативные скоростные горелки REKUMAT M300 в первых трёх зонах и REKUMAT M250 – в четвертой зоне (производство немецкой фирмы WS).

Конструкция рекуперативной горелки REKUMAT основана на интегрированном теплообменнике. Печные газы удаляются из печи через встроенный в горелку рекуператор, а воздух, идущий на горение, нагревается, охлаждая отходящие газы. Также отличительной особенностью данных горелок является возможность, по достижении температуры 850 °С, работы в режиме объемного беспламенного горения (режим FLOX).

Данный режим уменьшает образование обычных для пламени неоднородностей температуры (высокотемпературных пиков), что является необходимым условием снижения уровня NO<sub>x</sub> при предварительном подогреве воздуха для горения до высокой температуры. Окисление без заметного пламени достигается путём предварительного смешивания топливной смеси с продуктами сгорания в объеме печи. Специальные сопла подачи воздуха и топлива создают высокую скорость газовых струй, которые подсасывают продукты сгорания из топочного пространства. При режиме FLOX возгорание происходит благодаря температуре окружающей среды. Электронная система блокировки исключает работу горелок при температуре ниже разрешенной (850 °С). Горелки REKUMAT M оборудованы системами безопасности и контроля воспламенения и горения. После достижения в печи температуры самовоспламенения, горелки автоматически переходят в режим FLOX.

В третьей главе «Расчетно-экспериментальные исследования особенностей нагрева заготовок в многозонных толкательных печах» приведено описание методики исследования особенностей нагрева заготовок в печах данного типа.

Определение поля температур в сечении нагреваемой заготовки при определении динамики нагрева производилось с применением численного метода конечных элементов при решении нелинейного уравнения теплопроводности

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + Q(x, y, \tau), \quad (1)$$

где  $\rho$  – массовая плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $C$  – истинная теплоемкость металла, Дж/(кг·К).

С учетом начального условия  $T(\tau_0)=T_n$  при  $\tau=0$ , а также граничных условий на поверхности заготовки:

$$\pm \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\text{пов}} = \alpha_k (T_{\text{пов}} - T_{cp}) + \sigma_\epsilon (T_{\text{пов}}^4 - T_{cp}^4), \quad (2)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $\alpha_k$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\sigma_\epsilon$  – коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $T_{\text{пов}}$  – температура поверхности, К;  $T_{cp}$  – температура окружающей среды, К.



При повышении температуры металла до 580-620 °С углеродистая сталь претерпевает превращение исходной структуры перлита в структуру аустенита, сопровождаемое выделением теплоты. Учет выделения теплоты превращения осуществляется заданием плотности источника тепла в виде

$$Q = \rho L \frac{\partial \Psi}{\partial \tau}, \quad (3)$$

где  $L$  – объемная плотность источника тепла, сопровождающего протекание фазовых превращений, кДж/кг;  $\Psi$  – доля превращенного аустенита.

Существенной особенностью предлагаемой математической модели является совместное решение задачи теплопроводности для нагреваемого сляба и участка опорной (глыссажной) трубы, внешняя поверхность которой теплоизолирована с целью снижения тепловых потерь. Другая особенность математической модели состоит в учете зависимости основных теплофизических свойств стали – теплопроводности и теплоемкости от температуры.

Для определения истинной теплоемкости сталей различного химического состава при наличии  $n$ -го количества фазовых превращений используется уравнение:

$$C(T) = C_0 + \sum_{i=1}^n \frac{m_i L_i}{\Delta T_i} \exp[-a_i^2 (\frac{T_{i0} - T}{T_{i0} - T_{i1}})^2], \quad (4)$$

где  $C_0$  – истинная теплоемкость стали при отсутствии фазовых превращений, Дж/(кг·К);  $m_i$ ,  $a_i$  – константы, зависящие от функции ошибок;  $T_0$  – температуры начала фазовых превращений, К;  $T_1$  – температуры окончания фазовых превращений, К.

На рисунке 2 видны значительные различия в функциях теплоемкости данных сталей от температуры. Обращает на себя внимание отсутствие резкого скачка значения теплоемкости для стали 1X18H9T, что можно объяснить отсутствием у этой марки стали фазовых превращений в рассматриваемом диапазоне температур. У стали 2X13 наблюдается сразу два экстремума теплоемкости – первый в интервале 650-800 °С и второй – 800-900 °С.

