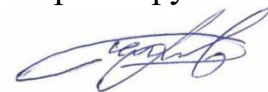


На правах рукописи



Быстров Михаил Викторович

**СНИЖЕНИЕ РАСХОДА ГРАФИТИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОДОВ В ДУГОВЫХ
ПЕЧАХ ЗА СЧЕТ ИХ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ**

Специальность 2.6.2. Metallургия черных,
цветных и редких металлов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: **Ячиков Игорь Михайлович**, доктор технических наук, профессор кафедры ИнИТ ФГАОУ ВО ЮУрГУ (НИУ).

Официальные оппоненты: **Нехамин Сергей Маркович**, доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва.

Ганин Дмитрий Рудольфович, кандидат технических наук, доцент кафедры металлургических технологий и оборудования Новотроицкого филиала ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет МИСИС», г. Новотроицк.

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Защита диссертации состоится «02» апреля 2025 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.437.01 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ (НИУ), главный корпус, ауд. 1001.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ЮУрГУ, Ученый совет. Тел. (351) 272-33-22, e-mail: Ping.W1n@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» и на сайте:

<https://www.susu.ru/ru/dissertation/24243701-d-21229801/bystrov-mihail-viktorovich>

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, доцент, к.т.н.



Шабурова Н.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. ЭлектрOMETаллургия является наиболее современной и эффективной технологией для выплавки цветных и черных металлов. Это объясняется рядом факторов: малые финансовые вложения, возможность выплавки различных легированных сплавов с прогнозируемыми свойствами из руд низкого качества и др. Неоспоримым приоритетом дуговой печи по сравнению с другими плавильными агрегатами для производства металлов и их сплавов является возможность концентрированного ввода большого количества тепловой энергии при одновременной простоте регулирования подводимой мощности, а также транспортабельность и простота подачи электрической энергии с достаточно высоким электрическим коэффициентом полезного действия. При выплавке стали в электропечах основными показателями, влияющими на формирование экономической эффективности, являются повышение производительности оборудования, снижение энергозатрат на выплавку одной тонны стали, повышение стойкости футеровки, снижение потребления расходных материалов и снижение брака. Общая тенденция развития современных металлургических предприятий направлена на снижение энергоресурсов, материалов и оборудования, участвующих в производстве.

Графитированные электроды (ГЭ) являются неотъемлемой частью электродугового процесса плавки металлов и предназначены для подачи электрического тока в рабочее пространство печи, формирования дугового разряда и создания направленного теплообмена. Современные дуговые печи постоянного (ДППТ) и трехфазного (ДСП) тока используют графитированные электроды и ниппели, которые являются расходуемым материалом при выплавке металлопродукции. Затраты на них в структуре себестоимости выплавки стали в некоторых случаях достигают 30%. Высокая стоимость ГЭ, обусловленная технологией их изготовления, широкое применение импортных расходных материалов в условиях нестабильной мировой экономической ситуации приводит к поиску мероприятий по снижению их удельного расхода. Существуют способы снижения расхода ГЭ, в том числе и за счет их принудительного охлаждения путем подачи газов и испарительного охлаждения (ИО).

В балансе расхода ГЭ одним из значимых факторов является их термомеханическое разрушение, которое составляет до 35%. Также в атмосфере печи под воздействием высокой температуры происходит окисление боковой поверхности ГЭ, которое в общем балансе составляет до 37%. Поэтому уменьшение температуры ГЭ является ключевым фактором, влияющим на снижение скорости его разрушения, окисления, а значит, и расхода. В этой связи проведение исследований, направленных на поиск мероприятий по рациональному снижению температуры, а значит, и расхода ГЭ, являются актуальными.

Степень разработанности темы исследования

Диссертация является законченной научной работой, в которой результатом теоретических и экспериментальных исследований являются научные и технологические основы процессов, влияющих на увеличение срока службы ГЭ.

Объектом исследования является работа графитированных электродов в

ДСП и ДППТ, **предметом** исследование является определение удельного расхода ГЭ за счет их принудительного охлаждения при работе дуговой печи.

Анализом причин расхода ГЭ и возможных способов его снижения, а также применением полых ГЭ занимались и занимаются многие российские и зарубежные ученые: Агапитов Е.Б., Калмыков В.А., Кабанова Т.В., Маслов Д.В., Грудницкий О.М., Бойков Д.В., Губарева В.И., Козырев Н.А., Давыдович Б.И., Ячиков И.М., Кузнецов Д.М., Zhang De-ming, Schwabe W.E., Jaccard L.R., Rafiei R., Gorlani C. и др.

В настоящее время достаточно подробно изучены различные способы снижения расхода ГЭ. В работах приведены некоторые примеры практического применения водного охлаждения ГЭ как в России, так и за рубежом. Однако в известных исследованиях нет научной проработки использования водяного охлаждения для печей разной вместимости, прежде всего малой, и особенности технико-экономических условий работы.

Цель работы. Сокращение удельного расхода графитированных электродов за счет использования их принудительного охлаждения.

Задачи исследования.

1. По литературным источникам проанализировать существующие способы снижения средней температуры поверхности ГЭ, как основного фактора их окисления и термического износа.
2. Установить эффективность охлаждения полых ГЭ при подаче различных газов через осевой канал.
3. Установить значения снижения расхода ГЭ в дуговых печах при использовании системы испарительного охлаждения водой его боковой поверхности.
4. Провести экспериментальные исследования по применению ИО водой боковой поверхности ГЭ на промышленной дуговой печи. Провести проверку адекватности и адаптацию результатов экспериментов с теоретическими исследованиями.
5. Разработать рекомендации по практическому использованию технологии испарительного охлаждения ГЭ для повышения технико-экономической эффективности работы дуговой печи.

Научная новизна работы

1. Созданы оригинальные математические модели теплового состояния, охлаждаемого газом полого ГЭ и испарительного охлаждения водой боковой поверхности цельного ГЭ, позволяющие определять изменение его массы и формы при условиях работы в дуговой печи.
2. Впервые теоретически обоснована малая эффективность использования газового принудительного охлаждения через осевой канал графитированного электрода. Средняя температура ГЭ снижается на 2°C.
3. Получены новые данные по снижению расхода ГЭ при использовании испарительного охлаждения водой боковой поверхности ГЭ в печах различной вместимости в зависимости от качества графита и расхода воды. В среднем, расчетные и практические данные подтверждают снижение расхода ГЭ на 10%.
4. Впервые разработаны технико-экономические рекомендации по выбору рациональных режимов использования испарительного охлаждения в дуговых

печах различной вместимости в зависимости от стоимости ГЭ и энергоресурсов. Для печей вместимостью 0,5–25 т расход воды не должен превышать 0,2 м³/ч. Для печей 80–200 т не более 1,5 м³/ч. Время включения ИО с 1–10 минуты от подачи тока на ГЭ.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработанные математические модели позволяют в производственной среде, не прибегая к проведению дорогостоящих опытных работ на действующих дуговых печах, рассчитывать с удовлетворительной для инженерной практики точностью тепловое состояние ГЭ с использованием принудительного охлаждения и без него, определять скорость уноса графита с поверхности ГЭ и наиболее эффективные параметры охлаждения ГЭ.

2. На основании исходных данных, выданных специалистами «АВИСМА» (г. Березники) с использованием компьютерного моделирования был проведен расчет угара ГЭ в условиях работы стотонной дуговой рудно-термической печи (РТП) и предложена конструкция экспериментального устройства ИО. Найден рациональный расход воды на ИО, составляющий 1,5 м³/ч и время включения ИО через 10 минут после подачи тока на электроды.

3. Результаты работы использовались для проведения опытных работ по снижению расхода ГЭ на 100 т РТП-1 на предприятии «АВИСМА» (г. Березники) и 6 т дуговой печи постоянного тока (ДППТ-6) на предприятии ПАО «СИБЛИТ-МАШ» г. Новосибирск. По результатам работ получены Акты внедрения.

Методология и методы исследования

Распределение температуры в графитированном электроде рассчитывали на основе решения дифференциального нестационарного уравнения теплопроводности с внутренними источниками тепла, выделяющегося при прохождении электрического тока. Для численного решения краевой задачи использовали метод конечных разностей. При этом было проанализировано распределение температуры по длине сплошного и полого ГЭ с учетом принудительного охлаждения.

Экспериментальные исследования проводились оценочным методом на основании существующих данных по расходу ГЭ путем проведения опытных плавов на РТП-1 на предприятии «АВИСМА» г. Березники и ДППТ-6 ПАО «СИБЛИТ-МАШ» г. Новосибирск с использованием принудительного охлаждения водой боковой поверхности ГЭ.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты исследований тепловой работы полых ГЭ при подаче различных газов в осевой канал в условиях работы дуговой печи. Закономерности изменения расхода ГЭ в зависимости от параметров охлаждения и теплофизических характеристик подаваемых газов.

2. Результаты исследований тепловой работы ГЭ при подаче воды на боковую поверхность для дуговых печей различной вместимости. Закономерности изменения расхода ГЭ в зависимости от основных параметров системы испарительного охлаждения.

