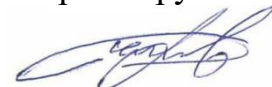


Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Ячиков Игорь Михайлович

Челябинск – 2024

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ТЕПЛОВАЯ РАБОТА ГРАФИТИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОДОВ В ДУГОВЫХ ПЕЧАХ ДЛЯ ВЫПЛАВКИ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ ...	11
1.1. Графитированные электроды, технология изготовления и промышленного использования.....	11
1.2. Анализ возможных и существующих способов уменьшения расхода электродов.....	16
1.3. Окисление и сублимация графита в атмосфере дуговой печи.....	23
1.4. Обзор теоретических и экспериментальных исследований теплового состояния графитированного электрода.....	26
1.5. Существующие конструкции и эффективность использования системы испарительного охлаждения графитированных электродов в дуговых печах ...	41
1.6. Цель работы и основные задачи.....	48
ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛОГО ГРАФИТИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОДА ДУГОВОЙ ПЕЧИ И АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА ДИНАМИКУ УГАРА ГРАФИТА	51
2.1. Выбор объекта моделирования и принятые в математической модели допущения.....	51
2.2. Математическая модель теплового состояния полого графитированного электрода при подаче инертного газа в осевой канал	53
2.3. Исходные данные для моделирования	56
2.4. Результаты компьютерного моделирования теплового состояния ГЭ с осевым каналом	59
2.5. Выводы по второй главе	63
ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ И ДИНАМИКИ УГАРА ГРАФИТИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОДА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИСТЕМЫ ИСПАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ.....	64
3.1. Объект моделирования и принятые допущения	64
3.2. Математическая модель теплового состояния графитированного электрода дуговой печи с учетом испарительного водяного охлаждения	66

3.3. Моделирование теплового состояния графитированного электрода дуговых печей разной вместимости и анализ полученных результатов.....	72
3.4. Выводы по третьей главе	88
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ГРАФИТИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОДОВ.....	90
4.1. Экспериментальные исследования на предприятии.....	90
«АВИСМА» г. Березники	90
4.2. Экспериментальные исследования на предприятии	102
ПАО «СИБЛИТМАШ» г. Новосибирск	102
4.3. Практические рекомендации по повышению эффективности охлаждения графитированных электродов для дуговых печей	111
4.4. Выводы по четвертой главе	113
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ.....	114
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	117
ПРИЛОЖЕНИЕ А (Обязательное) Акты внедрения результатов диссертационного исследования.....	135
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (Обязательное) Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.....	138

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Несмотря на широкое развитие и рост производства композиционных материалов, черная металлургия остается базовой отраслью промышленности и играет существенную роль в формировании макроэкономических показателей. Предприятия черной металлургии производят порядка 95% потребляемых конструкционных материалов, без которых не возможен технический прогресс в таких отраслях промышленности как машиностроение, химия, строительство, авиация, атомная энергетика.

Согласно данным ассоциации World steel [1], в 2022 году в мире произведено 1875,5 млн т, что на 4,2% превысило показатель прошлого года. При этом производство стали снизилось во всех регионах мира за исключением Китая. В России производство стали упало на 7,2 %. На это, в первую очередь, повлиял мировой геополитический кризис 2022 года, и связанные с ним ограничения в поставках металлопродукции на внешние рынки. По данным Министерства промышленности и торговли РФ многие заводы вынуждены работать на 60–70% от ранее производимых объемов [2].

Электрометаллургия является наиболее современной и эффективной технологией для выплавки цветных и черных металлов. 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 служат для передачи электрического тока к шихте 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 достигает 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

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

Объектом исследования является работа графитированных электродов в ДСП и ДППТ, **предметом** – исследование удельного расхода ГЭ за счет их прину-

длительного охлаждения при работе дуговой печи.

Анализом причин расхода ГЭ и возможных способов его снижения, а также применением полых ГЭ занимались и занимаются многие ученые ведущих российских и зарубежных научных школ: 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 минуту 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 $1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ 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. Проведен анализ распределения 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 плавок 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 национальная 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.

ГЛАВА 1. ТЕПЛОВАЯ РАБОТА ГРАФИТИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОДОВ В ДУГОВЫХ ПЕЧАХ ДЛЯ ВЫПЛАВКИ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

В настоящей главе приведены сведения о ГЭ, применяемых для выплавки черных, цветных металлов и сплавов в дуговых печах. Рассмотрены технология изготовления ГЭ, влияние температуры на окисления графита, проанализированы способы снижения расхода ГЭ.

1.1. Графитированные электроды, технология изготовления и промышленного использования

Электроды являются неотъемлемой частью электродугового процесса плавки металлов. Они предназначены для подачи электрического тока в рабочее пространство дуговой печи, где он создает электрическую дугу, которая в свою очередь формирует дуговой разряд, а также обеспечивает направленный теплообмен. Электроды разделяют на две основные группы [3, 4]:

1. металлические (расходуемые и не расходуемые);
2. неметаллические (расходуемые).

Расходуемые металлические электроды используют при вакуумно-дуговой плавке металлов (ВДП), электронно-лучевом переплаве (ЭЛП), плазменно-дуговом переплаве (ПДП). В этих процессах металл электродов сохраняет в основном свой состав и только рафинируется. Такие не расходуемые водоохлаждаемые электроды применяются в некоторых ВДП.

Неметаллические расходуемые электроды разделяют на графитированные и угольные. Они имеют разные свойства (таблица 1.1), которые зависят от технологии изготовления. Такие электроды используют в дуговых печах трехфазного тока (ДСП), печах для производства ферросплавов, дуговых печах постоянного тока (ДППТ) и в электродуговых печах косвенного действия. В настоящее время на ДСП применяют ГЭ круглого сечения. Их диаметр определяется допустимой плотностью тока [3, 4]. Качество ГЭ и способ подвода к ним электрического тока в значительной степени влияют на потери

электроэнергии при плавке, составляющие порядка 10% всей печной мощности, производительность дуговой печи, а также на себестоимость и качество выплавляемого металла.

Естественный графит имеет нестабильные механические и электрические свойства для производства ГЭ, поэтому их изготавливают только из искусственного электрографита, получаемого из каменноугольного, пекового и нефтяного кокса (87%), боя электродных огарков (13%). В качестве связующего вещества используют каменноугольный электродный пек (23–28%). Для производства ГЭ высшей марки используют игольчатый кокс. Это дорогостоящий высокоструктурированный углеродный продукт с высокой плотностью, электропроводностью и низким температурным коэффициентом расширения. Для выплавки сталей используют ГЭ с физико-механическими и электротехническими свойствами, превосходящими свойства электродов других типов [5, 6].

Учитывая тяжелые условия работы электродов в процессе плавки, к ним предъявляются следующие высокие требования [7]:

1. повышенная температура начала интенсивного окисления на воздухе;
2. высокая термическая стойкость, позволяющая снизить растрескивание и скалывание электродов при колебаниях температуры;
3. низкое удельное электросопротивление (для уменьшения электрических потерь);
4. стойкость против окисления в рабочем пространстве печи;
5. высокие механические свойства (прочность на изгиб, растяжение, сжатие);
6. низкое содержание серы, золы;
7. доступная цена электродов, так как доля затрат на них часто выше расходов на электроэнергию.

Требования к ГЭ устанавливаются следующими стандартами: ГОСТ Р 56973-2016 «Графитированные электроды для электродуговых печей. Эксплуатация»; ГОСТ Р МЭК 60239-2014 «Графитированные электроды для электродуговых печей. Размеры и обозначения»; ТУ 1911-109-052-2010

«Электроды графитированные и ниппели к ним»; ТУ 48-12-52-88 «Электроды графитированные диаметром 75-400 мм и ниппели к ним» ГОСТ 57613-2017 «Электроды графитированные и ниппели к ним».

Для сравнения графитированных и угольных электродов в Таблицу 1.1 [8] сведены основные их технические характеристики.

Таблица 1.1 – Основные свойства угольных и ГЭ [8]

Характеристика	Угольные электроды	ГЭ
Средний расход на 1000 кВт·ч в ДСП, кг	16–20	7–10*
Плотность, г/см ³	1,9–2,0	2,2
Электрическое удельное сопротивление, 10 ⁻⁴ Ом·м	40–70	8–13
Начало окисления на воздухе, °С	430	600
Объемная масса, кг/дм ³	1,55–1,6	1,55–1,6
Предел прочности на сжатие, Н/см ²	1500–3000	2100–2800
Коэффициент теплопроводности, Вт/м ² ·°С: при 20°С	~35	~150
при 1000°С	~58	~115
Предел прочности на растяжение, Н/см ²	300–760	500–850

* – для классической технологии выплавки сталей и сплавов, используемой, в основном, на печах вместимостью до 25 т.

Стоимость ГЭ превосходит стоимость угольных, но как видно из Таблицы 1.1, расход ГЭ на дуговых трехфазных печах в 2,0–2,5 раза меньше в сравнении с угольными. Это в значительной степени компенсирует их высокую стоимость.