Также важным теплофизическим свойством стали при нагреве является теплопроводность, зависимость которой от температуры имеет вид:

$$\lambda(T) = (\lambda_0 - \lambda_1) \{ [1 - \sin^3(K_L \theta_1)] + \lambda_1 \}, \quad \text{при } T < T_{m1}, \quad (5)$$

$$\lambda(T) = (\lambda_2 - \lambda_1) \{ [1 - \exp(-5 \cdot \theta_2^2)] + \lambda_1 \}, \quad \text{при } T \geq T_{m1}, \quad (6)$$

где  $\lambda_0$  – начальное значение теплопроводности стали, Вт/(м·К);  $\lambda_1$  – экстремальное значение теплопроводности стали, Вт/(м·К);  $\lambda_2$  – конечное значение теплопроводности стали, Вт/(м·К);  $T_{m0}$  – начальная температура, К;

$T_{m1}$  – температура экстремального значения теплопроводности, К;  $T_{m2}$  – конечная температура, К;

$$\theta_1 = \frac{T - T_{m0}}{T_{m1} - T_{m0}};$$

$$\theta_2 = \frac{T - T_{m1}}{T_{m2} - T_{m1}}.$$

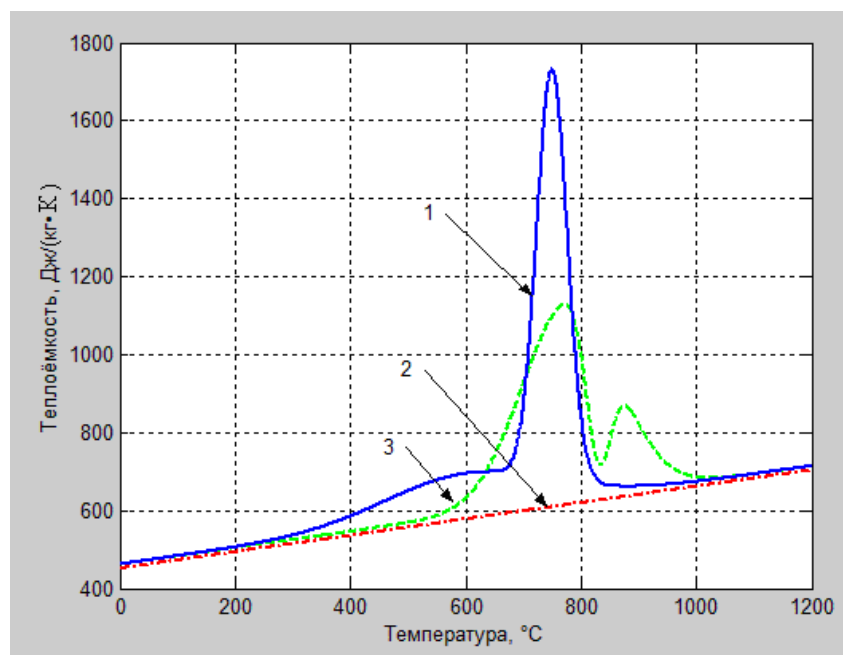


Рисунок 2 – Зависимости теплоемкости от температуры для различных марок стали  
1 – У8; 2 – 1Х18Н9Т; 3 – 2Х13

На рисунке 3 представлены расчеты зависимости теплопроводности сталей У8, 1Х18Н9Т и 2Х13 от температуры. Видна значительная разница в тенденции развития функции теплопроводности при нагреве металла различного химического состава.

Общеизвестно, что при движении металла в методической печи, имеющей зону нижнего нагрева, экранирование нижней поверхности заготовок подовыми устройствами (глиссажными трубами, рейтерами) приводит к образованию на заготовках зон с пониженной температурой – так называемых «темных пятен». Возникающая при этом неоднородность поля температур заготовки приводит к перегрузке валков прокатного стана и возникновению дефектов получаемого проката. На основании многочисленных экспериментов установлено, что для мало и среднеуглеродистых сталей допустимые значения перепада температур по сечению заготовки не должны превышать 50-60 °С.