3. Результаты опытных работ по применению ИО водой боковой поверхности ГЭ для РТП-1 «АВИСМА» г. Березники и ДППТ-6 ПАО «СИБЛИТМАШ» г. Новосибирск. Оценка адекватности представленных

теоретических исследований тепловой работы ГЭ с учетом принудительного охлаждения.

4. Рекомендации по рациональным режимам использования испарительного охлаждения ГЭ в дуговых печах с известными технологическими характеристиками, при которых достигается максимальная технико-экономическая эффективность.

Степень достоверности

Достоверность полученных результатов обеспечена экспериментальными исследованиями применения системы испарительного охлаждения. В теоретических исследованиях использованы основополагающие принципы численного расчета дифференциальных уравнений. Адекватность исследований проверялась сравнением результатов расчетов с известными литературными данными, а также с результатами промышленных исследований.

Апробация результатов исследований

Основные положения диссертационной работы были изложены и обсуждены на научно-технических конференциях:

1. XV научно-промышленный форум «Техническое перевооружение машиностроительных предприятий России» секция «Заготовительное и металлургическое производство. Литейные технологии в машиностроении», 18 – 19 октября 2022 г., Екатеринбург, 2022.

2. II национальной научная конференция «Наука XXI века: технологии, управление, безопасность», ФГБОУ ВО «КГУ», 21–22 апреля 2022 г., Курган, 2022.

3. VIII Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных УрФУ «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов», 16-17 мая 2019 г. Екатеринбург, 2019.

4. 77-ая международная научно-техническая конференция МГТУ им. Носова «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования», Магнитогорск, 2019.

5. II Международная научно-практическая конференция УрФУ «Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности», Екатеринбург, 2018.

6. XV международный конгресс сталеплавильщиков и производителей металла, 15–19 октября 2018 г., Тула, 2018.

7. XIII Международная конференция «Современные проблемы электрометаллургии стали», 3–6 октября 2017 г., Челябинск – Старый Оскол, 2017.

Публикации

По наиболее значимым темам диссертационной работы имеется 15 публикаций, из них 4 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и 2 в наукометрической базе данных Scopus. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора заключается в формулировании цели работы и задач исследования, планировании, подготовке и проведении экспериментов, обработке, анализе и обобщении полученных результатов, участии в апробации работы и написании статей.

Автор выражает благодарность кандидату технических наук Портновой Ирине Васильевне, генеральному директору ПАО «СИБЛИТМАШ» Масалову Анатолию Карповичу, доктору технических наук Афонаскину Александру Васильевичу за предоставление возможности работать над диссертацией и консультационную помощь в ее написании.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов по работе, списка использованных источников, списка сокращений и двух приложений. Работа изложена на 139 страницах машинописного текста, содержит 67 рисунков, 13 Таблиц, список использованных источников из 144 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено оценке актуальности работы. Кратко представлен уровень разработанности темы исследования. Поставлена цель работы и сформулированы задачи исследования. Раскрыты теоретическая и практическая ее значимость, а также научная новизна.

Первая глава «Тепловая работа графитированных электродов в дуговых печах для выплавки черных и цветных металлов» посвящена литературному обзору существующих и исследуемых вариантах снижения расхода ГЭ. Включает в себя сведения об угольных и графитированных электродах, применяемых для выплавки металлов и сплавов в дуговых печах, кратко рассмотрена технология их изготовления. Отмечено, что ГЭ по многим параметрам превосходят угольные. Основным их преимуществом считается меньшее значение удельного электрического сопротивления, что позволяет изменять их рабочий диаметр в меньшую сторону. Это положительно влияет на конструкцию самих дуговых печей, облегчает стойки, электрододержатели, а также снижает электрические потери в них. Окисляемость под воздействием высокой температуры у ГЭ меньше, прочность выше, науглераживание сталей меньше. Безусловно, обеспечение таких свойств приводит к увеличению стоимости ГЭ, но и расход у них в 2,0–2,5 раза ниже. Это в значительной степени компенсирует высокую стоимость, которая обусловлена технологией их изготовления, а точнее энергоемкостью процесса графитизации, который составляет до 7–8 МВт/ч.

Установлено, что расход ГЭ напрямую связан с их тепловой работой в атмосфере дуговой печи. Основными статьями расхода являются окисление боковой поверхности ГЭ (37,8%) и термомеханическое разрушение и износ (35%).

Далее проведен анализ возможных и существующих способов уменьшения расхода электродов. Отмечено, что большинство из них относятся к соблюдению технологических режимов работы с дуговыми печами. Нанесение различных покрытий на основе Al, SiC, TiN, TiAlSi на боковую поверхность ГЭ влечет за собой высокие материальные затраты, что во многом снижает экономический эффект от его применения. Рассмотрен вопрос применения трубчатых ГЭ в дуговых печах. Отмечается увеличение удельного расхода полых ГЭ из-за окисления внутренней поверхности в результате контакта с атмосферой в рабочем пространстве печи. Предложен способ введения через осевой канал инертных газов аргона и азота, что может снижать окисление канала электрода и приводить к ста-

билизации горения дуги. Но в литературе нет единого мнения по влиянию различных газов на тепловое состояние полых ГЭ в условиях их работы в дуговых печах.

Существует перспективный способ принудительного охлаждения электродов за счет испарения воды на его боковой поверхности. Паровая пленка, образующаяся вдоль боковой стенки ГЭ, снижает его температуру и экранирует от окисления. Конструкции данных систем просты в изготовлении и использовании и состоят, в основном, из металлического кольца испарительного охлаждения и системы подачи и контроля над расходом воды и воздуха. Данная технология не требует серьезных материальных вложений на внедрение в производственный процесс и последующее использование.

Проведенный обзор работ по теоретическим и экспериментальным исследованиям теплового состояния ГЭ позволяет сделать следующие выводы.

1. Температура по длине ГЭ не равномерна: чем ближе к дуге, тем выше. В месте крепления дуги температура электрода максимально высокая и составляет $\sim 4000^{\circ}\text{C}$, у электрододержателя $\sim 350^{\circ}\text{C}$. Температура ниже $\sim 400^{\circ}\text{C}$ не значительно влияет на окисление и, соответственно, расход ГЭ;

2. Температура нижнего торца полого ГЭ несколько выше, чем у сплошного электрода. Однако использование аргона, как охладителя осевого канала, может приводить к некоторому снижению этой температуры;

3. Охлаждение боковой поверхности ГЭ водой, т. е. использование систем ИО, позволяет снизить температуру ГЭ и экранировать его от окисления. Коэффициент теплопередачи, учитываемый для зоны распыления воды на ГЭ, оказывает значительное влияние на распределение температуры внутри ГЭ;

4. Представленные в литературе математические модели теплового состояния ГЭ не дают точных данных о температуре их поверхности во время работы дуговой печи, т. к. не учитывают ряд существенных факторов:

- использование принудительного охлаждения газом или водой поверхности ГЭ;
- эффект близости соседних ГЭ в ДСП;
- технологические параметры (режимы) систем принудительного охлаждения ГЭ, такие как время включения/выключения и давление воды;
- изменение формы рабочего конца ГЭ в результате окисления и сублимации графита;
- принятие температур на нижнем и верхнем торцах ГЭ за постоянные величины.

Также рассмотрены существующие конструкции системы испарительного охлаждения ГЭ в дуговых печах. Все существующие системы имеют идентичную конструкцию и схожую схему работы. Одной из проблем, связанной с охлаждаемыми водой электродами, является выбор рационального значения расхода воды. Большой расход воды и повышение ее температуры в процессе работы дуговой печи с встроенной системой ИО приводит к снижению эффекта поверхностного натяжения, и вода падает вниз в виде капель, что небезопасно, а также увеличивает тепловые потери. Потеря тепла может в конечном итоге повысить расход электроэнергии, что снижает эффект, связанный с уменьшением расхода электродов. В этой

связи предварительный расчет технико-экономических параметров системы охлаждения электродов является важной задачей.

Вторая глава «*Моделирование теплового состояния полого графитированного электрода дуговой печи и анализ параметров газового охлаждения на динамику угара графита*». В ней рассмотрено исследование теплового состояния полого графитированного электрода, находящегося в дуговой печи, анализа параметров газового охлаждения на динамику угара графита посредством математического моделирования (ММ). Объектом моделирования является графитированный электрод с осевым каналом. По каналу подается холодный газообразный теплоноситель с массовым расходом, который, нагреваясь, охлаждает полый электрод.

Были приняты допущения. Считали, что температура, распределяемая по поверхности ГЭ, зависит от следующих основных тепловых источников: мощности источника тепла внутри ГЭ, то есть от тока, проходящего через него; теплообмена с горячей на торцевой части ГЭ дугой, конвективного теплообмена с атмосферой печи; теплового излучения от футеровки подины и от конвективного теплообмена с газом, поступающим в осевой канал. Газ течет в установившемся турбулентном режиме, а также является лучепрозрачным и химически инертным.