Основным преимуществом ГЭ относительно угольных считается их меньшее удельное электрическое сопротивление, что позволяет использовать ГЭ с меньшим диаметром. Это способствует облегчению конструкции стоек, кареток и электрододержателей, а также уменьшает электрические потери в них. ГЭ значительно удобнее угольных в эксплуатации, т. к. их прочность выше, окисление от температуры меньше. Также для сокращения переходного сопротивления им не требуется применение специальных паст для смазки стыков при сращивании. Помимо этого, применение ГЭ снижает науглероживание стали. Угольные электроды используют только на незначительном проценте малых печей для фасонного литья и производства неотвечественных сталей [8, 9].

На физико-механические свойства ГЭ влияют их морфология микропористости, а также микро и кристаллическая структура. В соответствии с ГОСТ 57613-2017 физические свойства ГЭ ухудшаются с увеличением их диаметра. Обусловлено это технологией их изготовления. Теплопроводность и электрическая проводимость (Рисунки 1.1, 1.2) [7, 8] ГЭ значительно корректируются с изменением температуры. Удельное электрическое сопротивление имеет отрицательное значение при температуре до 780–830 К, однако при температурах, превышающих 830 К, положительное. Таким образом, ρ в этом температурном интервале составляет до 75% от ρ (293 К). Плотность от 1550 до 1600 кг/м³, средняя удельная теплоемкость – 1,6 кДж/(кг·К) [7].

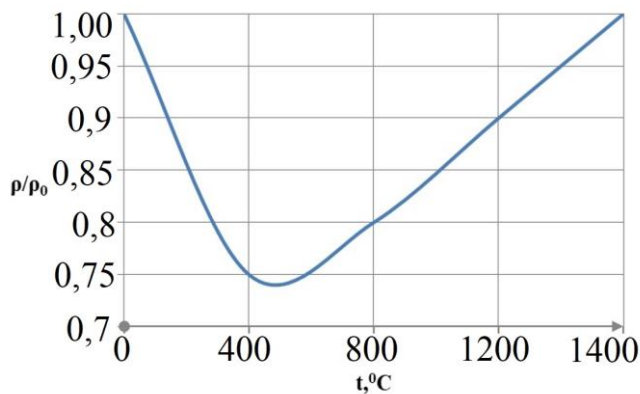


Рисунок 1.1 – Зависимость относительного удельного электросопротивления ГЭ от температуры [7, 8]

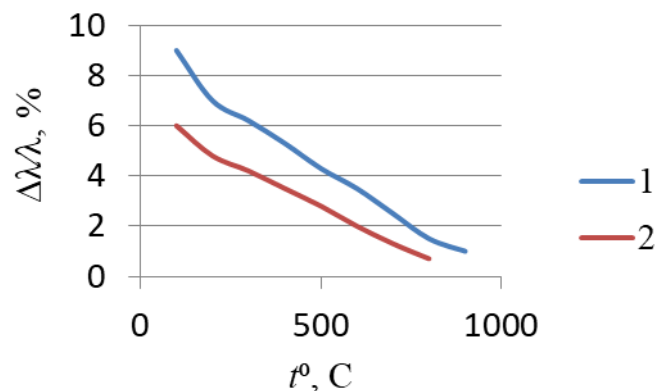


Рисунок 1.2 – Зависимость удельного коэффициента теплопроводности ГЭ от температуры:

- 1 – в продольном направлении;
- 2 – в поперечном направлении [7, 8]

В работах [10–16] подробно описан зарубежный и отечественный опыт производства ГЭ. На Рисунке 1.3 схематично представлена последовательность технологических операций процесса изготовления ГЭ [17].

Электроды подвергаются графитизации в печах сопротивления прямого действия [18–20]. Электрический ток в них (60–120 кА) обеспечивает обжиг при температуре 2700–2900 К и проходит через графитирующиеся электроды и электропроводную углеродистую засыпку [13, 18, 19]. Продолжительность этой операции более 100 ч. За этот период происходит формирование ориентированной

укрупненной кристаллической структуры графита, восстановление и улетучивание примесей, что в несколько раз снижает удельное электросопротивление, повышаются термические и механические свойства, снижается окисляемость, снижается твердость (т. е. улучшается обрабатываемость) готовых ГЭ. Высокая стоимость ГЭ обусловлена технологией их изготовления и невозможна без энергоемкого процесса графитизации (до 7–8 МВт/ч). Это определяет необходимость применения процессов, обеспечивающих снижение расхода ГЭ в дуговых печах [4, 14, 21, 22].



Рисунок 1.3 – Технологическая схема производства ГЭ [17]

ГЭ являются расходуемым материалом при выплавке металлопродукции в дуговых печах. Их расход в структуре себестоимости выплавки стали составляет порядка 14% [23]. Это значение может изменяться в зависимости от технических характеристик дуговых печей и качества изготовления ГЭ.

Обзор мировых цен на графитированные электроды [24, 25] показывает, что цены резко выросли в 2017 году. Средняя экспортная цена российских ГЭ в ноябре была выше аналогичного показателя начала года в 6 раз и доходила до \$25 тыс./т (Рисунок 1.4) [26]. При этом даже по таким ценам ГЭ покупали, поскольку

дефицит ощутило большинство сталеплавильных компаний в мире. Это привело к повышению цен на металлопродукцию.

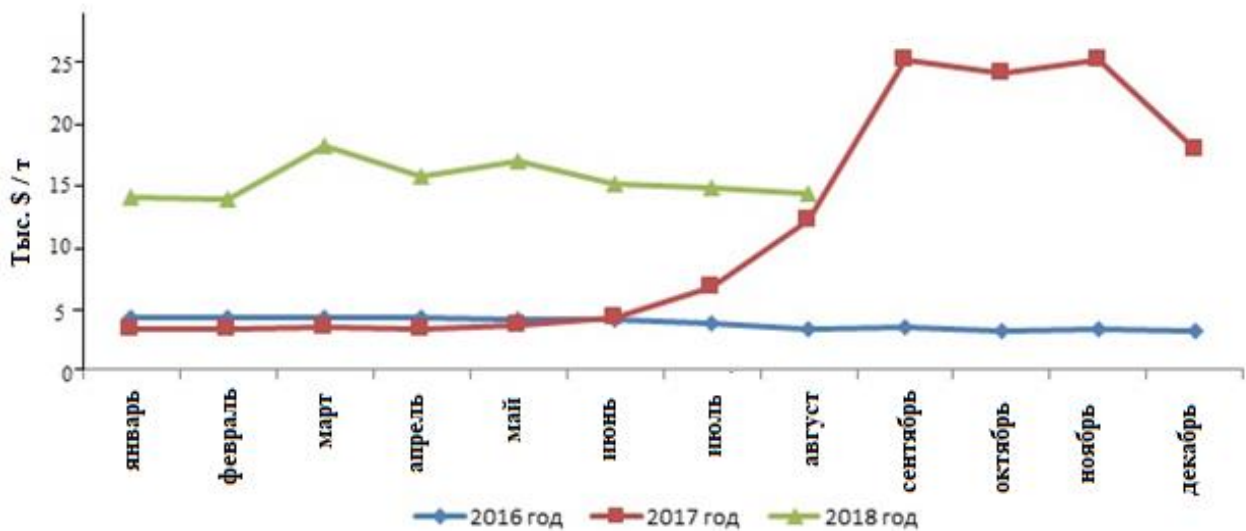


Рисунок 1.4 – Обзор мировых цен на ГЭ [31]

В сложившихся экономических условиях качество и расход ГЭ являются определяющими факторами. Поэтому мероприятия, связанные со снижением расхода ГЭ, имеют значительное влияние на технико-экономические показатели производства металлопродукции в дуговых печах.

1.2. Анализ возможных и существующих способов уменьшения расхода электродов

Вопрос сокращения расхода ГЭ беспокоит металлургов уже не первое десятилетие. Анализом причин и возможных способов снижения расхода ГЭ занимались и занимаются многие ученые.

Одним из первых в мире, кто изучал проблему, был W.E. Schwabe, работа которого в 1971 году описывает механику расхода ГЭ. На базе его исследований выявлены основные причины расхода ГЭ, которые не изменились и сегодня. Механизмы расхода ГЭ представлены на Рисунке 1.5 и делятся на две основные категории: [27]

- непрерывный расход – 95%;
- дискретный расход – 5%.