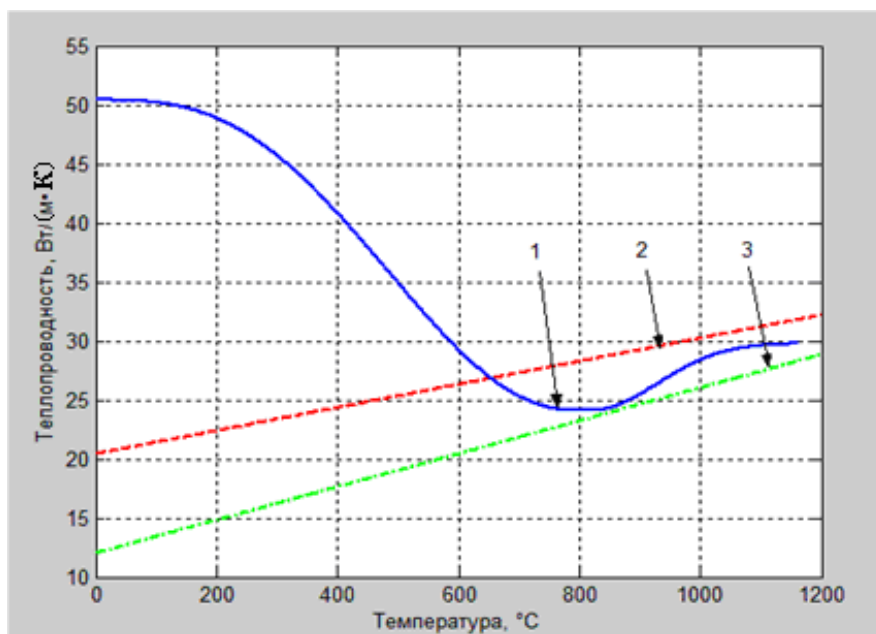


Рисунок 3 – Зависимости теплопроводности от температуры для различных марок стали  
1 – У8; 2 – 1X18H9T; 3 – 2X13

Снижение термической неоднородности заготовок достигается за счет использования разводки (смещения или переноса на параллельные базовым) глissажных труб на участке печи, примыкающем к монолитному поду. На рисунке 4 показан пример схемы разводки глissажных труб.

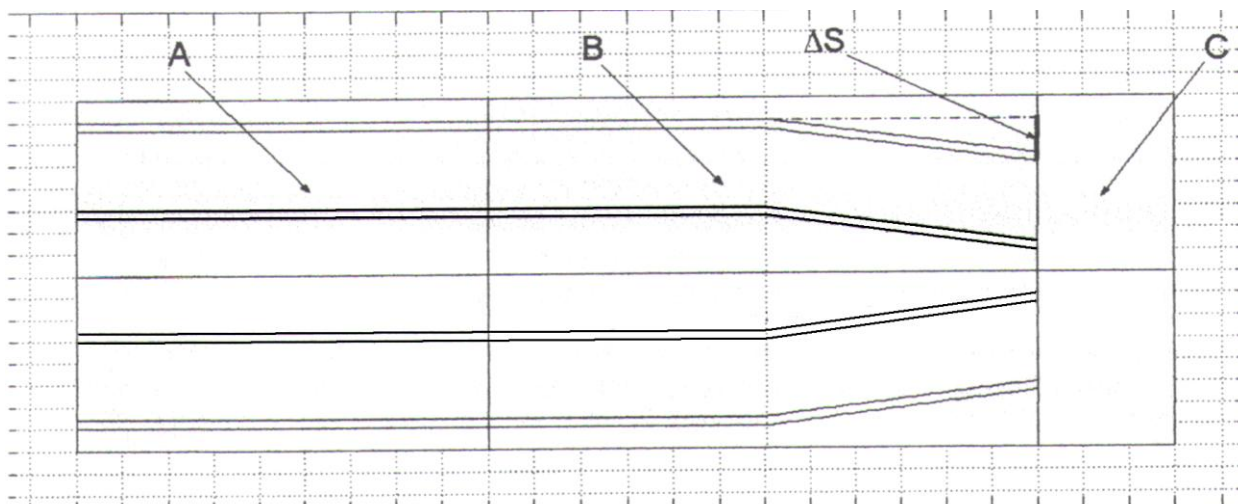


Рисунок 4 – Схема разводки глissажных труб в методической печи  
А – методическая зона; В – сварочная зона; С – томильная зона;  $\Delta S$  – величина смещения глissажных труб (степень разводки)

В данной главе был предложен расчетный метод выбора варианта разводки глissажных труб с применением математической модели нагрева заготовок в методической печи толкательного типа.

Цель расчета состоит в выборе двух основных параметров: участка печи, где необходимо начать процесс разводки  $L_N$  и необходимую степень разводки  $\Delta S$ . Определение данных величин осуществляется методом последовательных приближений при контроле степени термической неоднородности нагрева заготовки.

В результате расчета температурного поля нагреваемого сляба без учета разводки определяется длительность нагрева сляба ( $\tau_k$ ) и распределение температур по его сечению, удостоверяющие двум финальным условиям:

$$T_{\text{пов}} = T_{\text{пов}}^k, \Delta T = \Delta T^k.$$

Зная полную длительность нагрева сляба и длину полезного пода печи ( $L$ ), можно рассчитать момент времени  $\tau_N$ , соответствующий началу разводки труб, по формуле

$$\tau_N = \tau_k \frac{L_N}{L}. \quad (7)$$

Текущее значение степени разводки труб определяется по формуле

$$S(\tau) = K \cdot (\tau - \tau_N), \quad (8)$$

где коэффициент скорости разводки находится из соотношения

$$K = \frac{\Delta S}{\tau_k - \tau_N}. \quad (9)$$

Вводя значение степени разводки труб  $S(\tau)$  в алгоритм решения задачи теплопроводности, можно определить поле температур в нагреваемом слябе с учетом разводки глиссажных труб.