Процесс теплообмена с учитываемыми тепловыми потоками представлены на Рисунке 1.

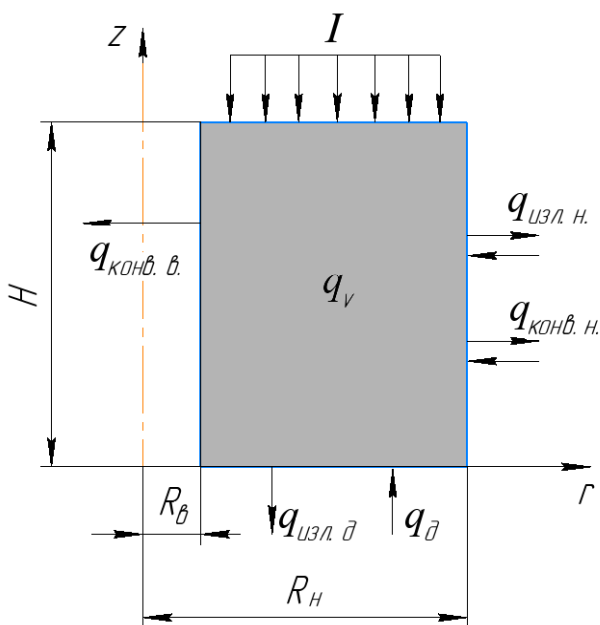


Рисунок 1 – Тепловые потоки в электроде

Процесс теплообмена ГЭ во время плавки будем рассматривать в цилиндрической системе координат, где ось OZ коллинеарна оси ГЭ. Процесс считаем осесимметричным $\left(\frac{\partial t}{\partial \varphi} = 0\right)$, $\frac{\partial t}{\partial r} \neq 0$, $\frac{\partial t}{\partial z} \neq 0$.

Учитывая вышеперечисленное, дифференциальное уравнение теплопроводности можно записать как

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{c\gamma} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) \right] + \frac{q_v}{c\gamma}, \quad (1)$$

где $R_в < r < R_н$, $0 < z < H$, а c, γ – эффективные удельная теплоемкость и плотность материала электрода соответственно. q_v – мощность внутренних источников:

$q_v = J^2 \rho$, где ρ – удельное

электрическое сопротивление материала электрода; $J = I/S$ – средняя плотность тока идущего через электрод, где I – ток дуги, а S – площадь поперечного сечения электрода.

Мощность джоулева тепла, выделяющегося внутри ГЭ на единицу объема за счет прохождения через него электрического тока, определяется решением следующего уравнения $q_v = 16I^2 \rho / (\pi^2 (R_н^2 - R_в^2)^2)$. Для решения краевой задачи уравнение (1) дополнялось граничными условиями.

По ММ на языке программирования С++ Builder создана компьютерная программа, упрощающая расчеты. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019614348. Данная программа предоставляет возможность определения теплового состояния полого ГЭ при подаче газа в осевой канал. Для начала расчета необходимо ввести геометрические, технологические и теплофизические параметры полого ГЭ, а также параметры теплоносителя и дуговой печи.

С использованием разработанного программного продукта был проведен расчет теплового состояния (температурного поля) для полых ГЭ разного диаметра и разных параметров дуговых печей. Исследование температурного поля ГЭ, работающих на дуговых печах трехфазного тока вместимостью 6т и 50т, было проведено с учетом подачи азота в осевой канал.

Проведен расчет/моделирование, в результате которого определено, как изменяется средняя температура полого ГЭ в зависимости от расхода, поступающего в осевой канал аргона спустя 6 минут от начала плавки. Установлено, что средняя температура поверхности снижается на 2°С при расходе газа, достигающего до 130 м³/ч (Рисунок 2, а). Также получены данные о температуре исследуемых газов по высоте осевого канала ГЭ (Рисунок 2, б).

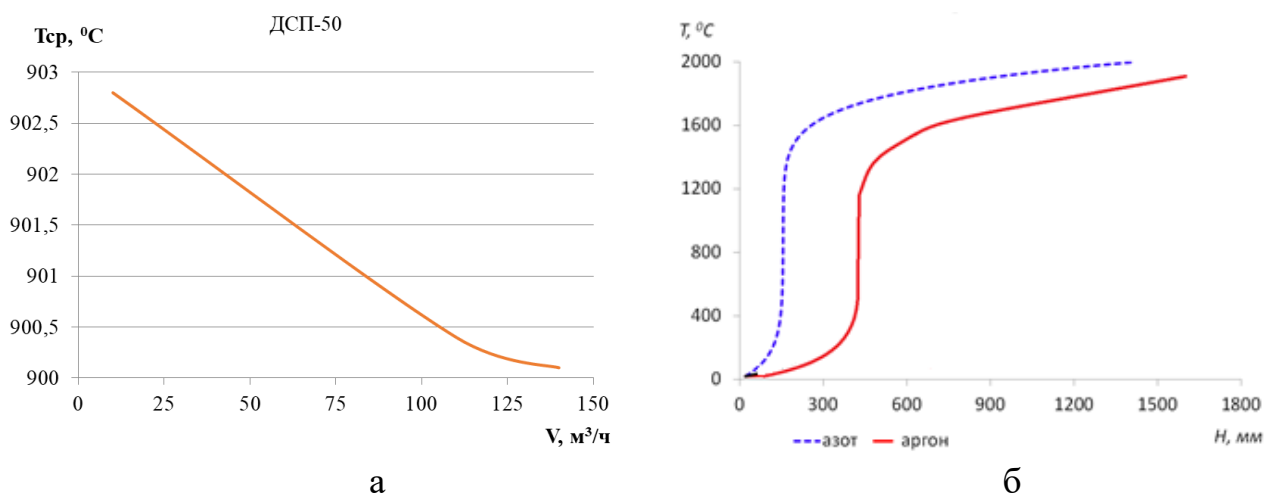


Рисунок 2 – Изменение температуры ГЭ от объемного расхода Ar (а) и изменение температуры газа по длине осевого канала ГЭ (б)

В результате анализа полученных данных, установлено.

1. Подаваемые в полый электрод газы (N_2 , Ar) быстро достигают высоких температур, которые сопоставимы с температурой ГЭ, поэтому охлаждение происходит в незначительной зоне только на начальном участке электрода.

2. Все газы разгоняются в 6–7 раз до скорости 25–30 м/с при нагреве до 1800°С. Положительным моментом подачи газа является стабилизация горения дуги, дополнительное перемешивание металла и шлака, а также снижение содержания кислорода в зоне горения дуги.

3. Охлаждение газом осевого канала ГЭ позволяет отвести незначительное тепло, т. к. поступающий в осевой канал газ имеет массовый расход, при котором температура поверхности электрода меняется несущественно.

4. Происходит незначительное снижение расхода ГЭ.

Третья глава «Моделирование теплового состояния и динамики угара графитированного электрода при использовании системы испарительного охлаждения». Проведено исследование теплового состояния ГЭ для дуговых печей разной вместимости с учетом использования системы испарительного охлаждения водой.

При создании математической модели принимали ряд допущений и упрощений. Считали, что температура, распределяемая по поверхности ГЭ, зависит от следующих основных тепловых источников: мощности источника тепла внутри ГЭ, то есть от тока, проходящего через него; теплообмена с горячей на торцевой части ГЭ дугой, конвективного теплообмена с атмосферой печи; теплового излучения от футеровки подины и от конвективного теплообмена с водой, подаваемой на боковую поверхность. Рассматриваемые тепловые потоки в ГЭ приведены на Рисунке 3.

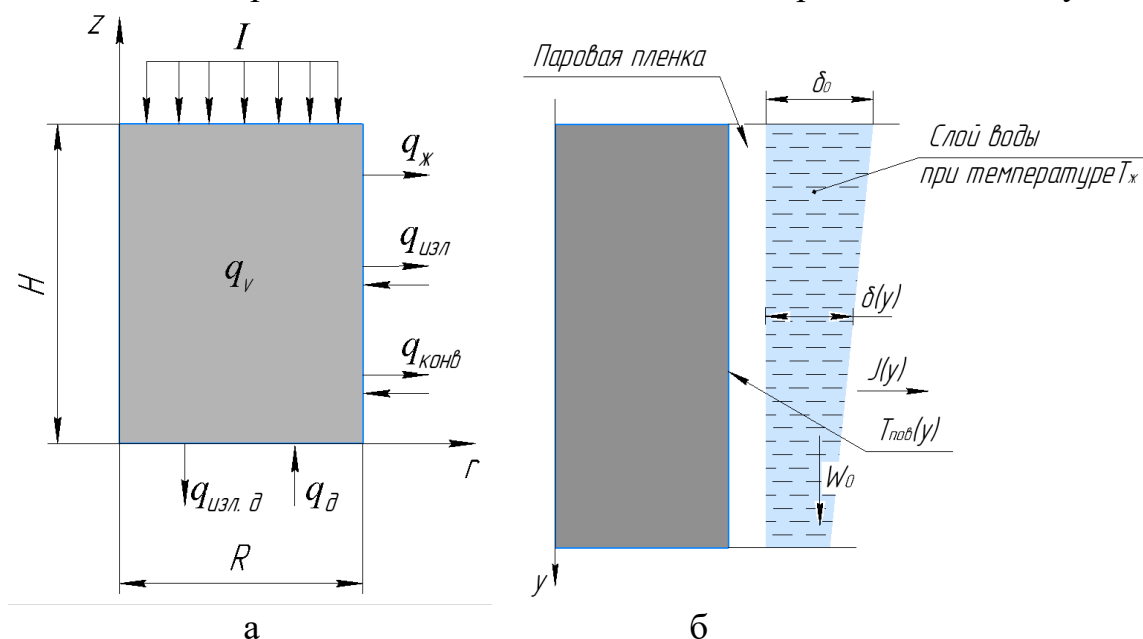


Рисунок 3 – Тепловые потоки, действующие на ГЭ (а), и схема теплообмена при испарении воды с боковой поверхности электрода (б)

