

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Донецкий национальный технический университет»

На правах рукописи

Турулина Юлия Олеговна

УДК 621.783.2(043)

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ПРОХОДНЫХ ПЕЧЕЙ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ**

Специальность 2.4.6 Теоретическая и прикладная теплотехника (технические
науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Донецк – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк.

Научный
руководитель: доктор технических наук, профессор
БИРЮКОВ Алексей Борисович
ФГБОУ ВО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», (г. Донецк), проректор
ДонНТУ, заведующий кафедрой «Техническая
теплофизика»

Официальные
оппоненты:

Ведущая
организация:

Защита состоится «__» _____ 2025 года в ___ часов на заседании диссертационного совета 24.2.491.02 при ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, I учебный корпус, аудитория 1.203.

Тел. факс: +7(856) 301-07-69, e-mail: donntu.info@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ДонНТУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, II учебный корпус и на сайте <http://donntu.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 202__ г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.491.02
доктор технических наук, доцент

В.О. Гутаревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Основной объем выплавляемой в мире стали в дальнейшем обрабатывается на прокатных станах в виде заготовок, доведенных до пластического состояния путем нагрева в проходных нагревательных печах.

На практике стоят задачи достижения необходимого уровня энергоэффективности печи, обеспечения надлежащего качества нагрева и минимизации потерь металла с окалиной, которые могут находиться во взаимном противоречии.

Наиболее эффективной с точки зрения обеспечения проектных значений технологических показателей является поддержание процесса функционирования нагревательной печи в номинальном режиме. Однако реальные условия работы прокатных цехов таковы, что зачастую имеют место как колебания производительности, связанные с несогласованностью режимов работы комплекса «печь – прокатный стан», так и изменения, связанные с непостоянством производственной программы.

Для обеспечения качества нагрева металла и рационального расхода топлива при производительности, не соответствующей номинальной, необходима коррекция температурного профиля печи.

Опыт показывает, что основным направлением совершенствования рассматриваемых технологических процессов является установление рациональных значений таких параметров, как температурный профиль печи и шаг укладки заготовок. При этом важное значение приобретает задача контроля и поддержания установленных показателей.

Несмотря на многолетние исследования в области эксплуатации и модернизации печей, проблема совершенствования технологических параметров процесса в условиях постоянно изменяющейся производительности и контроля режима функционирования печи, с учетом вариации показателей, к настоящему времени не решена.

В этой связи задачи определения рациональных технологических параметров проходных печей в условиях изменяющейся производительности и совершенствования способов контроля процесса являются актуальными, имеющими отраслевое значение.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам определения рациональных (оптимальных) параметров нагрева металла в проходных печах и математического моделирования этих процессов посвящены работы известных исследователей, в их числе Семикин И.Д., Тайц Н.Ю., Губинский В.И., Гусовский В.Л., Бухмиров В.В., Арутюнов В.А., Мاستрюков Б.С. и другие. Несмотря на успешное решение комплекса задач в этой области, остается ряд вопросов, связанных с определением рациональных параметров проходных печей, работающих в условиях переменной производительности, что определяет необходимость дальнейших исследований.

Цель и задачи исследования. Цель работы – обоснование рациональных технологических параметров, обеспечивающих повышение эффективности работы проходных печей в условиях изменяющейся производительности.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие основные задачи:

- выполнить анализ режимов функционирования проходных печей в условиях изменяющейся производительности и технологических факторов, определяющих эффективность процесса;
- сформировать математические модели и провести теоретические исследования процесса с целью обоснования рациональных технологических параметров проходных печей;
- провести вычислительные и натурные экспериментальные исследования с целью верификации теоретических результатов и определения рациональных технологических параметров процесса нагрева металла в проходных печах;
- разработать рекомендации по практическому применению полученных результатов исследований.

Объект исследования – процесс функционирования проходных печей прокатного производства.

Предмет исследования – технологические параметры проходных печей в условиях изменяющейся производительности.

Научная новизна полученных результатов.

1. Получили развитие научные методы определения параметров нагрева металла в печах за счет обоснования возможности идентификации температуры металла по зонам и в конце нагрева для известного температурного профиля печи и ее производительности с использованием тепловой диаграммы И.Д. Семикина.

2. Впервые обосновано, что температура продуктов сгорания, покидающих неотопливаемую зону печи, может быть определена на основании итерационного анализа процесса теплообмена между металлом, поступающим в печь при своей начальной температуре, и продуктами сгорания, входящими в неотопливаемую зону при температуре, поддерживаемой в ближайшей сварочной зоне.

3. Впервые доказана возможность установления квазистационарного теплового состояния металла в привязке к продольной координате печи за счет определения и установления температурного профиля печи для произвольной производительности, при котором в процессе прохождения каждой зоны печи металл получает такое же количество теплоты, как в номинальном режиме работы.

4. В развитии методов определения рациональных технологических параметров печи с шагающими балками при работе в условиях переменной производительности научно обоснованы новые методики установления взаимной связи между производительностью печи, температурным профилем и шагом раскладки заготовок для достижения заданного теплосодержания металла в печи и на выходе из нее. В частности, обоснован метод определения оптимального, с точки зрения минимизации расхода топлива, шага раскладки заготовок для печей с шагающими балками.

Теоретическая значимость работы заключается в дальнейшем развитии методов определения рациональных параметров проходных печей, предназначенных для нагрева металла перед прокаткой, за счет разработки новых научных методик, позволяющих определять температуру металла для известного температурного профиля печи и ее производительности с использованием тепловой диаграммы И.Д. Семикина, а также уточнять температуру продуктов сгорания, покидающих неотопливаемую зону печи, определять параметры температурного профиля печи,

позволяющие обеспечивать квазистационарное тепловое состояние металла в условиях переменной производительности, и обоснованно выбирать рациональные сочетания технологических параметров для печей с механизированным подом.

Практическая ценность результатов.

1. Сформирована конечно-разностная математическая модель процесса нагрева металла в проходной методической толкательной печи, работающей в условиях переменной производительности, позволяющая выполнять вычисления для различного сортамента металла и произвольных параметров нагрева.

2. Разработана методика, основанная на применении пакета расчетных зависимостей, которая для проходных печей различного типа (толкательных и с механизированным подом) позволяет при заданных значениях производительности и характеристиках температурного профиля печи определять изменение температурного состояния металла для всех зон нагрева, начиная от момента загрузки до выдачи металла.