Разводка глиссажных труб позволяет плавно изменять место расположения контакта поверхности сляба с водоохлаждаемыми опорными трубами.

В данной главе также представлена методика возможного уменьшения окалинообразования в случаях переходных режимов работы печи.

При расчетах процессов высокотемпературного окисления стали при нагреве или охлаждении наибольшее распространение получил закон Ю.Р. Эванса, который в дифференциальной форме записывается в виде

$$\frac{dY}{d\tau} = \frac{\chi}{YT(\tau)} \exp\left(-\frac{B}{T(\tau)}\right), \quad (10)$$

где  $Y$  – угар металла, г/см<sup>2</sup>;  $\chi$  и  $B$  – эмпирические константы, характеризующие кинетику окисления, зависящие от состава печной атмосферы, соответственно г<sup>2</sup>/(м<sup>4</sup>·мин·К) и К.

Также применяют уравнение К.Вагнера

$$\frac{dY}{d\tau} = \frac{k_0}{2Y} \exp\left(-\frac{B}{T(\tau)}\right), \quad (11)$$

где  $k_0$  – эмпирическая константа,  $\text{г}^2/(\text{см}^4 \cdot \text{мин})$ .

На основе уравнений (10) и (11) при допущении, что зависимость угара (или толщины окисленного слоя) от времени подчиняется закону квадратного корня, и учете константы скорости окисления, подчиняющейся уравнению Аррениуса, выражение по определению массы образующейся окалины можно представить в виде

$$M = \sqrt{M_0^2 + AB \sum_{i=1}^p \frac{\psi_i}{w_i}}, \quad (12)$$

где  $\psi_i$  и  $w_i$  – безразмерные функции.

Данный метод деления температурной кривой на интервалы с постоянной скоростью нагрева дает большую степень приближения к действительному режиму нагрева, чем известный прием разбивки на интервалы с постоянной температурой.

В конкретных расчетах скорости окисления стали формула (11) преобразуется к виду дифференциального уравнения

$$\frac{dh}{d\tau} = \frac{k_0}{2h} \exp\left[-\frac{B}{T(\tau)}\right], \quad (13)$$

а интеграл дифференциального уравнения (13) приводится к виду

$$h_k^2 = k_0 \int_{\tau_0}^{\tau_k} \left\{ \exp\left[-\frac{B}{T_{\text{на}}(\tau)}\right] \right\} d\tau, \quad (14)$$

где  $h_k$  – конечная величина толщины слоя окалины, мм.

Используя результаты экспериментов по определению температур в заготовках сечением 100x100мм (длиной 2,82м) из стали Ст3кп при их нагреве в печи данного типа до конечной температуры 1235°C на поверхности заготовок, были проведены расчеты с помощью математической модели, описанной выше.

Одним из вариантов расчета является определение угара металла при подстуживании поверхности заготовки при простое печи. Тепловой режим с подстуживанием характеризуется резким снижением температуры греющей среды в момент начала незапланированного простоя до уровня  $T_{\text{сп}}=820^\circ\text{C}$ , при котором температура поверхности заготовки не превышает  $770^\circ\text{C}$ , что обеспечивает существенное снижение интенсивности окалинообразования на этой стадии. Из расчетов следует, что использование подстуживания поверхности заготовки в период незапланированного простоя печи позволяет практически в два раза сократить толщину нарастающего на поверхности заготовки слоя окалины. При этом толщина слоя окалины составляет:

$h_1=0,532$  мм – для базового режима нагрева при отсутствии простоя печи;

$h_2=1,416$  мм – при учете простоя печи в течение 40 минут без подстуживания;

$h_3=0,827$  мм – при нагреве заготовки с учетом простоя, но при подстуживании поверхности заготовки.

В четвертой главе «Исследование тепловой работы промышленной печи для нагрева заготовок рельсовых накладок» приведены результаты расчета процесса нагрева заготовок в печи, а также представлены методика и экспериментальные данные, полученные при исследовании тепловой работы промышленной печи для нагрева рельсовых накладок.

По результатам данных расчетов были составлены режимы нагрева до требуемой температуры при конечном значении перепада по сечению не более  $20$  °С. Один из вариантов расчета представлен на рисунке 5.