При построении модели допустили, что эффективный коэффициент теплопроводности материала ГЭ линейно зависит от температуры $\lambda = \lambda_0 [1 + b(T - T_0)]$, джоулево тепло выделяется равномерно по всему объему ГЭ, тепловой поток, излучаемый дугой, попадает только на нижний торец ГЭ, вся вода из форсунок равномерно подается на боковую поверхность ГЭ, течение воды по боковой поверхности установившееся, режим течения ламинарный и температурное поле является осесимметричным $\frac{\partial t}{\partial \varphi} = 0$, $\frac{\partial t}{\partial r} \neq 0$, $\frac{\partial t}{\partial z} \neq 0$.

Рассмотрим процесс нагрева ГЭ в цилиндрической системе координат, где ось OZ совмещена с осью цилиндра (см. рисунок 3).

Уравнение теплопроводности для нестационарного процесса в цилиндрической системе координат с учетом осевой симметрии и внутренних источников тепла определяется по формуле (1).

Задаются граничные условия на оси симметрии электрода, на его боковой поверхности и на торцах. На верхнем торце ГЭ ($0 \leq r \leq R$, $z = H$) тепловой поток

равен нулю, т. к. считаем его теплоизолированным $q = \lambda \frac{\partial T}{\partial z} = 0$. На нижнем торце ($z = 0, 0 < r < R$) теплообмен определяется с учетом излучения с торца на футеровку печи и теплового потока от электрической дуги $q_d - q_{изл} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}$. На оси симметрии ($r = 0, 0 < z < H$) имеем $\partial T / \partial r = 0$. На боковой поверхности ($r = R, 0 < z < H$) теплоотдача определяется свободной конвекцией с атмосферой печи и излучением на боковые стенки для боковой поверхности, не охлаждаемой водой $-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = q_{изл} + q_{конв}$ и вынужденной конвекцией с водой посредством ИО $-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = q_{жс}$.

Введем некоторые допущения для определения тепломассообмена движения жидкости по поверхности электрода:

- переданная к жидкости теплота испаряет воду и поднимается вверх вместе с паром (адиабатное испарение);
- тепловой поток от окружающей среды и поверхности ГЭ направлен к жидкости;
- в атмосфере внутреннего пространства печи вдали от потока жидкости нет пара, возникает поток вещества, направленный от поверхности испарения;
- теплоту нагрева жидкости до температуры испарения не учитываем и принимаем $T_{жс} = 100^\circ\text{C}$;
- вода имеет постоянную скорость W_0 при движении вниз по стенке ГЭ.

Для теоретического анализа эффективности использования ИО водой боковой поверхности ГЭ проведено моделирование теплового состояния электродов в дуговых печах трехфазного и постоянного тока разной вместимости. В качестве инструмента для проведения моделирования использовалась компьютерная программа «Моделирование теплового состояния электрода ДСП» созданная по математической модели, описанной выше. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017617959.

Программа позволяет определять температурное поле ГЭ с учетом джоулева тепловыделения, излучения дуги и электрода, свободной конвекции, а также при различных параметрах системы ИО водой. Вместе с тем моделирование дает информацию по скорости уноса графита с боковой поверхности ГЭ, расходу ГЭ и по толщине водяной пленки в процессе работы ИО.

Исследования проводили для печей разной вместимости. Первым объектом исследования были выбраны плавильные агрегаты, используемые в «большой» металлургии – ДСП и ДППТ вместимостью 80–200 т. Адаптация параметров созданной компьютерной модели проводилась для повышения ее адекватности по производственным данным об удельном расходе ГЭ. Результаты, полученные по расчетам, и приведенные ниже графики подтверждают адекватность ММ и созданной по

ней компьютерной программы для расчета теплового состояния и оценки расхода ГЭ в дуговых печах разной вместимости (Рисунок 4).

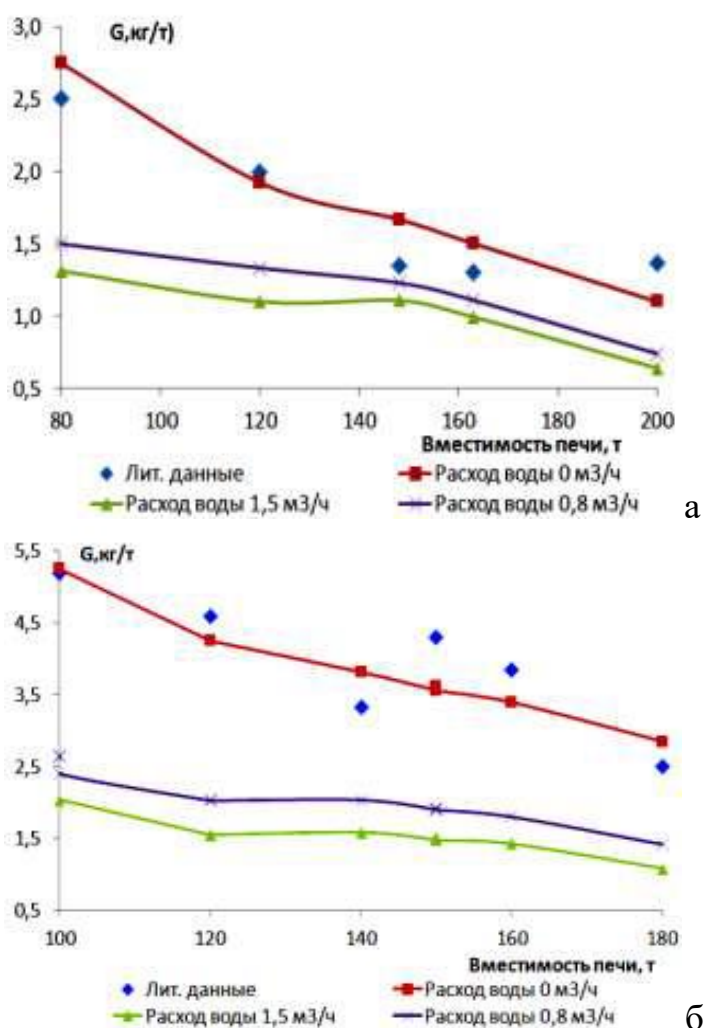


Рисунок 4 – Удельный расход ГЭ в зависимости от вместимости печей при наличии и отсутствии испарительного охлаждения:

а – для ДППТ; б – для ДСП

Лит. данные взяты из статей Вдовина С.Е., Галян В.С., Просвириной И.И., Рощина В.Е., Сафонова В.М., Смирнова А.Н., Апальковой Г.Д., Кац Я.Л.

Установлено, что использование ИО в дуговых печах трехфазного и постоянного тока вместимостью 80–200 т приводит к снижению температуры и окисления ГЭ. Также из графиков видно, что угар ГЭ снижается при увеличении расхода охлаждающей воды и вместимости печи. Использование ИО в печах для «большой» металлургии позволяет достичь значительной экономии ресурсов и повышения эффективности процесса. Отмечено, что рациональное использование воды играет важную роль в обеспечении эффективности процесса охлаждения.

Системы ИО достаточно успешно применяются на ряде дуговых печей, которые установлены на крупных зарубежных и отечественных металлургических предприятиях. Одним из таких предприятий в Российской Федерации является ПАО «ММК». На протяжении уже более 13 лет на предприятии успешно работает ДСП-180 производства фирмы VAI Fuchs с встроенной системой ИО. Также ИО успешно используется на ОАО «БМЗ» в ДСП-100. По данным наблюдения специалистов предприятия, принудительное охлаждение водой ГЭ обеспечило снижение их удельного расхода и уменьшило себестоимость выпуска стали на 5%.

Опираясь на вышеописанный положительный опыт применения систем ИО для крупных дуговых печей вместимостью более 80 т, решено провести исследование по влиянию принудительного охлаждения водой ГЭ для малотоннажных печей. В литературе не встречается данных о применении систем ИО для дуговых печей малой вместимости и работающих с полным циклом.

В связи с этим, а также с тем, что удельный расход ГЭ растет с уменьшением вместимости печи, задача определения эффективности ИО является актуальной. Результаты представлены на Рисунке 5.