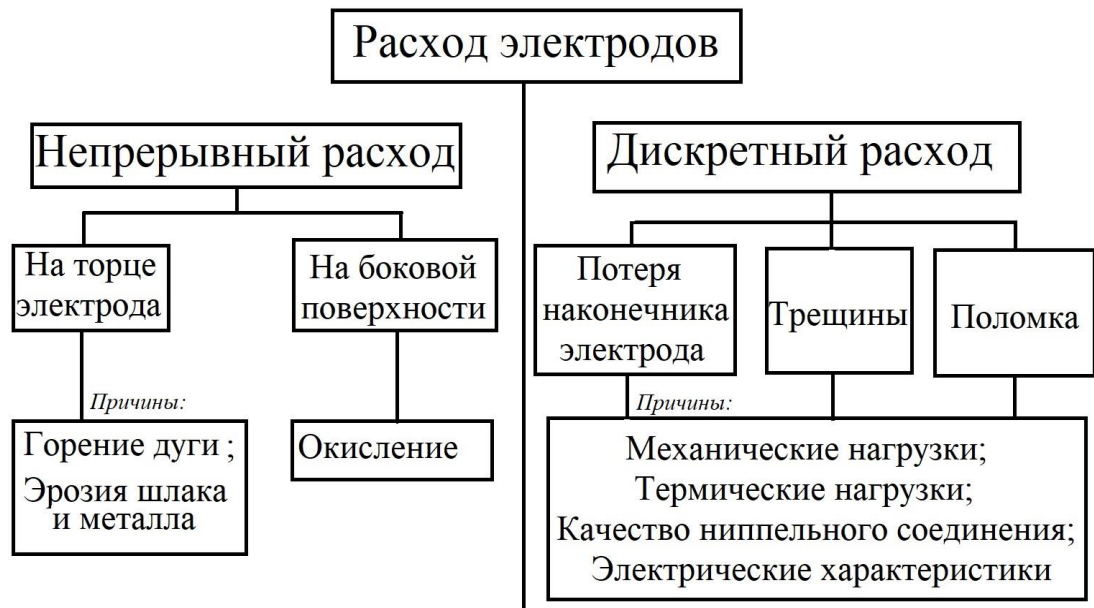


Рисунок 1.5 – Виды потребления ГЭ [27]

При работе дуговых печей для выплавки стали трехфазного и постоянного тока (ДСП, ДППТ) реальное потребление ГЭ зависит от многих организационных и технологических параметров [28–29]. До 70% расхода составляет период расплавления твердой шихты и время перерыва между плавками. Общий расход ГЭ состоит из отдельных статей, приведенных в Таблице 1.2 [30]. Видно, что наиболее затратными частями потребления ГЭ являются окисление их боковой поверхности под воздействием температуры, термомеханический износ и разрушение, а также эмиссия графита под влиянием электрического поля.

Таблица 1.2 – Баланс расхода ГЭ в дуговых печах [30]

№ п/п	Статьи расхода электродов	кг/т	%
1	Полный расход электрода	4,500	100,0
2	Действие изгибающих и ударных нагрузок	0,145	3,2
3	Разрушение графита ванной металла	0,135	3,0
4	Поломка от изгибающих нагрузок	0,190	4,3
5	Окисление торцов	0,300	6,7
6	Эмиссия под влиянием электрического поля	0,450	10,0
7	Термомеханическое разрушение и износ	1,580	35,0
8	Окисление боковой поверхности	1,700	37,8

Известны следующие пути снижения расхода ГЭ:

1. перевод дуговых печей с переменного на постоянный ток [31];
2. ведение плавки на пониженных токах при номинальной мощности [32];

3. использование ГЭ надлежащего качества [33];
4. обеспечение герметичности печи (особенно в местах ввода электродов через свод, чтобы избежать взаимодействия с воздухом) [34];
5. модернизация системы регулятора мощности и ограничение скорости перемещения электрода [35];
6. применение альтернативных источников энергии при плавке [142, 143];
7. нанесение покрытий на поверхность ГЭ [36];
8. применение водоохлаждаемых электродов [37];
9. применение полых ГЭ [38].

Перевод печей с переменного на постоянный ток [39–45] в некоторых случаях позволяет снизить расход ГЭ в 4 раза. Этот показатель зависит от многих факторов, и для печей трехфазного тока его значение варьируется от 1 до 5 кг/т, то время как печи постоянного тока имеют значение удельного расхода ГЭ, находящееся в диапазоне от 1 до 3 кг/т [7]. Это достигается в большей части за счет того, что количество ГЭ в ДППТ меньше. В большинстве случаев это один вертикально расположенный сводовый ГЭ.

Понятно, что расход ГЭ связан с электрическими характеристиками работы дуговых печей [46–51], регулируя которые можно значительно сократить себестоимость выплавки тонны стали (Рисунки 1.6, 1.7).

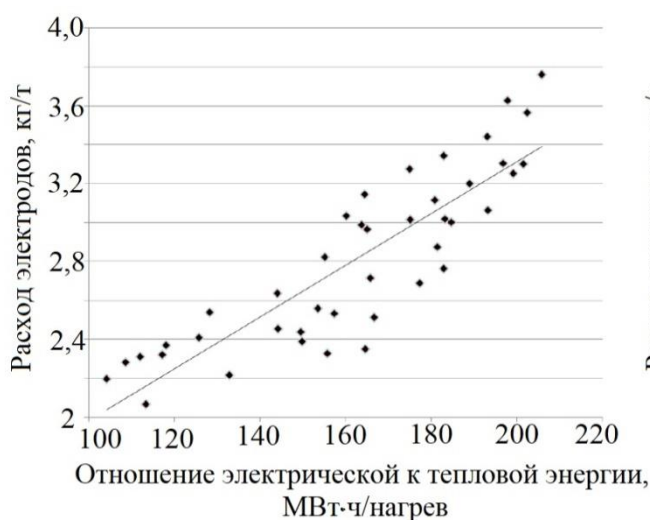


Рисунок 1.6 – Зависимость расхода ГЭ от потребления электроэнергии [48]

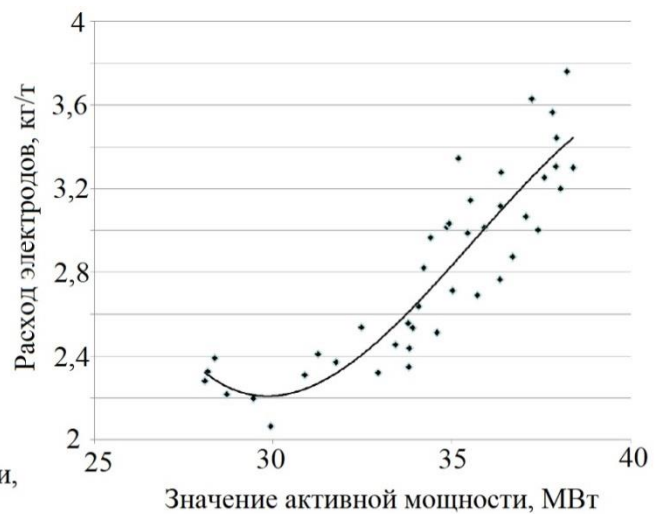


Рисунок 1.7 – Зависимость расхода электрода от мощности [48]

При уменьшении длины дуги увеличиваются значения токов, что приводит к существенному повышению расхода ГЭ на торцевой части. Также в зоне горения дуги процесс сублимации графита усиливается, т. к. растет время контакта ГЭ со шлаком. Работая на длинных дугах, возможно сократить расход ГЭ на 1,0–1,5 кг/т. Применение ДСП высокой мощности с охлаждением в футеровке позволяет достаточно эффективно вести плавку с поддержанием длинной дуги без обрывов в течение всего времени работы печи.

Необходимо отметить, что правильно подобранный диаметр ГЭ влияет на их расход. ГЭ с неподходящим для данного токового режима диаметром будет расходоваться быстрее. Поэтому, выбирая поперечное сечение ГЭ, следует учитывать предельно допустимую удельную плотность тока, которая в зависимости от качества ГЭ составляет от 10 до 35 А/см². Определение рационального диаметра ГЭ [52] выбирается на основе технико-экономического анализа условий работы электрода в ДСП, ДППТ [7, 48, 53–56].

Нельзя не учитывать влияние качества изготовления ГЭ на увеличение их срока службы. Получение высоких значений по удельному электросопротивлению, а также механической прочности способствует сокращению расхода ГЭ от поломок. Сочетание этих свойств для высокоплотных ГЭ позволяет сократить их расход на тонну в среднем на 20–35% при выплавке сталей [57–60].

Потери от поломки ГЭ [61–64] определяются условием хранения и эксплуатацией ГЭ, а также качеством лома и составляют от 5 до 10% от общих. При наличии изгибающих моментов поломка происходит прежде всего в месте соединения ниппеля и ГЭ. При наращивании/свинчивании ГЭ нужно излишнее перенапряжение в ниппельном соединении. Наиболее эффективным считается применение роботы для соединения ГЭ и определение допустимой скорости перемещения ГЭ, исключающей его соприкосновение с ломом. Также из работы [65] следует, что нельзя не учитывать влияние климатического фактора на расход ГЭ в реальных природных условиях. Его необходимо учитывать при планировании работы предприятия: корректировать производственные графики, менять удельные нормы расхода сырья и материалов.

Конструкция современных дуговых печей зарубежного производства вместимостью 80-200 т зачастую предусматривает возможность использования альтернативных источников энергии, таких как газокислородные горелки [66, 67]. Они позволяют интенсифицировать плавку за счет ввода в рабочее пространство печи дополнительной тепловой энергии путем сжигания кислорода. Их используют в основном при выключенном токе на протяжении части периода расплавления. Это приводит к значительному улучшению технико-экономических показателей ДСП. В этом случае горелка компенсирует до 60% теплоты. Расход электроэнергии сокращается на 30-35%. Это решает ряд технологических задач, таких как повышение производительности, сокращение продолжительности плавки, что снижает расход ГЭ на тонну выплавленного металла.