3. Предложена методика, позволяющая выбрать требуемый температурный профиль печи для произвольной производительности, установление которого позволит обеспечить заданные значения параметров температурного поля металла при его нагреве и при выдаче из печи, соответствующие работе в условиях номинальной производительности печи.

4. Предложен набор методик, позволяющих для печей с механизированным подом устанавливать связь между такими параметрами нагрева, как производительность печи, ее температурный профиль и шаг раскладки заготовок.

5. Разработан метод идентификации среднemasсовой температуры сортовых заготовок на выдаче из печи на основании анализа текущих энергосиловых параметров первой клетки прокатного стана.

6. Получены уравнения регрессии, устанавливающие зависимость значений температур зон печи с шагающими балками стана 390 Макеевского металлургического завода от производительности печи для новых планируемых к освоению типоразмеров заготовок 100x100, 120x120 и 125x125 мм. Данная разработка принята к внедрению на Филиале №3 ООО «ЮГМК» «Макеевский металлургический завод» (акт о внедрении утвержден управляющим филиалом №3 «ММЗ» ООО «ЮГМК ДОНЕЦК»).

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры технической теплофизики ФГБОУ ВО «ДонНТУ» (справка № 29 – 4/16 от 27.09.24 об использовании в учебном процессе методик расчета нагрева металла в проходных печах при проведении практических занятий по дисциплине «Тепломассообмен» для студентов бакалавров кафедры «Техническая теплофизика» по направлению 22.03.02 – Промышленная теплотехника).

Методология и методы исследования. В процессе выполнения работы использована методология системного подхода при рациональном сочетании теоретических и экспериментальных методов исследования. В качестве основы для создания новых научных методов расчета использован метод тепловой диаграммы И.Д. Семикина. Для проверки адекватности разработок привлечен ряд методов, связанных с прямым измерением температуры металла, выдаваемого из печи, моделированием температурного состояния металла при помощи конечно-

разностной модели, косвенным определением температуры металла на основе анализа энергосиловых параметров черновой клетки прокатного стана.

Составление уравнений регрессии для автоматического определения требуемых параметров температурного профиля печи Макеевского металлургического завода при освоении процесса нагрева заготовок новых типоразмеров проведено на основании обработки классическими методами математической статистики результатов расчетов, полученных при помощи разработанных методик.

Связь работы 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 тепло-массообменных процессов и режимов работы оборудования для тепловой обработки материалов» № Н-2022-13, при выполнении которой автор принимал участие в качестве исполнителя.

Положения, выносимые на защиту.

1. Показано, что введение нового понятия квазистационарного теплового состояния металла в привязке к продольной координате печи и доказательство возможности его установления при работе печи в условиях переменной производительности за счет определения и установления температурного профиля печи, позволяет обеспечить при прохождении каждой зоны печи получение металлом такого же количества теплоты, как в номинальном режиме работы. Расхождения не превышают 1%.

2. Доказана необходимость установления взаимной связи между такими технологическими параметрами печи с механизированным подом как производительность, температурный профиль и шаг раскладки заготовок для достижения заданного теплосодержания металла в печи и на выходе из нее при работе в условиях переменной производительности. В частности решена задача определения оптимального, с точки зрения минимизации расхода топлива, шага раскладки заготовок для печей с шагающими балками. Для рассмотренной конструкции печи стана 390 Макеевского металлургического завода величина оптимального шага раскладки составила 0,26 поперечного размера сортовой заготовки.

Степень достоверности и апробация результатов диссертации. Корректность поставленных задач, достаточный объем аналитических исследований, согласованность результатов теоретических и экспериментальных исследований подтверждают достоверность научных положений, выводов и рекомендаций. Адекватность модели в конкретных условиях подтверждена путем сопоставления результатов с экспериментальными данными. Расхождения не превышают 1%.

Личный вклад соискателя. Определена цель и поставлены задачи исследования, произведен обзор публикаций по современному подходу к нагреву металла в проходных нагревательных печах, работающих в условиях переменной производительности; подготовлены основные публикации по теме диссертационной работы; выполнено математическое моделирование процесса нагрева металла;

разработаны методики для определения рациональных технологических параметров проходных печей в условиях изменяющейся производительности.

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.

Публикации. Основные результаты диссертационных исследований изложены в 15 печатных работах, из них, 9 – в рецензируемых научных изданиях: 3 работ опубликовано в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утвержденных ВАК РФ (2 соответствуют категории К2); 6 – в изданиях, входящих в перечень специализированных научных журналов, утвержденных ВАК ДНР; 6 – в материалах конференций. Публикации в достаточной мере отражают содержание работы.

Соответствие темы и содержания диссертации паспорту научной специальности.

Тема и содержание диссертации «Определение рациональных технологических параметров проходных печей в условиях изменяющейся производительности» на соискание ученой степени кандидата технических наук соответствует паспорту научной специальности 2.4.6 – Теоретическая и прикладная теплотехника (технические науки), в частности: п. 9 «Системы обеспечения теплового режима теплоэнергетических, промышленных и коммунальных объектов, теплопотребляющего и тепловыделяющего оборудования, методы их совершенствования. Математическое моделирование и оптимизация энерготехнологических систем промышленных предприятий и систем теплоснабжения зданий, районов и городов» и п. 10 «Теоретические аспекты и методы интенсивного энергосбережения в тепловых технологических системах и процессах. Теоретические основы создания малоотходных и безотходных тепловых технологических установок, способствующих защите окружающей среды».

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа содержит 146 страниц машинописного текста и состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы из 115 источников на 14 страницах, 4 приложений, иллюстрируется 33 рисунками и содержит 15 таблиц.

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, посвященных поиску рациональных параметров процесса нагрева металла в проходных печах. Рассмотрены возможные причины изменения производительности проходных металлургических печей. Обоснована важность оптимизации нагрева металла в проходных печах, направленной на сокращение расхода топлива и угара металла, и улучшения качества продукции.

Выявлено, что для обеспечения качества нагрева металла и рационального расхода топлива при производительности, не соответствующей номинальной, необходима коррекция температурного профиля печи, а в случае работы печи с механизированным подом еще и определение рационального шага укладки заготовок.

Рассмотрены известные подходы контроля температурного состояния металла в нагревательных печах, в частности метод термометрирования, применяемый для изучения температурного состояния опытной заготовки.

Обоснована важность разработки косвенного метода идентификации среднемаховой температуры сортовых заготовок на выходе из печи на основании анализа текущих энергосиловых параметров первой клетки прокатного стана.