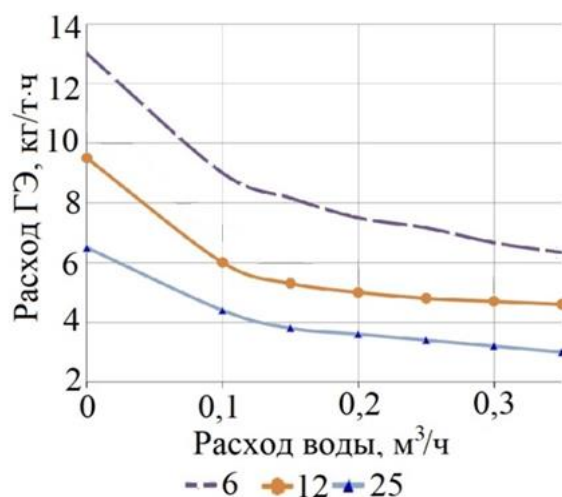


Рисунок 5 – Расход ГЭ на тонну стали в зависимости от расхода подаваемой в систему ИО воды для дуговых печей вместимостью от 6; 12 и 25 т при $\psi=1$

Установлено, что использование системы ИО для всех исследуемых дуговых печей приводит к существенному снижению их расхода. Для печей вместимостью 25 т снижение потерь ГЭ составляет около 11,5%. Также видно, что чем меньше вместимость печи, тем выше потребление ГЭ. Так, при вместимости печей 6 т наблюдается расчетное снижение потерь ГЭ примерно на 28%. Данные результаты расчетов приведены с учетом коэффициента термической стойкости равном 1, т.е. для ГЭ с низким качеством. Также установлено, что подача воды в систему ИО наиболее эффективна в период с 3 по 5 минуту после подачи тока на электрод.

Также изучен вопрос влияния толщины водяной пленки и рационального времени включения подачи воды на эффективность работы системы ИО. Очевидно, что с увеличением расхода воды возрастают толщина и длина стекающей водяной пленки, и зона теплового воздействия ИО. Но при большом расходе воды и повышении ее температуры поверхностное натяжение перестает удерживать пленку на поверхности ГЭ, и вода падает вниз в виде капель. Поэтому есть максимальный расход воды, который можно использовать на ИО. Что касается рационального времени включения подачи воды, то он зависит от вместимости печи. Так, для ДСП-3 наиболее эффективным временем включения ИО является 6 минута после подачи тока, а для ДСП-12 – 2 минута. Задержка времени включения ИО приводит к росту угара графита.

Помимо этого, установлено, что для расчета полной эффективности использования системы ИО необходимо учитывать количество и стоимость электроэнергии, затраченной на испарение воды и качество/стоимость ГЭ, которые напрямую зависят от коэффициента их термической стойкости. Расчет выглядит следующим образом:

$$\Delta G = G(V_B) - G_0, \quad (2)$$

где $G(V_B)$ – расход ГЭ при заданном расходе воды V_B , кг/ч, G_0 – расход ГЭ при $V_B=0$.

Удельную суммарную экономию запишем следующим образом:

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta G \cdot C_r - V \cdot E_1 \cdot C_э, \text{ руб./ч}, \quad (3)$$

где $E_1 = 675 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ – количество энергии, затрачиваемое на испарение 1 м^3 воды; $C_э$ – цена электроэнергии, руб./кВт·ч; C_r – цена ГЭ, руб./кг.

Для расчета скорости угара ГЭ использована следующая зависимость:

$$V(T) = \psi \cdot 10^{a \lg(T)^2 + b \lg(T) + c}, \text{ кг}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}, \quad (4)$$

где $a = 4,9627$; $b = -23,836$; $c = 27,167$, T – температура, К; ψ – коэффициент термической стойкости ГЭ.

Данная зависимость получена на основе работы Н.В. Огорокова по экспериментальным данным скорости уноса ГЭ от его температуры на открытом воздухе. Коэффициент ψ определяет термическую стойкость ГЭ и в зависимости от качества ГЭ находится в диапазоне от 0,1 до 1. Чем больше это значение, тем электрод считается менее качественным, т. е. имеет ниже стойкость к окислению и сублимации при высоких температурах.

В результате расчетов для ДСП-6 была построена зависимость (Рисунок 6) суммарной удельной экономии средств от расхода воды при разной термической стойкости ГЭ и стоимости электроэнергии.

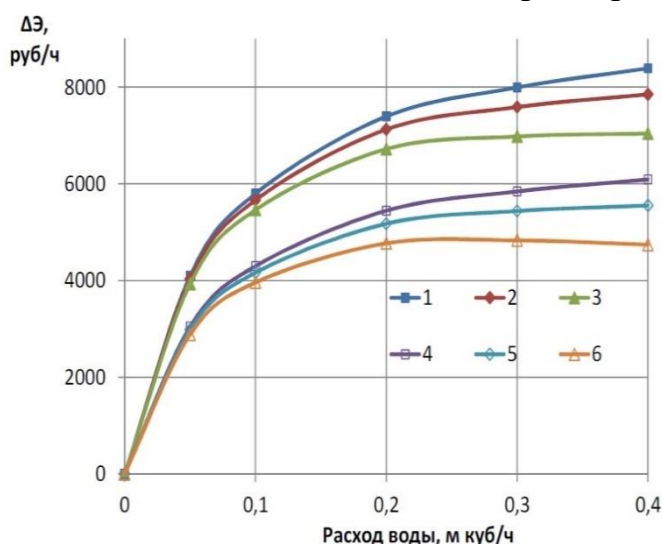


Рисунок 6 – Зависимость суммарной экономии средств от расхода воды при разной термической стойкости ГЭ и стоимости электроэнергии:

- 1 – $\psi = 1$, $C_э = 3$ руб./кВт·ч;
- 2 – $\psi = 1$, $C_э = 5$ руб./кВт·ч;
- 3 – $\psi = 1$, $C_э = 8$ руб./кВт·ч;
- 4 – $\psi = 0,5$, $C_э = 3$ руб./кВт·ч;
- 5 – $\psi = 0,5$, $C_э = 5$ руб./кВт·ч;
- 6 – $\psi = 0,5$, $C_э = 8$ руб./кВт·ч

Определено, что при заданных здесь цене электроэнергии и термической стойкости ГЭ есть рациональный расход воды, составляющий от 0,2 до 0,3 м³/ч. При увеличении расхода наблюдается незначительный рост экономии $\Delta Э$ или даже ее снижение. Также, решая задачу оптимизации $\Delta g(V, \psi) \cdot C_г(\psi) - V \cdot E_1 \cdot C_э = \max$, при ограничениях $0,1 \leq \psi \leq 1$ и $0 \leq V \leq 0,4$ (м³/ч), $3 \leq C_э \leq 8$ (руб./кВт·ч) было установлено, что для ДСП-6 применение ИО более целесообразно на ГЭ более низкого качества.

В четвертой главе «Экспериментальные исследования и практические рекомендации по повышению эффективности охлаждения ГЭ» приведены результаты опытно-промышленного исследования охлаждения ГЭ на предприятиях «АВИСМА» г. Березники и ПАО «СИБЛИТМАШ» г. Новосибирск.

Целью эксперимента является верификация теоретических результатов расчета теплового состояния ГЭ с учетом принудительного охлаждения и оценка прогнозирующей способности разработанной модели. Определены рациональные параметры системы ИО для достижения максимальной эффективности.

Экспериментальное исследование на ПАО «СИБЛИТМАШ».

Литейный цех предприятия оснащен плавильным агрегатом в виде ДППТ-6. Для определения рациональных параметров охлаждения проведен расчет теплового состояния ГЭ с учетом данных, представленных в Таблице 1.

Таблица 1 – Данные для моделирования

Параметр	Единица измерения	Значение для ДППТ-6
<i>Геометрические данные</i>		
Диаметр/длина ГЭ	мм	300/1500
<i>Теплофизические свойства ГЭ</i>		
Коэффициент теплопроводности	Вт/(м·°С)	120
Удельное электрическое сопротивление	мкОм·см	5
Степень черноты графита	–	0,71
Плотность	кг/м ³	1700
Удельная теплоемкость	кДж/(кг·К)	2,1
<i>Технологические параметры печи</i>		
Время включения ИО после ввода холодных ГЭ	с	0–60
Рабочая температура футеровки	°С	1400
Температура печных газов	°С	1200
Степень черноты футеровки	–	0,93
Начальная температура ГЭ	°С	20
Приэлектродное падение напряжения на дуге	В	8
Значение тока дуги	кА	16
<i>Параметры охлаждающей воды</i>		
Расход	м ³ /ч	0,15
Скорость стекания по ГЭ	м/с	0,3
Плотность	кг/м ³	1000
Степень черноты	–	0,5
Теплота парообразования	МДж/кг	2,3
Начальная температура	°С	20

По итогам теоретических исследований/моделирования теплового состояния ГЭ с учетом принудительного охлаждения водой получены данные, определяющие угар электрода при разных значениях расхода воды на ИО. Анализ графика, представленного на Рисунке 7, позволяет говорить, что с увеличением расхода подаваемой на ИО воды угар ГЭ снижается.