Потребление ГЭ от окисления зависит в первую очередь от температуры. С ее ростом, растет и окисление. Уменьшить на 15–20% расход ГЭ от окисления позволяет покрытие их поверхности различными защитными составами [68–77]. Основными минусами этой технологии является высокая стоимость используемых материалов, а также технологии их нанесения. Все это снижает экономическую эффективность применения этого способа.

В многочисленных публикациях [78–84] подробно изучен вопрос применения трубчатых ГЭ в дуговых печах как один из методов интенсификации плавки. Проанализировав данные, можно сказать, что применение трубчатых ГЭ приводит к повышению эффективности работы дуговых печей. Способствует снижению количества токовых толчков в период проплавления колодцев, более устойчивому горению дуги в печи, стабильности напряжения в сети и более эффективному использованию мощности дуги. Удельный расход электроэнергии уменьшается примерно на 3–5%, увеличивается стойкость футеровки. Сокращается время плавки за счет увеличения мощности дуги.

Отдельно стоит отметить работу ученых ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» Агапитова Е.Б., Бигеева В.А., Ерофеева М.М. и др. [85–87], которые в период 2005–2006 гг. провели экспериментальные исследования по использованию полых ГЭ на агрегате ковш-печь №1 кислородо-конвертерного цеха ПАО

«ММК». Это двухпозиционный агрегат внепечной обработки вместимостью 370 т. Агрегат с полыми электродами проработал 8 суток, при этом было обработано 311 плавок сталей различных марок, в том числе 106 плавок марки 08. В результате зафиксировано повышение КПД нагрева стали на 7% при подаче инертного газа через осевой канал. Средняя степень дусульфурации стали повысилась на 7% (с 25,2 до 32,2%), снизился расход извести. Удельный расход электроэнергии сократился на 1,5-6,6%. За время кампании агрегата ковш-печь с использованием полых электродов их угар уменьшился на 7,9 % (с 64,1 до 59,0 г/т обработанной стали).

Однако в работе [78] обозначается увеличенный удельный расход полых ГЭ в сравнении с цельными из-за окисления внутренней поверхности в результате контакта с атмосферой в рабочем пространстве печи. Авторами [83, 84] предложен способ введения через осевой канал инертных газов аргона и азота, что может снижать окисление канала электрода и приводить к стабилизации горения дуги. Но в литературе нет единого мнения по влиянию различных газов на тепловое состояние полых ГЭ в условиях их работы в дуговых печах.

В работах [88–96] представлены некоторые варианты снижения расхода ГЭ от окисления при его принудительном охлаждении водой. Снизить расход ГЭ позволяет применение комбинированных конструкций, которые состоят из графитированной рабочей и водоохлаждаемой частей (Рисунок 1.8) [95, 96]. Широкое распространение за границей получили комбинированные ГЭ фирмы «Stelco», (г. Эдмонтон, Канада).

Опыт завода, применяющего составные электроды «Stelco» (г. Эдмонтон, Канада), показал, что замена изношенных секций за счет быстроразъемных соединений может производиться быстро, как и наращивание обычных ГЭ на печи. Однако авторы [95] признают, что соединение вне печи более надежно и эффективно. Дополнительная экономия ГЭ в связи с высоким качеством сборки составляет 0,5 кг/т стали. Использование таких электродов для дуговых печей трехфазного и постоянного тока способствует снижению их окисления на боковой поверхности при возможности уменьшения диаметра. Тем не менее, конструкция

данного изобретения является сложной в изготовлении и дорогостоящей, поэтому не нашла широкого применения.

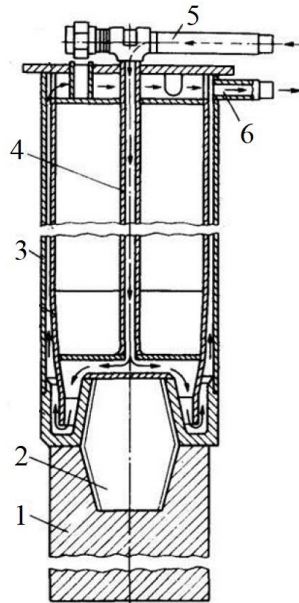


Рисунок 1.8 – Водоохлаждаемый комбинированный электрод [95, 96]

1 – ГЭ; 2 – ниппель; 3 – металлическая часть электрода; 4 – трубка подачи воды;
5 – подвод воды; 6 – отвод воды

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 [97, 98]. 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 (рисунок 1.9).

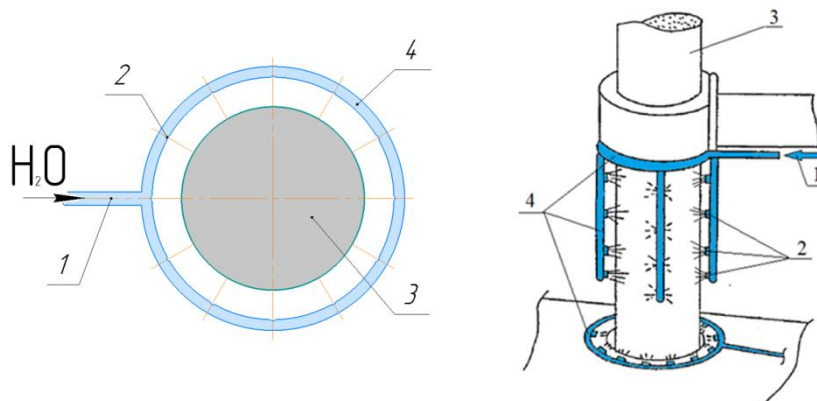


Рисунок 1.9 – Базовые схемы систем ИО ГЭ [98]

1 – подвод воды; 2 – форсунки (сопла); 3 – ГЭ; 4 – кольцо ИО

Кольцо ИО, в основном, крепится под электрододержателем вокруг каждого ГЭ. Давление и расход воды регулируются редуктором давления и специальными клапанами. К каждому кольцу подведены трубы и короткие шланги. Воздух в системе ИО применяют для продувки форсунок от накопившихся от воды солей по окончании работы дуговой печи.

В результате анализа возможных и существующих способов снижения расхода ГЭ сделаны следующие заключения. Потери от окисления боковой поверхности ГЭ достигают до 70% от общего расхода [99]. Приведены и проанализированы 8 способов сокращения расхода ГЭ. Все вышеперечисленные способы могут использоваться при производстве металлопродукции для сокращения материальных затрат. Наиболее эффективными с точки зрения временных и материальных затрат на подготовку производства являются применение трубчатых ГЭ и использование систем ИО.

1.3. Окисление и сублимация графита в атмосфере дуговой печи

Многочисленные факторы влияют на скорость окисления и сублимации графита:

1. величина тока, проходящего через ГЭ при искрении [100];
2. диаметр поперечного сечения пятна дуги на конце ГЭ;
3. длительность времени прохождения тока через ГЭ (время включения);
4. удельное сопротивление ГЭ;
5. стабильность дуги.

На Рисунке 1.10 приведена зависимость скорости окисления угольных и графитированных электродов на воздухе от температуры их поверхности.

В атмосфере печи значения окисления графита считают незначительным до температуры 400°C [7, 101]. Из работы Огорокова Н.В. [7] известно, что окисление возрастает с повышением температуры и увеличивается с ростом концентрации кислорода в атмосфере печи, в частности при некачественном уплотнении электродных отверстий в своде печи. В зависимости от качества уплотнения, рас-

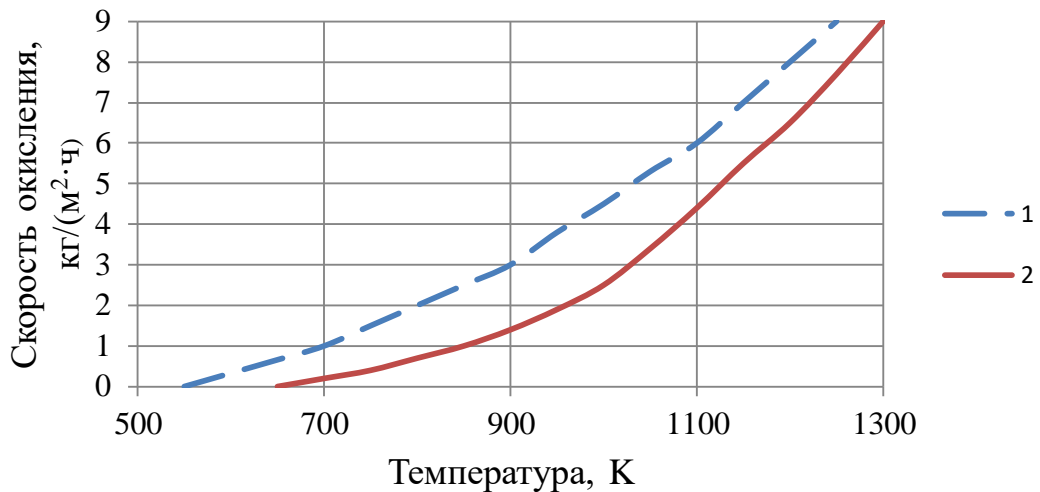


Рисунок 1.10 – Зависимость скорости окисления электродов на воздухе от температуры. 1 – угольный электрод; 2 – ГЭ [7]

ход электродов от окисления их поверхностей может значительно изменяться. Это приводит к изменению геометрической формы ГЭ. Нижняя его часть переходит от цилиндрической формы к конической, что в результате приводит к увеличению плотности тока и, как следствие, термическим напряжениям на этом участке, образованию трещин и т. д. Основные потери графита (сублимация) приходится на область привязки дуги, где температура достигает более 4000°C .