Рассмотрены известные способы расчетного определения технологических параметров печей при работе в произвольных условиях. Выявлена необходимость разработки простой и удобной методики определения температуры металла при его нагреве, особенно при работе печи в условиях переменной производительности.

Обосновано, что при переменном температурном режиме зависимость температуры отходящих газов весьма неоднозначна и принципиально различна при переходном и установившемся режимах, что требует разработки соответствующей методики определения температуры отходящих газов.

Выявлена необходимость разработки уравнений регрессии, устанавливающих зависимость значений температур зон печи от производительности для различного сортамента металла, что позволяет значительно усовершенствовать имеющиеся АСУ ТП при работе печей в режиме реального времени на металлургических предприятиях.

Установлено, что на практике проходные печи часто работают в изменяющихся условиях (переменная производительность, различные марки стали и типоразмеры заготовок, а также температура посадки заготовки в печь). Поэтому очень важной задачей является разработка способа определения рациональных технологических параметров проходных печей, работающих в условиях переменной производительности.

Анализ состояния вопросов, посвященных исследованию способов определения рациональных технологических параметров проходных печей, работающих в условиях изменяющейся производительности, проведен на основании отечественных и зарубежных источников и позволил сформулировать цель и задачи исследований диссертационной работы.

Во втором разделе оработаны методологические основы проведения научных исследований, направленных на решение поставленных в диссертации задач.

Разработана методика определения температуры металла при заданной температуре зон печи и времени нагрева, соответствующих определенной производительности.

Процесс определения температуры поверхности металла является итерационным. Предварительно задается температура поверхности заготовки в конце рассматриваемой зоны печи. Для нее определяется плотность теплового потока, падающего на поверхность металла в конце зоны; средняя плотность теплового потока, поступающего на поверхность металла в пределах зоны; вычисляется

среднемассовая энтальпия и, соответственно, среднемассовая температура заготовки в конце зоны.

Температура поверхности заготовки (t_n) уточняется из выражения:

$$t_n = \bar{t} + \frac{q \cdot r_0}{K_2 \cdot \lambda} \cdot \frac{K_3 - 1}{K_3},$$

где \bar{t} – среднемассовая температура заготовки в конце соответствующей зоны, °С; r_0 – толщина прогреваемого слоя, м; q – плотность теплового потока в конце соответствующей зоны, Вт/м²; λ – коэффициент теплопроводности материала заготовки при \bar{t} , Вт/(м·К); K_2, K_3 – коэффициенты усреднения плотности теплового потока и температуры, определяемые в зависимости от величины критерия Био (Bi).

Для устранения неоднозначности задания граничных условий предлагается расчетная методика определения температуры уходящих газов непосредственно на стадии расчета нагрева металла в методической зоне путем решения прямых и обратных задач вычисления характерных температур заготовки в конце методической зоны в сочетании с методом последовательных приближений.

Температура уходящих газов (t'_{yx}) уточняется исходя из теплового баланса:

$$t'_{yx} = t_{св} - \frac{P \cdot \Delta i}{C_d \cdot V_d \cdot B_T},$$

где $t_{св}$ – температура печи в сварочной зоне, °С; P – производительность печи, кг/с; Δi – изменение энтальпии в методической зоне, кДж/кг; C_d, V_d – теплоемкость и удельный выход дымовых газов, соответственно, кДж/(м³·К), м³/ м³; B_T – расход топлива, м³/с.

Для подтверждения адекватности инженерной методики расчета нагрева металла применительно к методическим толкательным печам создана конечно-разностная математическая модель. Модель представлена дифференциальным уравнением нестационарной теплопроводности в одномерной постановке:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2},$$

где t – температура, °С; τ, x – время и координата, с и м, соответственно; a – коэффициент температуропроводности металла, м²/с.

Заданы условия однозначности для заготовок, включающие в себя геометрические, начальные и граничные условия, а также зависимость теплофизических характеристик материала от температуры.

Решение дифференциального уравнения выполнено с использованием явной конечно-разностной схемы.

Также представлено аналитическое решение задачи по методу Фурье. Поток металла в толкательной методической печи с минимальной погрешностью рассмотрен как безграничная пластина.

Вводится понятие безразмерной температуры (θ):

$$\theta = \frac{t - t_c}{t_0 - t_c},$$

где t – температура в центре и на поверхности безграничной пластины, °С; t_c – температура среды, в которую помещается пластина, °С; t_0 – начальная температура пластины, °С.

При критерии Фурье $(Fo) \geq 0,3$ ряд становится быстросходящимся и распределение температуры можно с достаточной точностью описать:

для оси пластины

$$\theta_{x=0} = N(Bi) \cdot \exp(-\mu_1^2 \cdot Fo),$$

а для поверхности

$$\theta_{x=1} = P(Bi) \cdot \exp(-\mu_1^2 \cdot Fo),$$

где N, μ_1, P – безразмерные коэффициенты для расчета нагрева пластины.

Для дополнительного подтверждения адекватности предложенной методики разработан метод косвенного определения среднemasсовой температуры заготовок, выдаваемых из печи на основе анализа энергосиловых параметров черновой клетки прокатного стана.

Метод сводится к следующему.

Мощность двигателя определяется величиной тока двигателя. Далее вычисляются значения крутящего момента, момента и усилия прокатки, среднего давления по длине прокатки.

По величине среднего давления находится коэффициент пластичности, а далее предел текучести до и после прокатки.

Значение температуры нагрева металла определяется в зависимости от полученного предела текучести.

Выявлено, что в случае работы печи в режиме с пониженной производительностью значение оптимальной температуры печи в сварочной зоне является неопределенным. В связи с этим разработана методика определения температурного профиля печи, работающей в условиях пониженной производительности, позволяющая гарантировано получить заданное теплосодержание металла в конце нагрева.

Данная методика является обратной и сводится к следующему: по прямому методу (описанному ранее) определяются параметры номинального режима; затем обратным методом определяются параметры режимов с пониженной производительностью. Расчет считается завершенным при совпадении в пределах допустимой погрешности энтальпий металла на выходе из печи, полученных с помощью поверочного расчета по прямому методу и при работе печи с номинальной производительностью.

Температура печи по зонам определяется из формулы:

$$t'_{\text{печ}} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{q'}{C'_{\text{ГКМ}}} + \left(\frac{t_{\text{п}} + 273}{100}\right)^4} - 273,$$

где q' – плотность теплового потока в соответствующей зоне печи, Вт/м²; $C'_{\text{ГКМ}}$ – приведенный коэффициент излучения по зонам печи, Вт/(м²·К⁴).