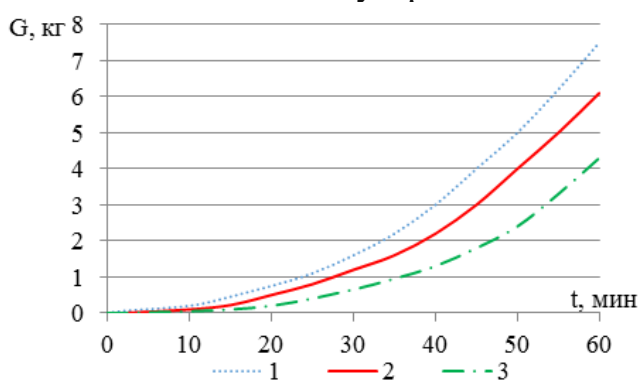


Рисунок 7 – Зависимости расхода ГЭ от времени его работы в ДППТ-6 при разном водорасходе (м³/ч): 1 – 0; 2 – 0,15; 3 – 0,3 (м³/ч)

В результате расчетов, проведенных по формулам 2–4, значение расхода воды для ДППТ-6, дающее максимальную эффективность с точки зрения суммарной удельной экономии средств, составляет 0,15 м³/ч. Также в результате моделирования получена зависимость изменения угара от времени включения ИО. Установлено, что рациональным моментом включения охлаждения является период с 1 по 2 минуту после подачи тока.

Для изготовления системы водяного охлаждения были рассчитаны конструктивные параметры для ДППТ-6 (Рисунок 8).

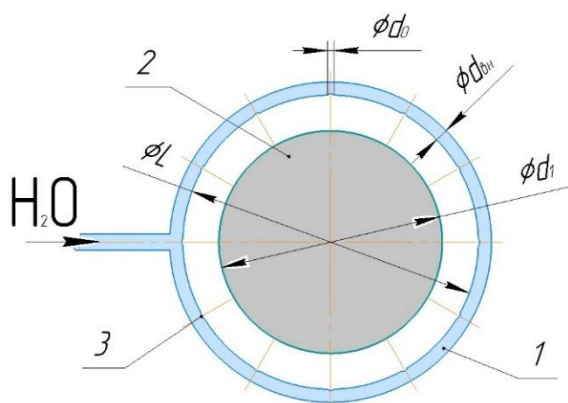


Рисунок 8 – Принципиальная конструктивная схема кольца ИО: 1 – кольцо охлаждения, 2 – ГЭ, 3 – отверстия (сопла), $\text{Ø}d_0$ – диаметр сопла, $\text{Ø}d_{\text{вн}}$ – диаметр трубки, $\text{Ø}d_1$ – диаметр ГЭ, $\text{Ø}L$ – внутренний диаметр трубки

Время одной плавки в среднем составляет 2,0–2,5 часа. Заявленный специалистами ПАО «СИБЛИТМАШ» расход ГЭ без использования охлаждения составляет 2,5 кг/т. Расход ГЭ с охлаждением оценивали методом взвешивания электрода до и после каждой плавки. В результате зафиксировано снижение расхода ГЭ на 15% относительно расхода без охлаждения.

Анализ полученных экспериментальным путем данных показал, что расчетные данные с удовлетворительной точностью отображают реальный расход ГЭ при использовании системы ИО и, соответственно, подтвердил высокую прогнозирующую способность разработанных ММ расчета теплового состояния ГЭ с использованием принудительного охлаждения (Таблица 2). Средняя сходимость расчетных и экспериментальных значений более 80%.

Таблица 2 – Результаты экспериментальных работ

№ плавки	Расход ГЭ при расходе воды равном 0,1 м ³ /ч и времени включения системы охлаждения 90 сек, кг	
	Расчетные данные	Экспериментальные данные
1	12,6	10,1
2	25,2	21,4
3	37,8	35,9
4	50,4	45,4
5	63	53,5

Экспериментальное исследование на «АВИСМА» г. Березники.

«АВИСМА» г. Березники производит диоксид титана и имеет в своем составе три рудно-термические печи (РТП) вместимостью 100 т по шихте.

Расчет рациональных параметров системы ИО для РТП-100 производили в компьютерной программе «Моделирование теплового состояния электрода ДСП». Исходные данные для расчетов приведены в Таблице 3.

На основе результатов расчетов и технического задания было изготовлено экспериментальное устройство ИО ГЭ и установлено на ДППТ-6 под электрододержатель. Полученные в ходе теоретического расчета/моделирования данные времени включения ИО и расхода воды были использованы для проведения опытно-промышленных исследований. Согласно программе эксперимента, проведены 5 плавки с использованием ИО при расходе воды 0,1–0,15 м³/ч и выполнена оценка полученного расхода ГЭ. Опытные плавки проводили в соответствии с действующими на заводе технологическими инструкциями.

Таблица 3 – Технические характеристики и промышленные данные РТП-100 и ГЭ

Параметр	Значение
Высота электрода (расстояние от водяного кольца вокруг электрода до нижнего основания свечи ГЭ)	2000 мм
Диаметр электрода	610 мм
Установленная мощность печного трансформатора	16,5МВА
Среднее значение действующего значения силы тока в электрической дуге за период плавки	27 кА
Приэлектродное падение напряжения	8 В
Степень черноты футеровки боковых стен печи	0,93
Средняя температура футеровки боковых стен печи, откуда падает тепловое излучение на боковую поверхность ГЭ	1400°C
Температура расплава шлака	1800°C
Средняя температура газов в печи вблизи графитированных электродов (ГЭ)	1200–1400°C
Начальная температура ГЭ	20°C
Электрическое сопротивление материала ГЭ при 20 °С	7,5 мкОм·м
Плотность материала ГЭ при 20 °С	1700 кг/м ³
Средний коэффициент теплопроводности материала ГЭ (20–1200 °С)	120 Вт/(м·град)
Средняя удельная теплоемкость материала ГЭ (20– 1200 °С)	2100 Дж/(кг·град)
Время между наращиванием графитированных электродов, расход ГЭ и продолжительность 1 плавки	24 часа, 3 ГЭ/в сутки, 7–8 часов
Длина нового электрода и его масса	2100 мм, 1043 кг
Скорость стекания воды	0,15 м/с
Плотность воды	1000 кг/м ³
Степень черноты воды	0,5
Теплота парообразования воды	2300 кДж/кг
Температура подаваемой воды	20°C
Время между наращиванием графитированных электродов	2100 мм/24 час ≈ 87,5 мм/час
Существующий средний расход одного ГЭ или скорость подачи электродов в печь во время плавки (без учета поломок электродов)	1043 кг/24≈ ≈43,5 кг/час

На основе этих параметров проведены ряд исследований теплового состояния ГЭ с использованием ИО при расходе воды от 0,5 до 2,5 м³/ч. Данные по расходу ГЭ, полученные в ходе расчетов, представлены на Рисунке 9. Видно, что чем больше расход воды, тем ниже средняя температура ГЭ, меньше окисление его поверхности и, значит, меньше его унос.

Это справедливо в том случае, если вся вода, направленная на ГЭ, отбирает от него тепло, а не падает просто в печь. Толщина водяной пленки зависит от свойств поверхности ГЭ и поверхностного натяжения воды и обычно не превышает 1–1,5 мм. Для этого были проведены расчеты, определяющие толщину водяной пленки по длине ГЭ от места подачи воды в зависимости от ее расхода. Исходя из этого, рекомендуемый максимальный расход воды должен составлять около 1,5 м³/час, при котором экономия ГЭ может достигать 25%.

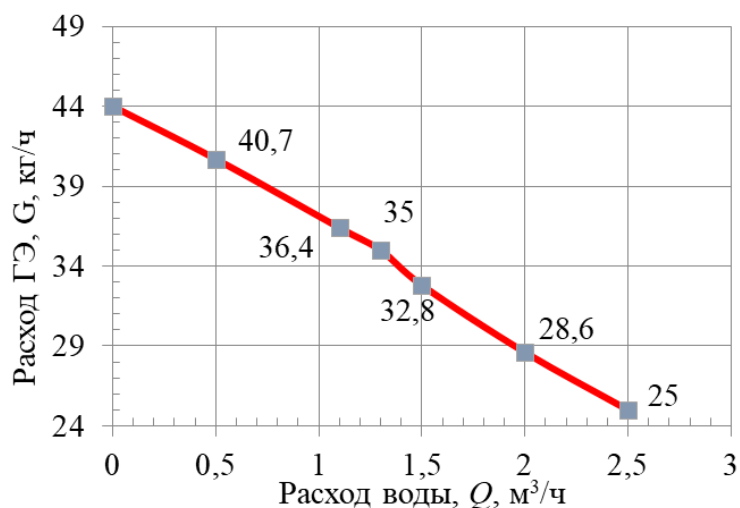


Рисунок 9 – Расход ГЭ за счет угара и термического разрушения в зависимости от расхода воды подаваемой на испарительное охлаждение

Выбор времени включения водяного испарительного охлаждения.