Работа [102] также подтверждает резкий рост потери массы графита при повышении температуры. На Рисунке 1.11 представлена зависимость скорости потери массы графита от температуры и продолжительности нагрева в спокойном воздухе.

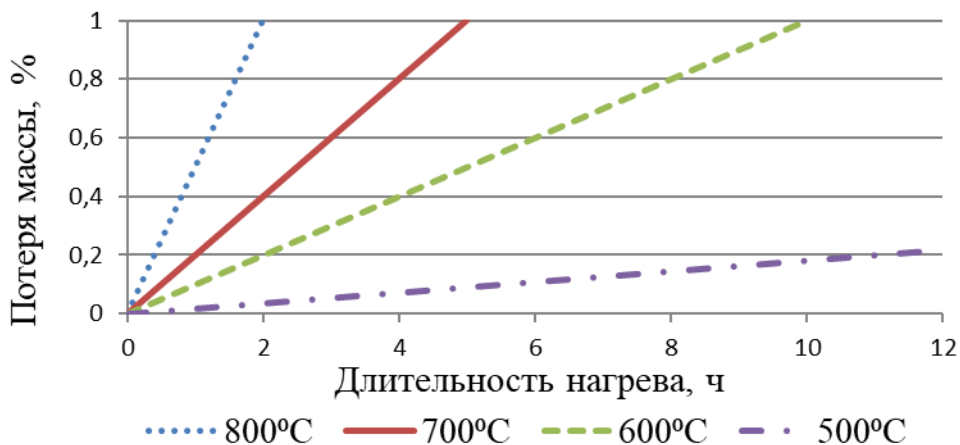


Рисунок 1.11 – Влияние температуры и продолжительности нагрева на скорость окисления графита [102]

В работе [27] описан эксперимент, в котором оценили влияние температуры ГЭ и скорости движения газов в атмосфере печи на окисление графита. Работы вели в аэродинамической трубе в контролируемых условиях при различных температурах и значениях скорости. Рисунок 1.12 представляет результаты серии испытаний, в которых использовался воздух, указывающие на то, что увеличение скорости воздуха и температура поверхности графита заметно увеличивают скорость окисления. По мнению авторов, температуры поверхности ГЭ ниже 600°C являются не критическими, поскольку заметного окисления не происходит. Скорости окисления, полученные в результате работы выше, чем в обычной практике, поскольку содержание кислорода в атмосфере печи значительно ниже, чем в аэродинамической трубе.

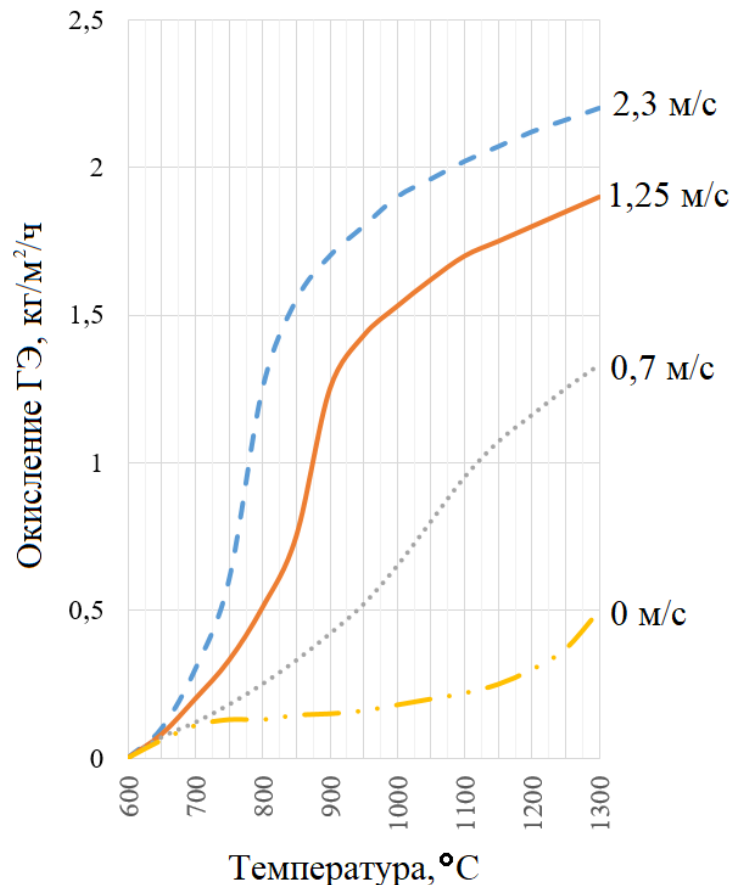


Рисунок 1.12 – Скорость окисления графита в зависимости от температуры при разной скорости воздуха в аэродинамической трубе [27]

Скорость окисления по периферии электродной колонны не равна во всех точках. Эффекты вытягивания через открытые дверцы, сальники и/или системы

регулирования дыма могут создавать структуры потока в атмосфере печи, повышая окисление в определенных областях на поверхности ГЭ. Это условие приводит к эксцентрической деформации электродных колонн. В некоторых печах участки поверхности, лежащие внутри электродного треугольника, окисляются несколько больше, чем остальная поверхность. Взаимное тепловое излучение от этих частей повышает температуру поверхности в этих секциях колонн и вызывает более высокие скорости окисления.

1.4. Обзор теоретических и экспериментальных исследований теплового состояния графитированного электрода

Как мы знаем из раздела 1.3 литературного обзора, к числу факторов, снижающих стойкость ГЭ и увеличивающих расход, относятся термические напряжения, связанные с неравномерным распределением температуры по длине и сечению ГЭ. Исследование тепловых характеристик ГЭ по длине в период плавки имеет решающее значение в вопросе поиска рациональных решений по снижению окисления их боковой поверхности и, как следствие, сокращения их расхода.

В работе [27] 1971 года широко рассмотрены различные типы потребления ГЭ (см. Рисунок 1.5), которые не потеряли актуальности и сегодня. Поскольку температура ГЭ напрямую зависит от токовых характеристик, автор изучил схему потока электрического тока в ГЭ. Распределение тока по поперечному сечению неравномерно из-за множества электромагнитных эффектов, а также из-за зависящего от температуры удельного сопротивления и теплопроводности в различных местах ГЭ. На Рисунке 1.13 показаны плотности тока, измеренные на поверхности ГЭ диаметром 610 мм вблизи свода дуговой печи. Наблюдается вытеснение тока к оси печи, что приводит к существенному повышению температуры ГЭ в этих областях. Термические напряжения, возникающие в результате этой ситуации, являются эксцентричными.

Далее, примерно на 250 мм выше конца дуги, ток начинает концентрироваться к горячей точке дуги, которая имеет диаметр приблизительно 6,35–30,48 мм (1/4–1/2 дюйма). Температура этой площади составляет 3600–4000°C, а остальная часть окружающего графитового тела – 2000–2300°C. Основная часть

линейного расхода (сублимации) ГЭ происходит в этой зоне. Кроме этого, размывание торца ГЭ металлом и шлаком также увеличивает угар графита.