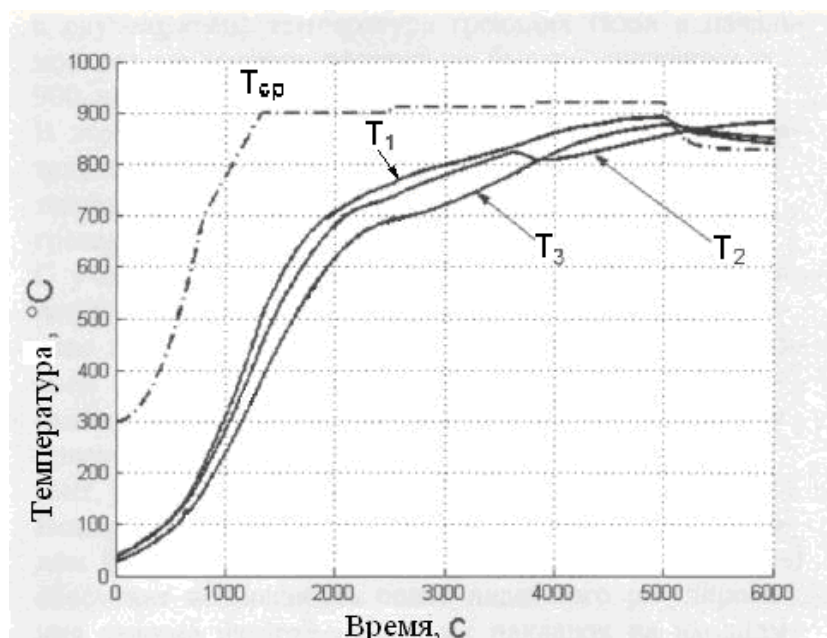


Рисунок 5 – Результаты варианта расчета нагрева заготовки с начальной температурой продуктов сгорания  $300$ °С

$T_1$  и  $T_2$  – температуры на поверхности накладки;  $T_3$  – температура в центре массивного участка верха накладки;  $T_{ср}$  – температура газовой среды в печи

Для определения возможной величины угара были выполнены расчетные исследования для двух рассматриваемых вариантов задания температуры греющих газов, и, как следствие, двух вариантов нагрева заготовок в печи – при температуре продуктов сгорания у входа заготовок в печь  $900$  °С и при температуре продуктов сгорания  $300$  °С с последующим ростом до  $900$  °С, достигающейся на входе во вторую зону управления.

Выполнение расчета с использованием вышеприведенной методики показывает, что при значении толщины слоя окалины на накладке, равной  $h=0,29$  мм будет означать угар металла равный  $0,36\%$  абсолютных или  $3,6$  кг/т.

При экспериментальных исследованиях тепловой работы печи основной технологический параметр процесса – уровень и равномерность нагрева заготовок, определялся прямыми измерениями с помощью зачеканенных в заготовку кабельных термопар. Также проведены опыты по определению угара металла. Методом взвешивания заготовок перед загрузкой в печь и после их нагрева было установлено, что удельный угар металла составил 4,17 кг/т или 0,417‰абс.

При анализе результатов термометрирования заготовок в печи были замечены следующие моменты:

1. Зафиксированы импульсные колебания температуры греющей среды в объеме печи при работе в стационарном режиме. Система управления работой горелок обеспечивает двухпозиционное регулирование температуры греющих газов на уровне 950-1150 °С, при этом период импульсов (времени между включением и отключением подачи газа) изменяется в достаточно узких пределах – от 25 до 42 с.

2. Заданная температура нагрева заготовки (900 °С) достигается за 90-100 минут при перепаде температур между поверхностью и центром утолщенной части не превышающем 10 °С.

С использованием полученных экспериментальных данных выполнены расчеты динамики нагрева заготовок, результаты которого представлены на рисунке 6 в трех наиболее характерных точках рельсовой накладки. На этом же рисунке приведены результаты термометрирования заготовки, полученные при проведении эксперимента.