Время включения ИО зависит от стоимости килограмма ГЭ и стоимости кВт·ч электроэнергии с учетом того, что для испарения 1 кубометра воды требуется 675 кВт·ч электроэнергии. В результате расчета, рекомендуемое время включения составляет с 5–15 мин.

По результатам расчетов, определивших рациональные параметры системы ИО ГЭ и подтверждающих эффективность ее использования, специалистами «АВИСМА» г. Березники было принято решение о разработке, изготовлении экспериментального устройства для ИО и проведении промышленных испытаний на РТП-1.

Разработанная специалистами «АВИСМА» опытная установка ИО состоит из двух секций, навешиваемых по обе стороны от ГЭ. Каждая секция состоит из двух полуколец, выполненных из труб с форсунками (Рисунок 10). Верхнее полукольцо служит для подачи воды в зону охлаждения электродов и имеет четыре форсунки. Нижнее кольцо предназначено для подачи воздуха, имеет четыре форсунки, создающие плоскую горизонтально расположенную струю воздуха. Форсунки для воды сделаны съемными на резьбе для возможности оперативной замены в случае засорения. Диаметр подводящих труб составляет 32мм, диаметр отверстий в водяных форсунках составляют 5 мм. Для регулирования количества подаваемой воды и воздуха предусмотрены шаровые регулирующие краны. Расход воды на охлаждение ГЭ предусмотрен в диапазоне 0-3 м³/ч. Для регистрации количества воды на охлаждение установлен прибор учета воды ВСХН-50. Для моментального прекращения подачи воды на электрод в случае аварийной ситуации или возникновения ее угрозы предусмотрена отсечная арматура.

Для сравнительного анализа расхода охлаждаемых и не охлаждаемых ГЭ устройство ИО смонтировано на одном из трех электродов РТП-1 (первая фаза) 01 февраля 2023 года. На Рисунке 11 представлена фотография смонтированной системы ИО на первой фазе на отметке +5600 на кессоне в период ее настройки.

Эксперимент проводили следующим образом: подачу сжатого воздуха на охлаждение ГЭ начинали через один час после окончания загрузки шихты в ванну РТП-1; воду включали после подачи сжатого воздуха путем открытия шарового

крана, расположенного на цеховом напорном коллекторе и крана шарового, расположенного после расходомера; воду подавали с минимальным открытием крана в целях безопасности; охлаждение электрода продолжалось весь цикл восстановительной плавки до начала следующей загрузки шихты; охлаждение воздухом не прекращали. В процессе работы стало понятно, что использование воздуха приводит к дополнительному окислению поверхности электрода. В связи с этим дальнейшие работы проводили исключительно на воде.

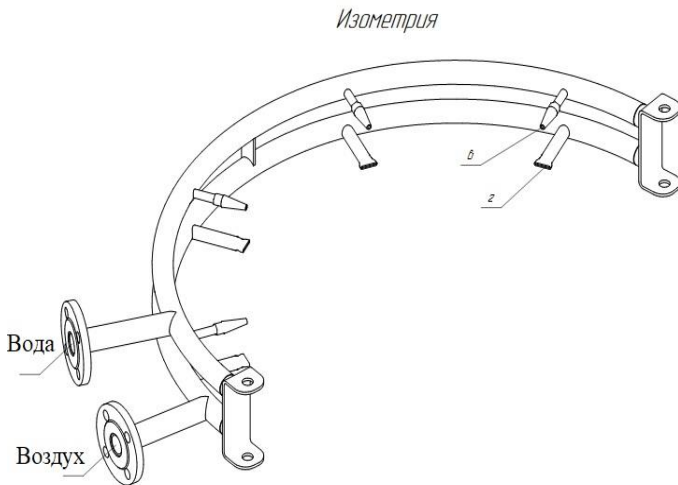


Рисунок 10 – Секция системы ИО



Рисунок 11 – Фотография смонтированной на первой фазе системы ИО

Проведены несколько плавки при расходе охлаждающей воды $0,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ и времени включения системы ИО с 10 минуты. Установлено, что температура охлаждаемого ГЭ снижается и не превышает 500°C в верхней его части. Расход ГЭ на первой фазе составил около 43 кг/ч ($5,7 \text{ кг/т}$ шлака), в то время как на двух других ГЭ около $44,5 \text{ кг/ч}$ ($5,9 \text{ кг/т}$ шлака). Расход ГЭ учитывался в системе управления РТП.

Понятно, что значение расхода воды $0,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ является не существенным для дуговых печей такой мощности. Увеличение свыше $0,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ до расчетного $1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ приводило к значительному разбрызгиванию воды при попадании на нагретый ГЭ. Вследствие чего на своде образовывались большие ее скопления. Для исключения этого эффекта были сформулированы рекомендации. Нужно увеличить количество отверстий в кольце ИО, что будет способствовать снижению скорости ее вытекания и более равномерному распределению по поверхности ГЭ. Также необходимо изменить направление струи воды и все сопла расположить под углом $40-65^\circ$ к оси ГЭ.

С учетом этих рекомендаций специалисты предприятия «АВИСМА» в 2023 году разработали новую конструкцию системы ИО. В бюджете предприятия заложены финансовые средства на ее реализацию в 2024-2025 годах. Это позволит повысить эффективность ИО, снизив расход ГЭ на расчетные 25%.

Удельную экономию средств $\Delta\text{Э}$ при расходе воды $0,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ с учетом стоимости ГЭ, количество энергии требуемой на испарение заданного объема воды, стоимость электроэнергии определили по формулам 2-3. Цена ГЭ – 337712 руб/т , цена

электроэнергии – 2993,94 руб/тыс. кВт·ч. Суммарная удельная экономия средств при расходе воды 0,2 м³/ч составила около $\Delta Э = 622$ руб/ч на один ГЭ. Стоимость изготовления системы ИО на «АВИСМА» составляет 536129 рублей. При снижении расхода ГЭ на 3% экономия материала одного из трех электродов составит около 4980 рублей за одну восьмичасовую плавку. Таким образом, вложения на проектирование и изготовление системы ИО окупятся за 108 плавков при расходе воды 0,2 м³/ч. При расходе воды 1,5 м³/ч и снижении расхода ГЭ на 25% срок окупаемости снизится до 55 плавков. Цены для расчета предоставлены специалистами «АВИСМА» г. Березники и актуальны на первый квартал 2023 года.

Рекомендации по повышению эффективности ИО ГЭ на дуговых печах различной вместимости.

Поскольку опытно-промышленный эксперимент позволил успешно верифицировать разработанные ранее модели, следовательно, результаты расчетов параметров охлаждения, приведенные в главе 3, могут быть рекомендованы для повышения эффективности охлаждения ГЭ в дуговых печах разной вместимости. Рекомендованные максимально эффективные параметры охлаждения с учетом термической стойкости и средней цены электроэнергии приведены в таблице 4. Установлено, что для малых печей применение ИО более целесообразно на ГЭ более низкого качества.

Таблица 4 – Параметры ИО для дуговых печей разной вместимости

Наименование печи, т	ДСП-6	ДСП-12	ДСП-25	ДППТ-80	ДППТ-120	ДСП-180
Расход воды на охлаждение, м ³ /ч	0,1-0,15			1,5		
Время включения ИО, минут от начала плавки	3-5			1		
Расход ГЭ с охлаждением, кг/т·ч	9	6	4,5	1,3	1,2	1,1
Расход ГЭ без охлаждения, кг/т·ч	13	9	6,5	2,7	1,9	2,8
Суммарная удельная экономия средств, руб./ч*	6008	9013	12540	29030	21704	79780
Удельная экономия средств, руб./т	1001	751	502	332	156	424

* – суммарная удельная экономия средств рассчитана по формулам 2–4 с учетом стоимости ГЭ 261,6 тыс. руб./т и затраченной на испарение воды электроэнергии стоимостью 4 руб./кВт·ч.

Эффективность снижения расхода ГЭ за счет принудительного охлаждения для ДППТ ниже в среднем в 1,5 раза, чем для ДСП. Это связано с тем, что площадь окисления поверхности одного ГЭ в ДППТ меньше, нежели у трех в ДСП такой же мощности. ДППТ имеют в своем составе один сводовый ГЭ, и он не подвержен эффекту дополнительного нагрева от соседних электродов. Также в ДППТ постоянный ток слабее нагревает торец ГЭ – катода, в то время как ГЭ в ДСП являются попеременно то анодом, то катодом, что способствует их большему нагреву и расходу графита. Также зафиксировано, что с уменьшением вместимости печи, расход ГЭ на тонну годного увеличивается вне зависимости от наличия охлаждения.

Помимо этого, эффективность применения ИО напрямую зависит от времени работы печей на одну плавку. В печах вместимостью от 0,5–25 т технологический процесс выплавки сталей предусматривает обязательную операцию восста-

новления химических элементов, модифицирование металла в печи, тогда как в «большой» металлургии эти процессы проходят вне плавильного агрегата, что сокращает время плавки, в некоторых случаях, в 4–5 раз.