При работе печи с механизированным подом появляется дополнительная возможность расширения диапазона регулирования технологических параметров за счет изменения шага укладки заготовок.

Проведено исследование взаимного влияния таких параметров как производительность печи, температурный профиль и шаг раскладки заготовок при решении задачи достижения заданного теплосодержания металла в процессе нагрева при работе печи в условиях изменяющейся производительности. При этом разработаны следующие методики.

1. Методика, позволяющая для заданной производительности и шага раскладки заготовок определить температурный профиль печи, гарантирующий получение заданного теплосодержания. Особенностью данной методики, по сравнению с рассмотренной выше, является использование коэффициента несимметричности нагрева.

2. Метод, позволяющий для заданной производительности определить оптимальный с точки зрения расхода топлива шаг раскладки заготовок при гарантированном обеспечении заданного теплосодержания металла как в целом, так и в конце каждой из зон печи.

Сущность предложенного метода заключается в том что, для заданной производительности рассматривается задача обеспечения определенного для опорного режима теплосодержания металла при работе с разными шагами укладки заготовок. Весь возможный диапазон изменения шага укладки заменяется рядом дискретных значений (с шагом 10 мм). Для каждого шага укладки определяется температурный профиль печи и удельный расход теплоты. После идентификации диапазона шагов укладки, на котором находится искомый экстремум, этот диапазон разбивается на ряд участков, с шагом 1 мм и, таким образом, с практической точностью определяется величина оптимального шага укладки заготовок.

3. Методика, позволяющая для установленных производительности и температурного профиля печи определить шаг раскладки, позволяющий получить заданное теплосодержание металла в результате нагрева.

В основе лежит определение и итерационное уточнение шага раскладки заготовок, которое позволит обеспечить заданное теплосодержание металла при неизменном температурном профиле печи:

$$a = \frac{3600 \cdot d^2 \cdot l_3 \cdot \rho \cdot v}{P \cdot 10^3} - d,$$

где d – толщина заготовки, м; l_3 – длина заготовки, м; ρ – плотность материала, кг/м³; v – скорость движения заготовок в печи при изменении шага укладки, м/с; P – производительность печи, т/ч.

Для обработки результатов исследования используются статистические методы регрессионного анализа и наименьших квадратов.

В третьем разделе представлены результаты исследования процессов нагрева металла в проходных печах.

Подтверждение адекватности предложенной методики определения температуры металла, проведено для условий методической комбинированной нагревательной печи с шагающими балками стана 390 Макеевского металлургического завода. Измерения температуры поверхности металла на выходе

из печи проводились 10 раз с помощью компактного инфракрасного термометра testo 835 для бесконтактного измерения температуры поверхностей (при степени черноты металла 0,8). С доверительной вероятностью 0,95 температура поверхности металла составила $1140 \pm 9^\circ\text{C}$. Расчетное значение температуры поверхности составляет 1145°C .

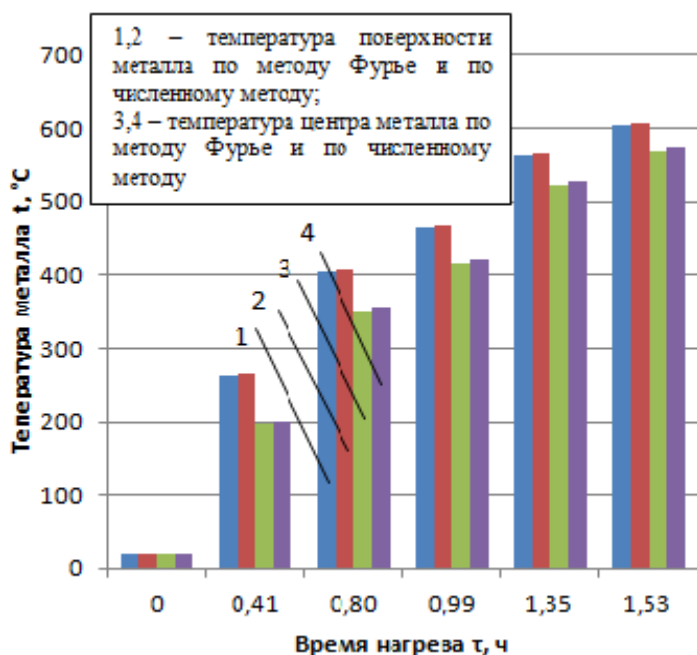


Рисунок 1 – Сравнение результатов температур центра и поверхности, полученных по методу Фурье и с помощью численного метода

Проведено сопоставление результатов, полученных при реализации конечно-разностной явной схемы и с помощью метода Фурье. Эксперимент проводился при одинаковых условиях для нагрева бесконечной пластины (рисунок 1).

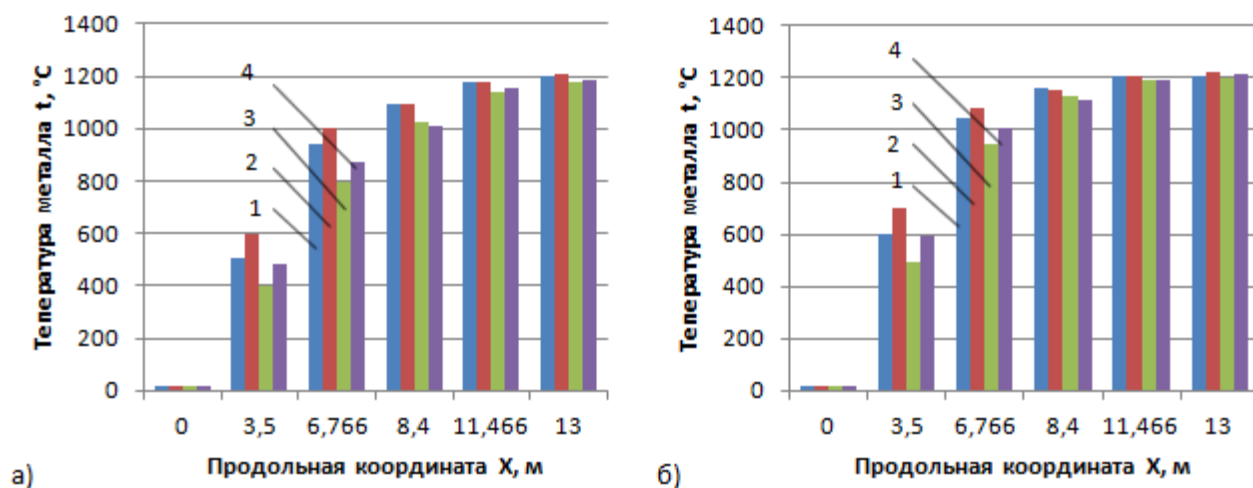
Расхождение значений температур не превышает 1,5%, что свидетельствует о правомерности использования разработанной математической модели для подтверждения адекватности предложенных ранее методик расчета на примере толкательных методических печей.