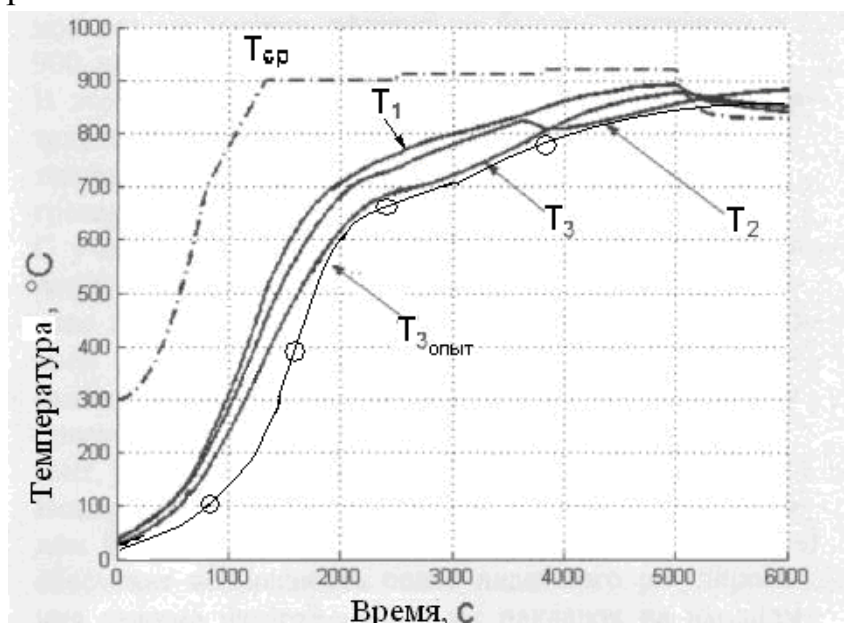


Рисунок 6 – Результаты варианта расчета нагрева заготовки с начальной температурой продуктов сгорания 300°С

$T_1$  и  $T_2$  – температуры на поверхности накладки;  $T_3$  – температура в центре массивного участка верха накладки;  $T_{ср}$  – температура газовой среды в печи;  $T_{3\text{опыт}}$  – опытные данные температуры в центре массивного участка верха накладки

Сравнение температурных кривых свидетельствует о чрезвычайно высоком различии (порядка 200-250 °С) расчетных и опытных значений температуры в центре массивной части верха нагреваемой накладке на всем протяжении нагрева в первой зоне печи. Это свидетельствует о том, что показания термопары в первой зоне, принятые в качестве определяющих при расчете теплообмена, весьма существенно отличаются от реальной средней температуры греющих газов, омывающих нагреваемые накладки. Данное расхождение объясняется еще и тем, что примерно 80% продуктов сгорания удаляется через рекуператоры горелок, а 20% - через окна на торцах загрузки и разгрузки в специальные вытяжные зонты.

Результаты вышеприведенных исследований показывают, что предложенная математическая модель расчета теплообмена в печном объеме, основанная на заданных постоянных во времени и в объеме температурах греющей среды, не адекватно описывает теплообменные процессы в печи с импульсным регулированием температуры и своеобразной газодинамикой продуктов сгорания, обусловленной применением рекуперативных горелочных устройств.

Вместе с тем, известны работы С.Н.Шорина, в которых перенос энергии излучения в газовом пространстве описан на основе скорректированного уравнения теплопроводности, без использования концепции о постоянстве температуры газа в исследуемых объемах (пространствах). Данный подход, по нашему мнению, позволит учесть и эффект импульсного сжигания топлива, при котором температура греющих газов на выходе из горелочных устройств может быть представлена в виде незатухающих колебаний.

Математическая формулировка такой схемы теплообмена в проходной печи базируется на рассмотрении теплового взаимодействия системы трех тел – нагреваемого металла, греющих газов и футеровки свода, пода и стен нагревательной печи. Процессы переноса тепловой энергии в газовой фазе, стенках печи и в нагреваемых заготовках могут быть описаны системой единообразных дифференциальных уравнений параболического типа, различающихся физическими свойствами среды, осуществляющей процесс переноса. Запишем эти уравнения последовательно для газовой фазы, металла рельсовых накладок и материала футеровки свода и стен печи.

Газовая фаза.

$$\rho_2 C_2 \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda_2 \nabla T), \quad (15)$$

где коэффициент теплопроводности газа является функцией локального значения температуры и зависит от поглощающих свойств среды

$$\lambda_2 = \sigma_2 T^3 / A, \quad (16)$$

$$\text{где } \sigma_2 = \frac{16}{3} \sigma_0 = 30.25 \cdot 10^{-8}, \text{ Вт/ (м}^2 \cdot \text{К}^4); A = A_0 \exp[-k_0 (\frac{T}{T_0} - 1)]. \quad (17)$$



Металл рельсовой накладке (с учетом выделения тепла фазового превращения перлита в аустенит в интервале температур  $\Delta T = T_{cp1} - T_{cp2}$ ).

$$\rho_m C_m \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla(\lambda_m \nabla T), \quad (18)$$

где значения теплоемкости и теплопроводности рассчитываются по методике, описанной в третьей главе.

Далее приводятся результаты решения этой задачи при рассмотрении продольного сечения рельсовой накладки с использованием концепции С.Н.Шорина.

В расчетах учитывается изменение во времени греющей среды в виде импульсной функции, ограниченной в интервале температур 900–1000 °С, при различном поведении графика греющей среды в начальной стадии нагрева (для первой зоны печи). С этой целью используется следующее соотношение для графика изменения во времени температуры греющей среды:

$$T_G(\tau) = T_{G0} + [T_P(\tau) - T_{G0}] \cdot \{1 - \exp[-12 \cdot (\frac{\tau}{\tau_k})]\}, \quad (19)$$

где  $T_P(\tau) = T_{\min} + (T_{\max} - T_{\min})^{\sin(2 \cdot \pi \tau / D_\tau)^{0.5}}$ , К;  $T_{G0}$  – начальная температура продуктов сгорания, К;  $D_\tau$  – период одного колебания температуры греющей среды, с;  $T_{\max}$  и  $T_{\min}$  – максимальная и минимальная температуры греющей среды, К.