Необходимо отметить, что эффективность снижения расхода ГЭ с применением принудительного охлаждения во многом зависит от конструкции каждой отдельной печи, окислительных свойств атмосферы печи, температурных условий в ней и цехе, характером горения дуг, цен на «расходники» и др.

Основные выводы по работе

1. В результате математического и компьютерного моделирования установлено, что использование газового охлаждения через осевой канал ГЭ не эффективно, т. к. поступающий газ (Ar) с расходом до $130 \text{ м}^3/\text{ч}$ не позволяет отвести тепло от ГЭ и сократить их удельный расход. Средняя температура поверхности ГЭ снижается примерно на 2°C . Исследуемые охлаждающие газы разгоняются по длине ГЭ до скорости $25\text{--}30 \text{ м/с}$, что способствует повышению стабильности горения дуги и увеличивает эффективность работы трансформатора.

2. Использование системы ИО водой боковой поверхности ГЭ существенно снижает температуру в верхней половине ГЭ, тем самым экранирует его от окисления и уменьшает расход графита на $10\text{--}50\%$ в зависимости от типа дуговой печи, значения тока дуги, диаметра ГЭ и др. технических характеристик. Экономическая эффективность ИО определяется расходом подаваемой воды, количеством/стоимостью электроэнергии, затраченной на ее испарение, качеством/стоимостью ГЭ, а также временем включения ИО.

3. Экспериментально в условиях промышленного производства установлено:

- созданная ММ и программный продукт позволяют с практической точностью определять температурное поле ГЭ и эффективные параметры системы ИО для дуговых печей переменного и постоянного тока любой вместимости;

- расход ГЭ при расходе воды $0,15 \text{ м}^3/\text{ч}$ для ДППТ-6 ПАО «СИБЛИТМАШ» г. Новосибирск снизился на 15% и соответствует расчетному;

- расход ГЭ при расходе воды $0,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ для РТП-1 «АВИСМА» г. Березники снизился на 3% . Увеличение расхода воды до расчетного $1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ приведет к снижению расхода ГЭ на 25% .

4. На основе моделирования и промышленных экспериментов разработаны рекомендации для повышения технико-экономической эффективности работы системы ИО электродов в дуговых печах разной вместимости. Рациональный расход воды для печей малой вместимости должен составлять до $0,1\text{--}0,2 \text{ м}^3/\text{ч}$, для крупных печей до $1\text{--}1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$. Время включения с $1\text{--}10$ минут от начала подачи тока на электрод. Скорость вытекания воды из сопел или отверстий кольца ИО не должна превышать 1 м/с .

5. Принудительное охлаждение ГЭ водой позволяет снизить температуру его поверхности, уменьшить зону интенсивного окисления и, соответственно, расход. Применение ИО может быть рекомендовано для использования на промышленных предприятиях, имеющих в своем составе дуговые печи разной вместимости.

Основное содержание диссертационных исследований отражено в следующих работах:

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Ячиков, И.М. Технические решения по снижению угара графитированных электродов в дуговых печах литейного производства / И.М. Ячиков, И.В. Портнова, М.В. Быстров // *Металлургия машиностроения*. – 2020. – №1. – С. 5-9.
2. Ячиков, И.М. Эффективность использования испарительного охлаждения для снижения расхода графитированных электродов в дуговых печах малой емкости / И.М. Ячиков, И.В. Портнова, М.В. Быстров, А.А. Утемисова // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. – 2022. – Т. 22. – №1. – С.67-77.
3. Быстров, М.В. Практические рекомендации по конструкции системы испарительного охлаждения графитированных электродов дуговых печей / М.В. Быстров // *Теория и технология металлургического производства*. – 2024. – №2 (49). – С. 16-26.
4. Быстров, М. В. Опыт использования испарительного охлаждения графитированных электродов для снижения их расхода в рудно-термических печах / М. В. Быстров, И. М. Ячиков, С. А. Власов // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. – 2024. – Т. 80, № 4. – С. 60-70. – DOI 10.32339/0135-5910-2024-4-60-70.

Статьи в изданиях, входящих в Scopus:

5. Yachikov, I.M. Efficiency of Application of Evaporative Cooling of Graphite Electrodes to Reduce their Consumption in Arc Furnaces / I.M. Yachikov, I.V. Portnova, M.V. Bystrov // *Materials Science Forum*. – 2019. – Vol. 946. – P. 444-449. – <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.444>.
6. Bystrov, M.V. Modelling of the thermal state and the melting loss of a graphite electrode in the conditions of the evaporative cooling in the arc furnace / M.V. Bystrov, I.M. Yachikov, I.V. Portnova // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 966. – P. 1-6. – <http://doi:10.1088/1757-899X/966/1/012019>.

Статьи в прочих изданиях:

7. Ячиков, И. М. Анализ эффективности использования принудительного охлаждения графитированных электродов для снижения их расхода в электродуговых печах / И.М. Ячиков, И.В. Портнова, М.В. Быстров // *Современные достижения университетских научных школ : Сб. докл. национальной науч. школы-конференции, Магнитогорск, 27-28 декабря 2016 года. Том Выпуск 1. – Магнитогорск: Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2016. – С. 59-66.*
8. Ячиков, И.М. Использование испарительного охлаждения графитированных электродов для снижения их расхода в дуговых печах малой емкости / И.М. Ячиков, И.В. Портнова, М.В. Быстров // *Современные проблемы электрометаллургии стали: материалы XIII Междунар. конф.: в 2 ч. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017. – Ч. 2. – С. 191-198.*
9. Ячиков, И.М. Моделирование теплового состояния графитированного электрода при подаче газа в осевой канал / И.М. Ячиков, И.В. Портнова, М.В. Быстров // *Труды XV конгресса сталеплавателей*. – М.: ООО «РПК ПринтАП», 2018. – С. 180-186.
10. Ячиков, И.М. Моделирование теплового состояния графитированных электродов при испарительном охлаждении / И.М. Ячиков, И.В. Портнова, М.В. Быстров // *Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности: сб. докл. II Междунар. науч.-практ. конференции. – Екатеринбург: УрФУ, 2018. – С. 203-208 с.*

11. Ячиков, И.М. Компьютерное моделирование эффективности снижения расхода графитированного электрода за счет мероприятий по его охлаждению / И.М. Ячиков, М.В. Быстров, И.В. Портнова // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тез. докл. 77-й Междунар. науч.-техн. конф. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. – Т.1. – С. 347.

12. Ячиков, И.М. Компьютерное моделирование угара графитированного электрода при его испарительном охлаждении в дуговых печах / И.М. Ячиков, М.В. Быстров, И.В. Портнова // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сб. докл. VIII Всероссийск. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. – Екатеринбург: УрФУ, 2019. – С.192-196.

13. Ячиков, И.М. Анализ эффективности использования принудительного охлаждения графитированных электродов для снижения их расхода в электродуговых печах / И.М. Ячиков, И.В. Портнова, М.В. Быстров // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2019. – Т. 7. – № 1. – С. 24-29. – DOI:10.18503/2306-2053-2019-7-1-24-29.

14. Ячиков, И.М. Влияние расхода воды на испарительное охлаждение графитированных электродов для дуговых печей малой вместимости / И.М. Ячиков, И.В. Портнова, М.М. Гладышева, М.В. Быстров // Технологии металлургии, машиностроения и материалообработки. – 2020. – № 19. – С. 69-76.

15. Ячиков, И.М. Анализ эффективности испарительного охлаждения графитированных электродов с использованием компьютерного моделирования / И.М. Ячиков, И.В. Портнова, М.В. Быстров, А.К. Масалов // Наука XXI века: технологии, управление, безопасность. Сб. докл. II национальной науч. конф. – Курган: ФГБОУ ВО «КГУ», 2022. – С. 333-340.

Свидетельства о гос. регистрации программ:

16. Свидетельство РФ о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2017617959. Моделирование теплового состояния электрода ДСП / И.М. Ячиков, И.В. Портнова, М.В. Быстров. – Заявка № 2017614784 от 22 мая 2017; опубл. 18 июля 2017 г.

17. Свидетельство РФ о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2019614348. Тепловое состояния электрода при подаче охладителя в осевой канал / И.М. Ячиков, М.В. Быстров, И.В. Портнова. – Заявка № 20196113134 от 27 марта 2019; опубл. 02 апреля 2019г.

Быстров Михаил Викторович

СНИЖЕНИЕ РАСХОДА ГРАФИТИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОДОВ В ДУГОВЫХ ПЕЧАХ ЗА СЧЕТ ИХ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Специальность 2.6.2. Металлургия черных, цветных и редких металлов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Копировальный центр «Европринт»

Подписано в печать 24.01.2025. Формат 60x84 1/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. 1. Тираж 100 экз. Заказ 19361.

Отпечатано в типографии «Европринт».
620041, г. Екатеринбург, ул. Советская, 25.