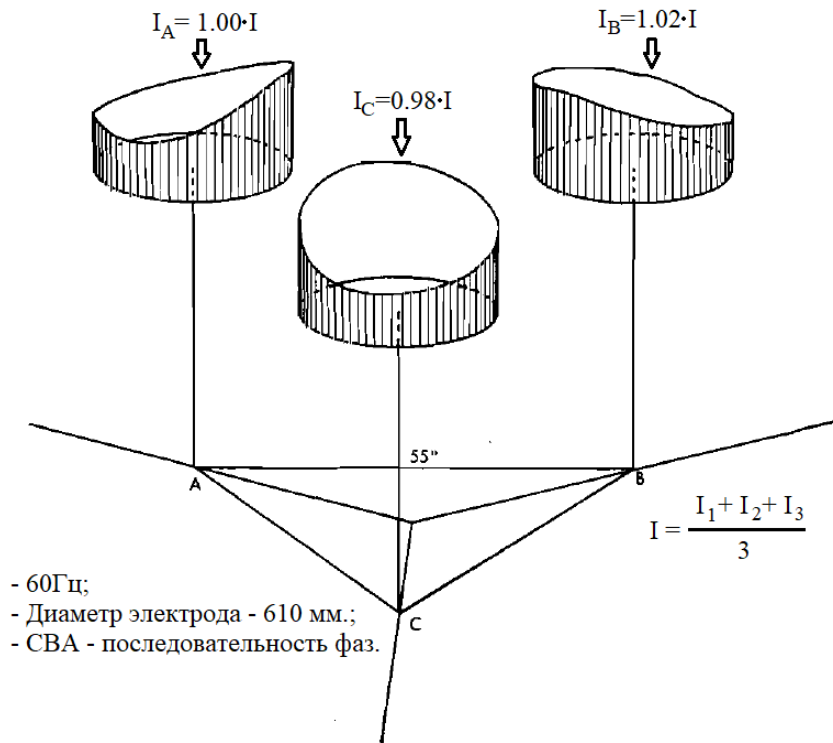


Рисунок 1.13 – Плотность тока, измеренная на поверхности электрода [27]

Работа [27] подтверждает, что скорость окисления ГЭ сильно зависит от распределения тока и температуры по их поверхности. Механика расхода ГЭ в электродуговой печи довольно сложна. Некоторые факторы хорошо изучены, вместе с тем другие требуют еще более углубленного изучения. Не рассмотрены такие способы снижения температуры боковой поверхности ГЭ, как нанесение покрытий, применение оросительного охлаждения и другое. Также не рассмотрено применение полых ГЭ и их влияние на снижение расхода.

Ученые R. Rafieil, A. Kermanpur and F. Ashrafizadeh в [103] провели компьютерное моделирование распределения температуры ГЭ в дуговых печах в период плавки, используя метод конечных элементов в 2D и 3D вариантах. Исследованы параметры электрического тока, проходящего через ГЭ, тепловое влияние футеровки печи, шлака, титанового защитного покрытия ГЭ и применения системы ИО боковой поверхности ГЭ. Для моделирования использовали трехмерную тепловую модель ГЭ.

Анализ 2D выполнялся с использованием четырехузлового элемента плоскости с одной степенью свободы (температуры) и осесимметричными свойствами. Трехмерный тепловой анализ проводили с использованием двадцати локальных узлов. Степенью свободы элемента была также температура. Возможность приложения несимметричных нагрузок (взаимодействие между ГЭ) на данном этапе обеспечивалась за счет рассмотрения трех ГЭ в дуговой печи и трехмерных граничных условий.

В дополнение к факторам окружающей среды, выяснили, что коэффициент теплопроводности, учитываемый для зоны распыления воды на ГЭ, также оказывает значительное влияние на распределение температуры внутри ГЭ. Были рассмотрены несколько значений коэффициентов теплопроводности. Результаты расчета сравнивались с экспериментальными данными. На Рисунке 1.14 приведен график, показывающий, что коэффициент теплопроводности $5000 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$ в зоне водяного охлаждения больше соответствует экспериментальным данным.

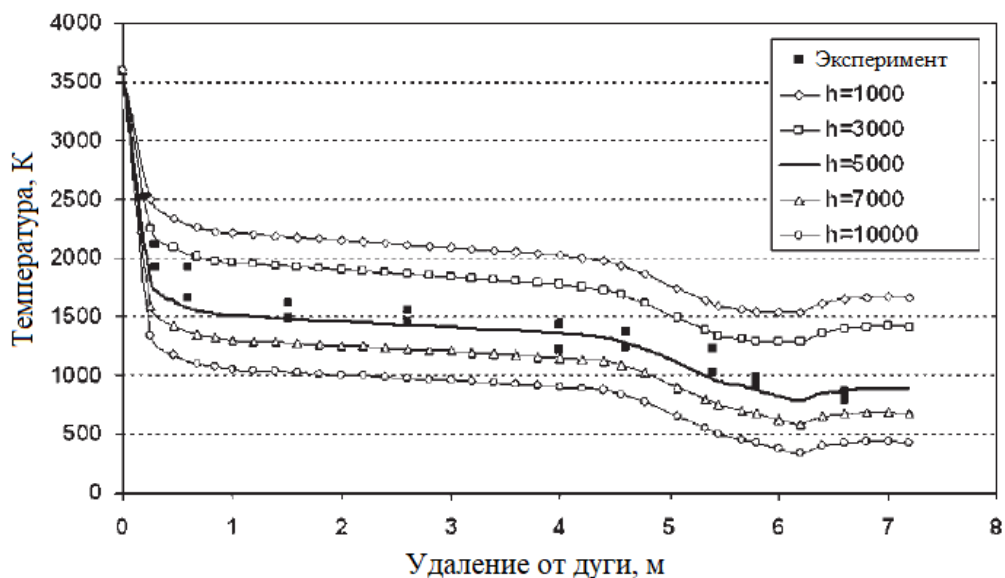


Рисунок 1.14 – Распределение температуры продольной поверхности ГЭ для различных коэффициентов теплопроводности в зоне ИО в 2D анализе по сравнению с экспериментом. h – коэффициент теплопроводности [103]

Также авторами работы [103] проводилась оценка влияния тонкого слоя покрытия на распределение температуры ГЭ в 2D. На Рисунке 1.15 приведен гра-

фик распределения температуры по поверхности и в центре покрытого ГЭ с непокрытым вместе с экспериментальными данными температуры поверхности.

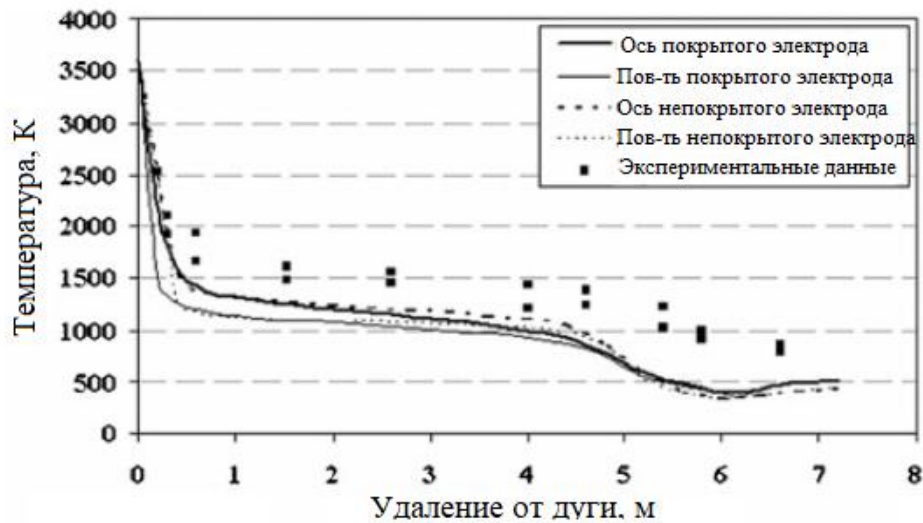


Рисунок 1.15 – Продольные распределения температуры в центре и на поверхности покрытого (TiN) электрода в сравнении с непокрытым и экспериментальными данными [103]

Как можно видеть, не происходит резкого изменения формы изотерм температуры при прохождении слоя покрытия к поверхности. Это обусловлено высокой теплопроводностью материала покрытия (TiN) и низкой толщиной покрытия относительно диаметра ГЭ. Это означает, что покрытие TiN можно использовать с точки зрения теплопроводности в системе. Аналогичную процедуру моделирования проводили с использованием тонкого слоя TiO_2 вместо TiN . Было обнаружено, что из-за очень высокого значения электрического сопротивления TiO_2 по сравнению с графитом к модели был применен огромный тепловой источник, так что сходимость была неудачной. Авторы [103] заключают, что материал покрытия должен иметь физические свойства, близкие к графиту.

Чтобы исследовать тепловое воздействие соседних ГЭ на распределение температуры каждого, авторами [103] было проведено несколько тепловых расчетов в 3D. Коэффициент теплопроводности в зоне распыления воды изменяли для корректировки расчетных результатов с помощью экспериментальных данных. На

Рисунке 1.16 продольное распределение температуры поверхности для этих расчетов сравнивается с экспериментальными данными.