Для дополнительного подтверждения адекватности разработанной методики расчета

температуры металла проведено сравнение результатов, полученных с ее помощью и численного метода с применением явной конечно-разностной схемы. Для рассматриваемых случаев (при производительностях 120 т/ч и 90 т/ч) установлено, что во время инерционного периода наблюдается некоторое расхождение результатов (не более 15%). Далее по мере прогрева металла и до самой его выдачи из печи отличие результатов не превышает 1% (рисунок 2).

Приведены результаты идентификации значений среднемассовой температуры сортовых заготовок, полученных при нагреве в печи с шагающими балками на основании анализа текущих энергосиловых параметров первой клетки прокатного стана 390 Макеевского металлургического завода. Выявлено, что для условий проведения эксперимента использовалось 40% мощности двигателя постоянного тока. Для заготовки сечением 150x150 мм из марки Ст5 идентифицированное значение среднемассовой температур составляет 1100°C .

Расхождение между определенным экспериментально значением среднемассовой температуры металла и расчетным значением температуры, полученным при помощи верифицированной инженерной методики, не превышает 2%.



1,2 – температура поверхности металла по предложенному и численному методу, соответственно; 3,4 – температура центра металла по предложенному и численному методу, соответственно

Рисунок 2 – Температура поверхности и центра заготовки по длине печи для производительностей а) 120 т/ч и б) 90 т/ч

Решен вопрос неопределенности задания граничных условий, связанной с неоднозначностью температуры уходящих газов. Уточнение температуры уходящих газов происходит непосредственно на стадии расчета нагрева металла в методической зоне, что открывает возможность использования данного метода для АСУ ТП.

Приведены результаты исследования рационального температурного профиля печи при переменной производительности, полученные при помощи обратного метода. Выявлено, что для режимов, близких к номинальному, энтальпии металла по длине печи практически совпадают, а для производительности, значительно ниже номинальной, расчеты по обратному методу можно расценивать как первое приближение, требующее последующего уточнения. Применимость обратного метода ограничена по производительности печи, при которой температура газов в сварочной зоне равна температуре в томильной зоне.

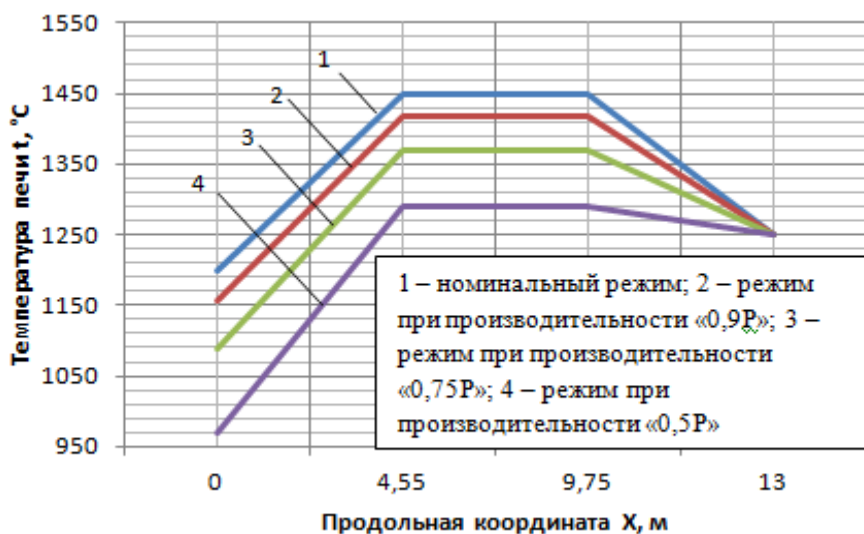


Рисунок 3 – Температура по длине печи при различной производительности

Для рассмотренной толкательной методической печи получена зависимость температуры по длине печи от производительности и представлена на рисунке 3.

Из приведенных результатов следует, что расхождение значений температуры отходящих газов, определенные по

Из приведенных результатов следует, что расхождение значений температуры отходящих газов, определенные по

обратному методу и в результате поверочного расчета, а также энтальпии металла на выходе из печи для номинального режима и по поверочному расчету возрастают при понижении производительности печи.

Для режима «0,9P» указанные расхождения не превышают 2 %, а для режима «0,5P» — около 14 %. Расхождение значений температуры газов в сварочной зоне, определенные по обратному методу и при уточняющем расчете, для режима «0,9P» составляет 0,4 %, а для режима «0,5P» — 2,7 %.

Равенство энтальпии металла на выходе из печи в номинальном и уточненном режимах достигается без одновременного уравнивания энтальпий металла по зонам. При этом с понижением производительности возрастает вклад в конечную энтальпию металла методической и сварочной зон и снижается вклад томильной зоны. Режим «0,5P» для рассматриваемого случая близок к предельному, поскольку температура сварочной зоны в уточненном режиме практически равна температуре в конце томильной зоны.

Введено понятие квазистационарного температурного состояния металла – в привязке к продольной координате печи среднemasовая температура заготовки остается неизменной $T_{cm}(x) = const$ (рисунок 4).

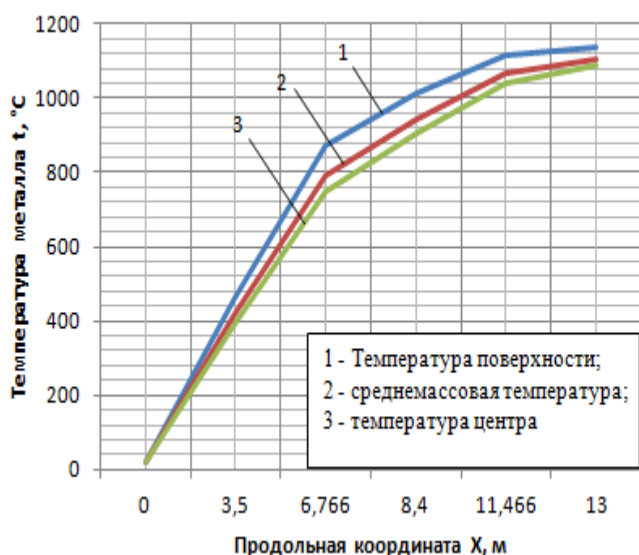


Рисунок 4 – Квазистационарное температурное поле металла

Результаты исследований нагрева металла в печи с шагающими балками доказали дополнительную возможность расширения диапазона регулирования технологических параметров за счет изменения шага укладки заготовок.