На рисунке 7 приведены результаты сравнения расчетных данных нагрева металла с использованием уравнений (15) – (18) при задании температуры греющей среды соотношением (19) и начальной температуры  $T_{G0} = 500$  °С с опытными данными.

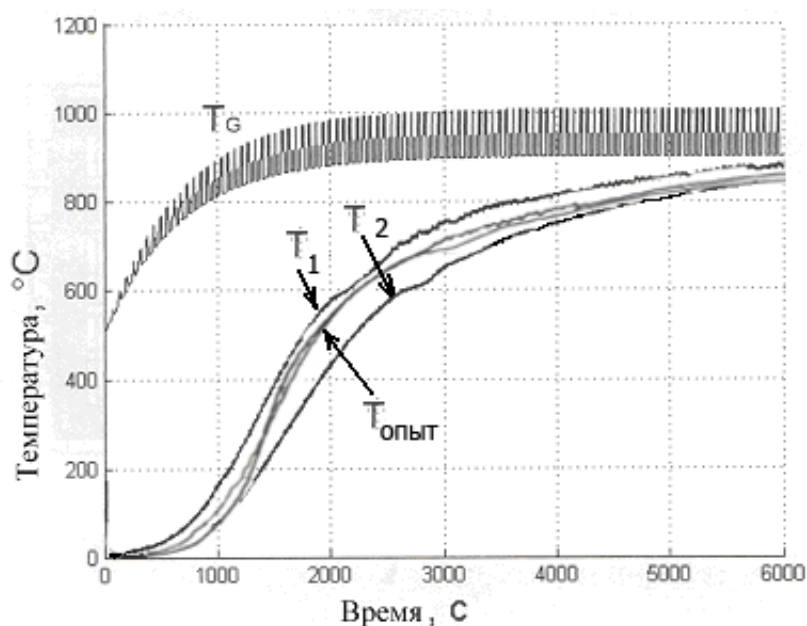


Рисунок 7 – Результаты расчета нагрева заготовки с учетом эффекта импульсного сжигания топлива при начальной температуре продуктов сгорания 500 °С  
 $T_G$  – температура греющих газов;  $T_1$  – температура верхней поверхности заготовки;  
 $T_2$  – температура нижней поверхности заготовки;  $T_{опыт}$  – опытные данные температуры заготовки

Как видно, предложенная математическая модель достаточно адекватно описывает процесс нагрева заготовок в печи с рекуперативными горелками, что и подтверждается незначительным расхождением расчетных и опытных значений температуры.

Таким образом, использование данной концепции, по которой температура греющих газов на выходе из горелочных устройств представлена в виде функции незатухающих колебаний, позволяет устранить серьезную погрешность при расчетах нагрева металла, имевшей место при использовании концепции о постоянстве температуры газа в печах с импульсной системой сжигания топлива.

## ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены и проанализированы особенности тепловой работы проходных нагревательных печей толкательного типа. Отмечено, что основными причинами, влияющими на качество нагрева металла, являются термическая неоднородность и окалинообразование. Установлена определенная роль переходных режимов эксплуатации печей.

2. Разработана математическая модель расчета температурного поля нагреваемой заготовки с учетом процессов окалинообразования и теплоты фазового перехода перлит-аустенит. Показано влияние фазовых процессов на теплопроводность и теплоемкость различных марок стали. Модель адаптирована по результатам экспериментальных исследований на промышленных печах.

3. С помощью модели проведены расчетные исследования влияния разводки (смещения) глассажных труб на величину термической неоднородности нагрева металла. Впервые предложен метод расчета параметров разводки глассажных труб, основанный на расчетах температурного поля внутри нагреваемой заготовки при контакте с охлаждаемой опорой.

4. Выполнены расчетные исследования по угару металла и предложены режимы нагрева, минимизирующие окалинообразование в периоды переходных режимов работы печи.

5. Разработана научно обоснованная концепция современной энергоэффективной печи для нагрева заготовок рельсовых накладок. Составлено техническое задание на выполнение проектно-конструкторской документации.