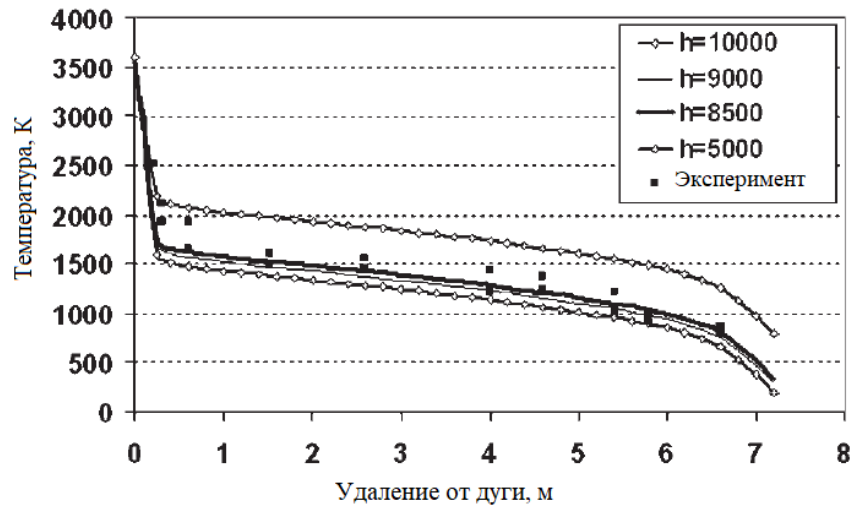


Рисунок 1.16 – Продольные распределения температуры наружной поверхности для различных коэффициентов теплопроводности в зоне ИО в 3D анализе по сравнению с экспериментом. h – коэффициент теплопроводности [103]

Как видно, распределение температуры можно разделить на две области: область градиента высокой температуры вблизи торца ГЭ и область градиента низкой температуры, где ГЭ обменивается своим теплом с атмосферой печи. Интересно, что коэффициент теплопроводности $5000 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$ в зоне распыления воды (уже полученный в 2D) не всегда коррелирует с экспериментальными данными для 3D состояния. Учитывая эффект близости, коэффициент теплопроводности около $8500 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$ в зоне распыления воды является наиболее близким к реальному. Это ясно показывает, что эффект близости соседних ГЭ следует учитывать для прогнозирования более точного температурного профиля.

На Рисунке 1.17 приведено продольное сечение одного из ГЭ и его температурный градиент. Неравномерное распределение температуры хорошо видно на внутренней и внешней сторонах ГЭ: изнутри горячее, чем снаружи на каждой высоте. В области высоты вблизи торца, внутренняя поверхность на $\sim 360^\circ\text{C}$ горячее, чем внешняя.

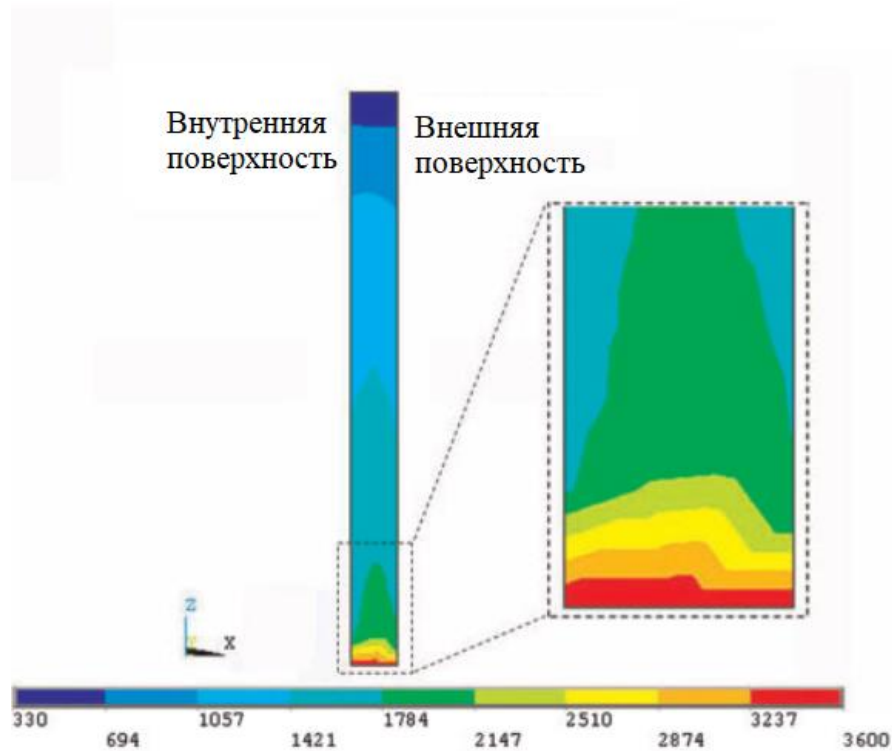


Рисунок 1.17 – Градиент температуры одного из ГЭ [103]

Результаты показывают, что 3D тепловая модель, разработанная в работе [103], способна достаточно точно прогнозировать распределение температуры в ГЭ дуговой печи во время работы. Она может определять температурный градиент при различных условиях процесса, тем самым предоставляя данные о сроке службы электрода. Она также может быть использована для оценки защитного эффекта различных покрытий, включая TiN , $TiAlSi$ интерметаллид, металлический алюминий и т. д.

Анализ данной статьи позволяет сделать вывод, что рассматриваемая в статье ММ может адекватно прогнозировать температуру поверхности ГЭ, но не учитывает технологические параметры системы ИО боковой поверхности ГЭ, такие как давление воды в системе и толщина стекающей водяной пленки, регулирование которых может в значительной мере повлиять на расход ГЭ. Также не рассмотрен расчет температурного поля на полых ГЭ.

В работе [104] авторами J. Borlée, M. Wauters, C. Mathy, M. Weber, M. Picco, J-C. Baumert, B. Kleimt, L. Di Sante, P. Frittella была разработана система наблюдения для контроля и снижения расхода ГЭ в ДППТ. На сталелитейных за-

водах ArcelorMittal Esch-Belval и Differdange были установлены системы на основе камер со встроенным блоком обработки изображений, позволяющие контролировать состояние ГЭ после каждой плавки. Для контроля износа ГЭ были разработаны специальное программное обеспечение для анализа изображений и система регистрации, которые включены в автоматическую систему для отслеживания механизма износа ГЭ.

В рамках опытных работ было проведено исследование влияния плотности тока на потребление ГЭ. Из Рисунка 1.18 четко прослеживается тенденция роста потребления ГЭ с увеличением плотности тока.

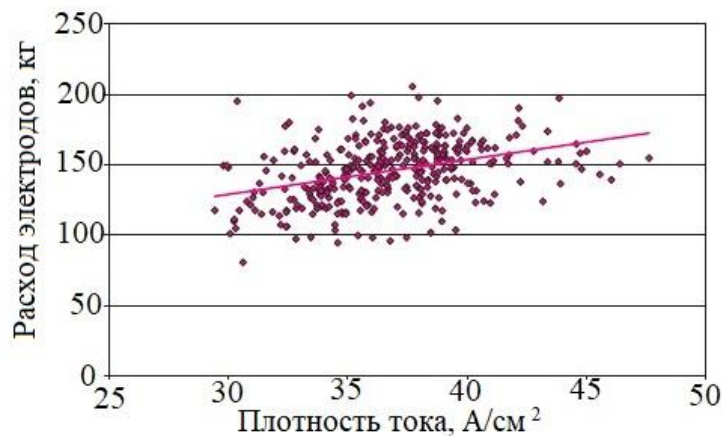


Рисунок 1.18 – Влияние плотности тока на непрерывный расход электродов [104]

Так же в [104] проанализированы распределение тока, температуры и растягивающих напряжений (тангенциальных напряжений) в ДСП и ДППТ. На Рисунке 1.19 схематически изображено распределение тока по ГЭ, распределение температуры и соответствующее распределение напряжения. В ДСП ток течет главным образом по поверхности ГЭ, генерируя тепло, которое может быть легко высвобождено. В ДППТ, поскольку поток тока является однородным, в электродной колонне создается сильный градиент температуры, что приводит к соответствующему напряженному состоянию: сердечник находится в состоянии сжатия, а поверхность находится в состоянии натяжения.

Наличие ниппелей вносит геометрическую неоднородность в электродную колонку, которая модифицирует ток и тепловые удары, следовательно, воздей-

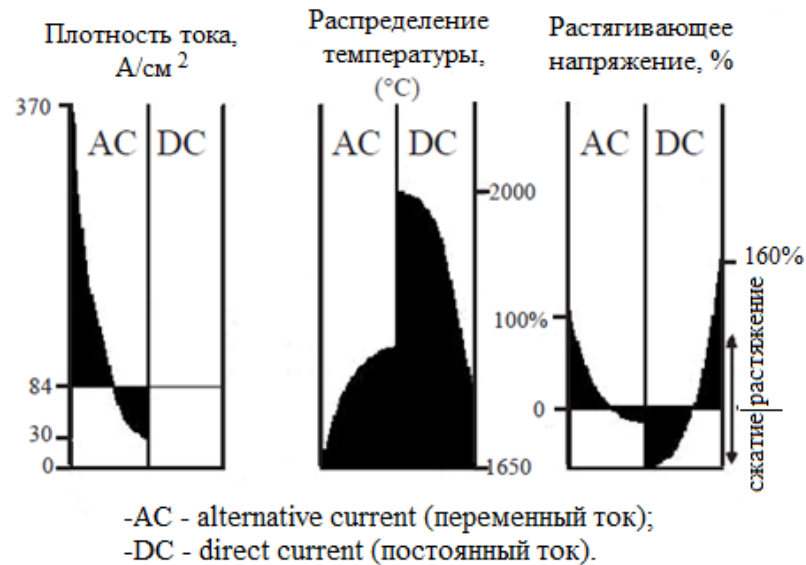


Рисунок 1.19 – Распределение тока, температуры и напряжения по электроду на печах переменного и постоянного тока [104]

ствую на напряженное состояние ГЭ. В связи с этим было выполнено численное моделирование тепловой работы зоны ниппельного соединения на ГЭ диаметром 750 мм и уровнем тока 110 кА. Распределение температуры и напряжений в ниппельном соединении ГЭ приведено на Рисунке 1.20. Нижний ниппель, ближайший от ванны, подвергается самым высоким тепловым нагрузкам (до $2300^{\circ}C$). Вследствие этого кольцо графитового вещества в горизонтальной плоскости этого ниппеля подвергается наибольшему растягивающим напряжениям. Достигаются уровни 16,8 МПа, значительно превышающие предел прочности графита.