Определение температурного профиля проходной печи с механизированным подом путем изменения шага раскладки заготовок показало, что заданная величина энтальпии металла после печи обеспечивается с высокой точностью (отклонения менее 1 %) для всех рассматриваемых вариантов. При увеличении шага раскладки при постоянной производительности печи температура газов в сварочной зоне

возрастает практически на 100 °C.

Температурный профиль печи при переменном шаге раскладки заготовок представлен на рисунке 5.

Для печей, работающих в условиях переменной производительности, определен оптимальный с точки зрения расхода топлива шаг укладки заготовок.

Результаты расчетов для производительностей $P=110$ т/ч и $P=80$ т/ч показали, что оптимальный шаг укладки заготовок составляет $a=38$ мм.

Выявлено, что переход на оптимальный шаг раскладки заготовок по сравнению с опорным режимом позволяет уменьшить расход теплоты (и соответственно топлива) на 5% при производительности $P=110$ т/ч и на 15% – при производительности $P=80$ т/ч.

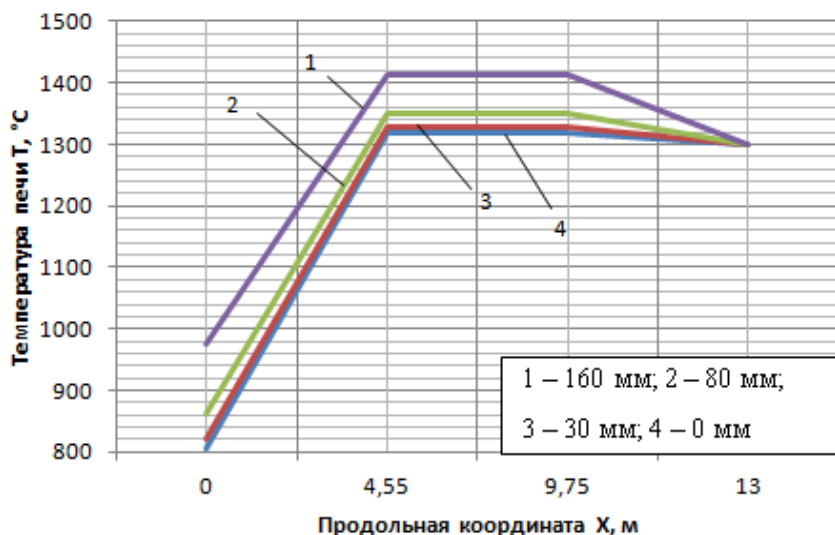


Рисунок 5 – Температурный профиль печи при переменном шаге раскладки заготовок

Также обосновано, что при изменении производительности печи с механизированным подом для сохранения температурного профиля печи заданное температурное состояние металла может быть достигнуто за счет изменения шага укладки заготовок.

Для исследованных в диссертации параметров печи установлена зависимость шага укладки заготовок от

производительности печи и представлена на рисунке 6.

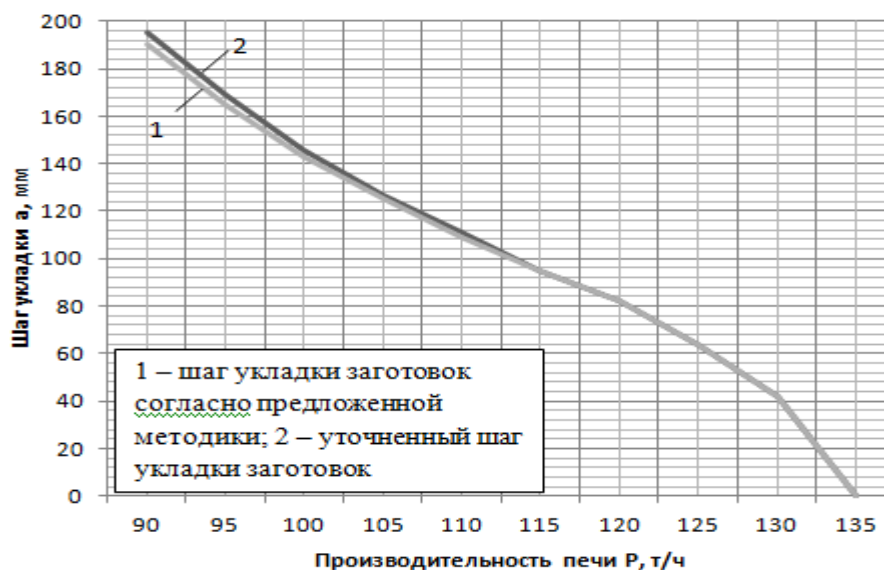


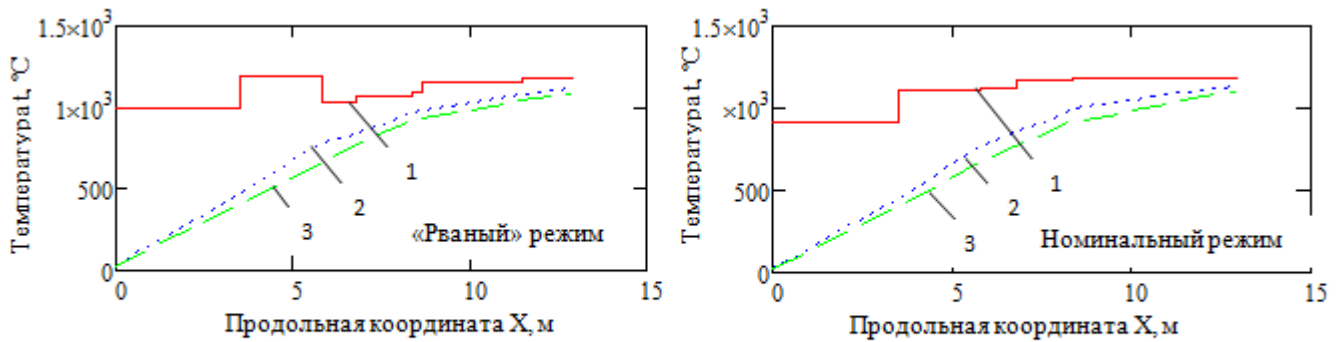
Рисунок 6 – Зависимость шага укладки заготовок от производительности

Для обоснования эффективности предложенной методики определения рационального температурного профиля печи для произвольной производительности проведено исследование «рваного» режима. Для одинаковых исходных данных проведен расчет нагрева металла в номинальных условиях (производительность 120 т/ч) и в «рваном» режиме (производительность трижды менялась: 120 т/ч, 60 т/ч и 90 т/ч).