6. Проведены исследования тепловой работы промышленной печи для нагрева заготовок рельсовых накладок. Получены новые экспериментальные данные по динамике нагрева, термической неоднородности и окалинообразованию. Сравнение экспериментальных и расчетных данных по динамике нагрева показало, что математическая модель, построенная на принципе

постоянства температуры в исследуемом объеме при определении лучистого теплового потока неадекватно описывает процесс нагрева заготовки, особенно в начальных период, в печи с рекуперативными горелками и импульсной системой управления тепловой мощностью

7. Разработана математическая модель расчета теплообмена излучением на основе скорректированного уравнения теплопроводности (концепция С.Н.Шорина), впервые учитывающая циркуляцию продуктов сгорания через рекуперативные горелки и режим импульсного сжигания топлива как режим незатухающих колебаний. Сравнение экспериментальных и рассчитанных по данной модели температурных кривых нагрева заготовок показало практически полную адекватность модели реальным условиям нагрева заготовок с учетом окисления металла.

### **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Основное содержание работы отражено в следующих печатных работах:

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

1. Попов Е.В. Влияние теплофизических свойств стали на нагрев заготовок в печах / Е.В.Попов, Г.М.Дружинин // Известия ВУЗов. Черная металлургия 2012, №1. – С. 14-16 (0,2 п.л./0,1 п.л.).

2. Попов Е.В. Расчетные исследования угара металла в нагревательных печах в случае незапланированных длительных простоев / Г.М.Дружинин, Ю.А.Самойлович, Е.В.Попов // Известия ВУЗов. Черная металлургия, 2013, № 5. – С. 11-14 (0,25 п.л. / 0,08 п.л.).

3. Попов Е.В. Способы снижения термической неоднородности массивных стальных слябов при нагреве в методических нагревательных печах / Г.М.Дружинин, Ю.А.Самойлович, Е.В.Попов // Известия ВУЗов. Черная металлургия, 2013, №7. – С. 27-32 (0,38 п.л./0,13 п.л.).

#### ***В других изданиях:***

4. Попов Е.В. Разработка математической модели нагрева металла для АСУ методической печи с учетом истинных значений теплофизических свойств стали / Г.М.Дружинин, Е.В.Попов // Инновации в материаловедении и металлургии: сборник материалов Международной интерактивной научно-практической конференции, 13-16 декабря 2011 г. Екатеринбург: УрФУ. С. 18-21 (0,25 п.л./0,13 п.л.).

5. Попов Е.В. Адаптация математической модели расчета нагрева металла для АСУ на примере толкательной печи стана 2800 ОАО "Уральская сталь" / Е.В.Попов, Г.М.Дружинин // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник материалов Всероссийской

научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, 29-30 марта 2012 г. Екатеринбург: УрФУ. С. 56-60 (0,31 п.л./0,16 п.л.).

6. Управление тепловым режимом проходной нагревательной печи при длительных незапланированных простоях / Дружинин Г.М., Самойлович Ю.А., Попов Е.В. // Теория и практика тепловых процессов в металлургии: сборник материалов Международной научно-практической конференции. 19-21 сентября 2012 г. Екатеринбург: УрФУ. С. 166-174 (0,56 п.л./0,19 п.л.).

7. Расчетно-экспериментальные исследования особенностей нагрева стальных заготовок в печах непрерывного действия / Дружинин Г.М., Самойлович Ю.А., Попов Е.В. // Новые направления в области теплотехнического строительства. Конструкции, технологии, материалы. Энергосбережение, экология и промышленная безопасность: сборник материалов IV Международного конгресса. 27-28 марта 2013 г. Москва. С. 47-53 (0,44 п.л./0,15 п.л.).

8. Расчетный анализ скорости окисления рельсовых накладок при нагреве под закалку / Дружинин Г.М., Попов Е.В. // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник материалов II Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. 28-29 марта 2013 г. Екатеринбург: УрФУ. С. 46-50 (0,31 п.л./0,16 п.л.).

9. Попов Е.В. Ввод в эксплуатацию линии по производству рельсовых накладок на Нижнесалдинском металлургическом заводе / Липунов Ю.И., Эйсмонт К.Ю., Старцева М.В., Попов Е.В., Дружинин Г.М. // IX Конгресс прокатчиков: сборник материалов. 16-18 апреля 2013 г. Череповец. С. 37-43 (0,44 п.л./0,09 п.л.).

10. Расчетно-экспериментальные исследования особенностей нагрева металла в толкательных печах / Попов Е.В., Дружинин Г.М. // Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло. Сборник докладов международной научно-практической конференции, – Екатеринбург: УрФУ, 2014. С. 320–326 (0,44 п.л./0,22 п.л.).

Подписано в печать \_\_\_\_\_, 2014. Формат 60x84 /16.

Бумага для множ. аппаратов.

Печать плоская. Усл. печ. 1,2 п. л. Уч.-изд. 1,0 л. Тираж 100 экз. Заказ № .

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина».

---