Рациональные значения температур зон печи и температурное состояние металла представлены на рисунке 7.

Сопоставление температур металла доказывает практическую возможность установления квазистационарного температурного состояния металла при

установлении рационального температурного профиля печи, определенного при помощи разработанной методики, даже в условиях «рваного» режима работы.



1 – температура печи; 2 – температура поверхности металла; 3 – температура центра металла

Рисунок 7 – Температурная диаграмма процесса нагрева металла по длине печи для «рваного» и номинального режимов

В четвертом разделе рассмотрены программные алгоритмы для АСУ ТП нагрева металла в проходных нагревательных печах.

С применением метода наименьших квадратов получены полиномиальные уравнения регрессии второго порядка для определения температуры по зонам печи с шагающими балками Макеевского металлургического завода в зависимости от производительности для типов заготовок 100x100, 120x120 и 125x125 мм (таблица 1).

Таблица 1 – Регрессионные уравнения зависимости температуры зон печи от производительности и коэффициенты детерминации для различных типов заготовок

Зона печи	Тип заготовки	Регрессионное уравнение	Коэффициент детерминации R^2
Подогревательная	100=100 мм	$t = -0,0167P^2 + 6,5135P + 501,52$	0,9997
	120=120 мм	$t = -0,0164P^2 + 6,3682P + 491,52$	0,9998
	125=125 мм	$t = -0,0161P^2 + 6,31P + 490$	0,9997
1-я сварочная	100=100 мм	$t = -0,0125P^2 + 5,7481P + 722,63$	0,9999
	120=120 мм	$t = -0,012P^2 + 5,5652P + 716,82$	0,9999
	125=125 мм	$t = -0,0122P^2 + 5,5631P + 714,33$	0,9999
2-я сварочная	100=100 мм	$t = -0,0066P^2 + 3,926P + 886,93$	1
	120=120 мм	$t = -0,0063P^2 + 3,8076P + 883,34$	0,9999
	125=125 мм	$t = -0,0063P^2 + 3,7909P + 882,38$	1
1-я томильная	100=100 мм	$t = -0,0024P^2 + 2,2212P + 1003,2$	0,9998
	120=120 мм	$t = -0,0023P^2 + 2,154P + 1000,9$	1
	125=125 мм	$t = -0,0024P^2 + 2,1476P + 1000,3$	1
2-я томильная	100=100 мм	$t = -0,0019P^2 + 1,3978P + 1074,9$	0,9995
	120=120 мм	$t = -0,0011P^2 + 1,2666P + 1076,5$	0,9991
	125=125 мм	$t = -0,0007P^2 + 1,1944P + 1079,1$	0,9992

Значения коэффициентов детерминации близки либо равны 1, что свидетельствует о высоком качестве и значимости построенных уравнений.

Установлено, что результаты расчетов нагрева металла могут послужить исходными данными при разработке простого и общедоступного программного алгоритма для АСУ ТП.

Рассчитан возможный экономический эффект от снижения брака металла при нагреве средне и высокоуглеродистых марок стали, склонных к трещинообразованию, за счет установления рационального температурного профиля печи при переменной производительности, который составляет 7,585 млн. руб./год для одной печи с номинальной производительностью 120 т/ч.

Заключение

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой решена актуальная научно-техническая задача, имеющая важное значение для прокатного производства, заключающаяся в обосновании рациональных технологических параметров, обеспечивающих повышение эффективности работы проходных печей в условиях изменяющейся производительности.

Основные научные результаты работы можно сформулировать следующим образом.

1. Выполнен анализ информации о рациональных технологических параметрах проходных печей, работающих в условиях изменяющейся производительности, а именно рационального значения температур зон печи (а для печей с механизированным подом и шага раскладки заготовок), при установлении которых для заданной производительности печи достигается температурное состояние заготовки, соответствующее номинальному режиму. Определены основные проблемы, связанные с определением данных параметров, что позволило сформулировать цель и задачи исследования.

2. Разработана математическая модель для исследования процесса нагрева металла в проходных методических печах. Математическая модель базируется на решении дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности с учетом зависимости теплофизических характеристик металла от температуры. Адекватность математической модели подтверждена путем сопоставления результатов решения специальной тестовой задачи, полученных с ее помощью, с точным аналитическим решением задачи. Расхождение результатов не превышает 2%.

3. Научно обосновано, что температура металла по зонам проходной нагревательной печи и в конце нагрева может быть определена для известного температурного профиля печи и ее производительности с использованием тепловой диаграммы И.Д. Семикина. В результате разработана соответствующая инженерная расчетная методика, адекватность которой в конкретных условиях подтверждена путем сопоставления результатов с экспериментальными данными (с доверительной вероятностью 0,95 температура поверхности металла составила $1140 \pm 9^\circ\text{C}$) и соответствующими результатами математического моделирования. Расхождение менее 1%.

4. Разработана научная методика установления температуры продуктов сгорания, покидающих неотопливаемую зону печи. Уточнение температуры

уходящих газов происходит непосредственно на стадии расчета нагрева металла в методической (неотапливаемой) зоне путем решения прямых и обратных задач вычисления температуры поверхности и среднemasсовой температуры заготовки в конце методической (неотапливаемой) зоны в сочетании с методом последовательных приближений.

5. Разработана методика для определения рационального температурного профиля печи, работающей в условиях переменной производительности. Введено понятие квазистационарного теплового состояния металла в привязке к продольной координате печи и доказано, что в условиях переменной производительности печи такое состояние может быть достигнуто за счет определения и установления такого температурного профиля печи, при котором при прохождении каждой зоны печи металл получит количество теплоты такое же, как в номинальном режиме работы. Во время инерционного периода наблюдается некое расхождение результатов (не более 15%). Далее по мере прогрева металла и до самой его выдачи из печи отличие результатов не превышает 1%. Проведено исследование «рваного» режима, что позволяет для любого сортамента металла при переменной производительности печи найти рациональные параметры нагрева и получить заданное температурное состояние металла.

6. Исследовано взаимное влияние таких параметров как производительность печи, температурный профиль и шаг раскладки заготовок при решении задачи достижения заданного теплосодержания металла в процессе нагрева при работе печи с механизированным подом в условиях изменяющейся производительности. При этом разработаны методики, позволяющие:

- для заданной производительности печи и шага раскладки заготовок определить температурный профиль печи, гарантирующий получение заданного теплосодержания;

- для заданной производительности определить, оптимальный с точки зрения расхода топлива, шаг раскладки. Для рассмотренной конструкции печи стана 390 Макеевского металлургического завода величина оптимального шага раскладки составила 0,26 поперечного размера сортовой заготовки;

- для заданной производительности и температурного профиля печи определить шаг раскладки, позволяющий получить заданное теплосодержание металла в результате нагрева.

7. Разработан метод идентификации среднemasсовой температуры сортовых заготовок на выдаче из печи на основании анализа текущих энергосиловых параметров первой клетки прокатного стана. Адекватность метода подтверждена путем сопоставления результатов косвенной идентификации значения среднemasсовой температуры металла с расчетным значением, полученным для скоростного и температурного режимов печи, соответствующих моменту эксплуатации производственной линии, для которой были сняты значения тока главного двигателя (с доверительной вероятностью 0,95 и класса точности амперметра 1,5). Расхождения не превышает 2%.

8. Получены полиномиальные уравнения регрессии второго порядка, устанавливающие зависимость значений температур зон печи с шагающими балками стана 390 Макеевского металлургического завода от производительности печи для

новых планируемых к освоению типоразмеров заготовок: 100x100 мм, 120x120 мм и 125x125 мм и диапазона производительности печи 40 – 120 т/ч.

9. Рассчитан возможный экономический эффект от снижения брака металла при нагреве средне и высокоуглеродистых марок стали, склонных к трещинообразованию, за счет установления рационального температурного профиля печи при переменной производительности, который составляет 7,585 млн. руб./год для одной печи с номинальной производительностью 120 т/ч.

10. Результаты диссертационной работы являются частью исследований, проведенных в рамках госбюджетной темы «Совершенствование тепломассообменных процессов и режимов работы оборудования для тепловой обработки материалов» № Н-2022-13; приняты Филиалом №3 ООО «ЮГМК» «Макеевский металлургический завод» в качестве научно-методической основы для освоения нагрева заготовок сечением 100x100 мм, 120x120 мм и 125x125 мм; материалы исследования внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «ДонНТУ».

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Научные работы, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях

1. Бирюков, А.Б. Повышение точности определения теплового состояния металла в методической зоне проходной печи при использовании инженерных методов / А.Б. Бирюков, А.Н. Лебедев, Ю.О. Турулина, С.А. Онищенко // Вестник Академии гражданской защиты. 2017. – № 1 (9). – С. 5–11.

2. Бирюков, А.Б. Методика определения температурного профиля методической печи, работающей в условиях пониженной производительности / А.Б. Бирюков, А.Н. Лебедев, Ю.О. Турулина // Сталь. 2017. – № 10. – С. 74–77.

3. Бирюков, А.Б. Анализ способов определения рациональных технологических параметров печей при работе в условиях изменяющейся производительности / А.Б. Бирюков, Ю.О. Турулина // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. 2021. – № 4. – С. 70–77.

4. Бирюков, А.Б. Совершенствование расчетного метода определения температурного профиля проходной печи с механизированным подом путем изменения шага раскладки заготовок / А.Б. Бирюков, Ю.О. Турулина // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. 2022. – № 2. – С. 78–83.

5. Бирюков, А.Б. Совершенствование расчетного метода определения рациональных режимных параметров проходной печи с механизированным подом, работающей в условиях переменной производительности / А.Б. Бирюков, Ю.О. Турулина // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. 2022. – № 3. – С. 52–56.

6. Бирюков, А.Б. Определение оптимального шага укладки заготовок в печи с механизированным подом, работающей в условиях переменной производительности / А.Б. Бирюков, Ю.О. Турулина // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. 2023. – № 1. – С. 57–63.

7. Бирюков, А.Б. Инженерная методика определения температурного состояния металла при его нагреве / А.Б. Бирюков, Ю.О. Турулина // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2024. – № 2. – С. 24–31.

8. Бирюков, А.Б. Определение температурного профиля проходной печи при нагреве металла в условиях переменной производительности / А.Б. Бирюков, Ю.О. Турулина // Промышленная энергетика. 2024. – № 5. – С. 28–34.

9. Турулина, Ю. О. Косвенное определение температуры металла на основании анализа энергосиловых параметров черновой клетки прокатного стана / Ю.О. Турулина, А.Б. Бирюков, В.А. Сидоров // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 162-167.

Научные работы и тезисы докладов в материалах конференций

10. Турулина, Ю.О. Исследование теплового режима методической печи в условиях пониженной производительности / Ю.О. Турулина, А.Н. Лебедев, А.Б. Бирюков // В сборнике: Metallurgy XXI столетия глазами молодых. Сборник докладов III международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов. Отв. ред. Кочура В.В., 2017. – С. 182–184.

11. Турулина, Ю.О. Определение температурного состояния заготовок при нагреве в методических печах путем численного решения уравнения теплопроводности / Ю.О. Турулина, А.Н. Лебедев, А.Б. Бирюков // В сборнике: Metallurgy XXI столетия глазами молодых. Сборник докладов IV международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов. Отв. ред. Кочура В.В., 2018. – С. 324–326.

12. Турулина, Ю.О. Определение рациональных параметров работы проходных печей в нерасчетных условиях // В книге: Актуальные проблемы недропользования. Тезисы докладов XVIII Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых. Санкт-Петербург, 2022. – С. 380–382.

13. Турулина, Ю.О. Совершенствование метода определения рациональных параметров работы проходных печей с механизированным подом // В книге: Актуальные проблемы недропользования. Тезисы докладов участников XIX Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых. Санкт-Петербургский горный университет. Санкт-Петербург, 2023. – С. 108–110.

14. Турулина, Ю.О. Совершенствование метода определения рациональных технологических параметров проходных печей в условиях изменяющейся производительности // В книге: Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тезисы докладов Тридцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. Москва, 2024. – С. 770.

15. Турулина, Ю.О. Совершенствование расчетного метода определения режимных параметров методической печи в условиях пониженной производительности / Ю.О. Турулина, А.Б. Бирюков // В сборнике: Metallurgy XXI столетия глазами молодых. Материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов: сборник докладов. Донецк, 2024. – С. 211–212.