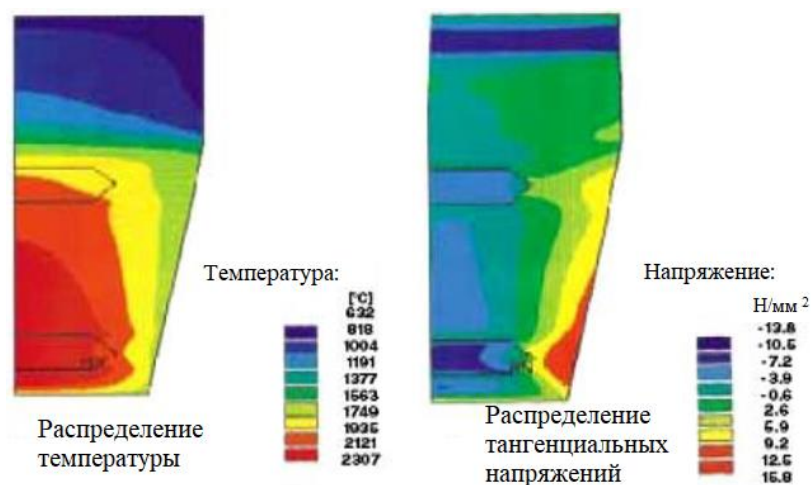


Рисунок 1.20 – Распределение температуры и напряжения в ниппельном соединении [104]

При извлечении ГЭ из печи он подвергается сильному термомеханическому напряжению: он очень быстро охлаждается, особенно на поверхности (термический удар). Этот период критичен для ГЭ, потому что его поверхность затем подвергается максимальному растягивающему напряжению. Затем трещины могут распространяться или даже появляться в местах с наименьшим сопротивлением. Для снижения расхода ГЭ от поломок в зоне ниппельного соединения очень важным является качество ниппеля (прочность) и конструкция соединения (размер ниппеля, резьбы и т. д.). С точки зрения эксплуатации операция ниппельного соединения должна выполняться очень аккуратно (желательно роботом), контролируя момент зажима и правильно соединяя сегменты ГЭ.

В [104] были определены несколько рабочих параметров печи, влияющих на скорость потребления. Одним из наиболее значимых является изменение количества подаваемого кислорода (из фурм, горелок и форсунок после сгорания) и оксидов в шлаке (FeO , Cr_2O_3 и т.д.). Также необходимо максимально уменьшить механические и термомеханические нагрузки, чтобы снизить образование и распространение трещин. Следует обеспечить стабильность работы печи и использовать ниппельный робот. Все факторы, увеличивающие плотность тока на накопнике ГЭ, должны быть снижены или устранены. К таким факторам относятся: пики тока и проблемы с отклонением дуги. Таким образом, система регулирования, безусловно, является важным инструментом.

Анализ данной статьи позволяет сделать вывод, что рассматриваемые здесь принципы по снижению расхода ГЭ являются применимыми, но также необходимо отметить, что не рассмотрены ряд существенных факторов, в частности влияние ИО водой боковой поверхности электрода. Также не была рассмотрена тепловая работа полых ГЭ и ее влияние на их расход.

Авторы статьи [105] выяснили, что не все сечение ГЭ участвует в передаче тока при плавке металлов в ДСП. Это происходит из-за поверхностного эффекта. Было зафиксировано, что ток практически не проходит по центральной части сплошного ГЭ, если его диаметр превышает 450 мм. Поэтому авторы предлагают применять ГЭ со сквозным осевым отверстием. При плавке металлов в ДСП,

ДППТ, такие электроды более эффективны, т. к. они позволяют увеличить коэффициент полезного действия от использования мощности трансформатора благодаря более стабильному процессу горения дуги между электродом и металлом.

Авторами работы [105] было проведено математическое моделирование теплового состояния такого ГЭ в разные периоды плавки. В результате расчетов определены зоны полого ГЭ, где окисление происходит наиболее интенсивно. Рассмотрено распределение температуры по длине ГЭ с учетом подачи аргона (Ar) в осевой канал. Проведена оценка потерь теплоты с его поверхности, а также расхода теплоносителя в системе охлаждения электрододержателя. Результаты расчета схематично представлены на Рисунке 1.21.

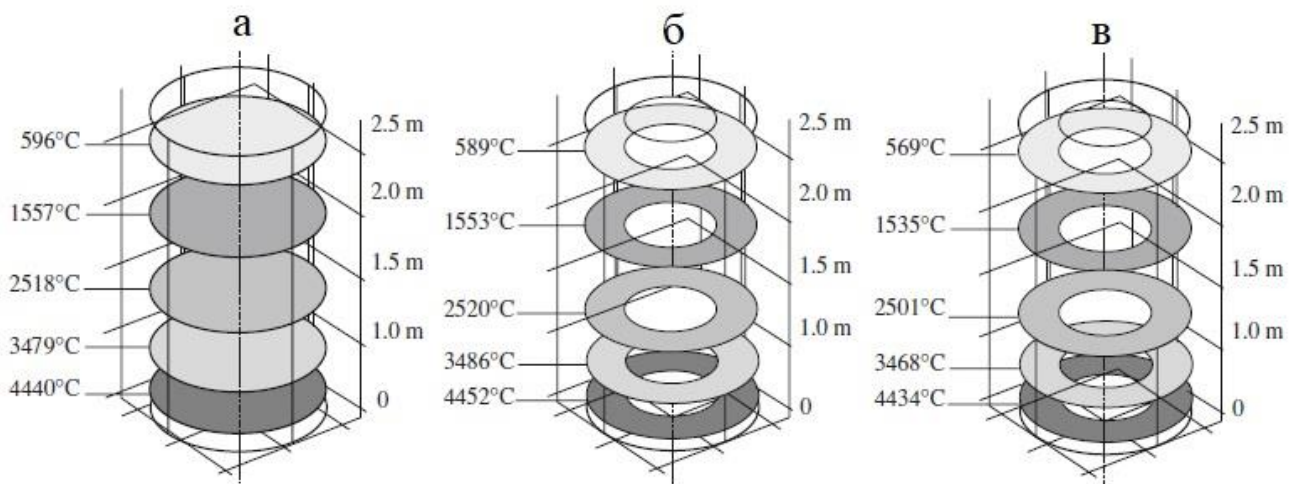


Рисунок 1.21 – Распределение температур по длине ГЭ: а – типовой сплошной электрод; б – полый электрод; в – полый электрод с подачей аргона [105]

Разрабатывая ММ распределения температуры по длине ГЭ авторы статьи принимали, что в начале температура распределяется равномерно. Температуру ГЭ определяли решением дифференциального уравнения теплопроводности с учетом осевой симметрии температурного поля и внутренним источником тепла, выделяющегося при прохождении электрического тока в цилиндрической системе координат. Сформулирована краевая задача. Нижний торец имеет постоянную температуру, равную температуре дуги. Верхний торец имеет температуру равную температуре окружающей среды в цехе. Теплообмен на внутренней поверхности осевого канала полого ГЭ определяется с учетом вынужденной конвекции.

Для решения дифференциального уравнения применяли методом прогонки с использованием неявной абсолютно устойчивой схемы.

В результате расчета определено, что температура нижнего торца сплошного ГЭ ниже в среднем на 10–15°C, чем у полого. Подача аргона (*Ar*) через полый ГЭ снижает температуру нижнего торца примерно до температуры сплошного ГЭ.

Анализ данной статьи позволяет сделать вывод, что представленная авторами ММ, созданная для расчета температурного поля ГЭ, не учитывает некоторые важные факторы, такие как наличие испарительного охлаждения (ИО) водой боковой поверхности ГЭ, изменения формы его рабочего конца в результате окисления и сублимации графита и др., и основана на ряде допущений, таких как принятие температур на нижнем и верхнем торцах ГЭ за постоянные величины и др.

В работе [106] учеными Nathan May, James Glickstein, Maren Waldner было проведено мультифизическое моделирование соединения ГЭ в электродуговых печах. Для этого была разработана мультифизическая модель электродного соединения. Моделирование включает профили нагрева/охлаждения в реальном времени, а также изменяющиеся рабочие условия печи. Было промоделировано более ста вариантов, отличающихся свойствами материала, геометрическими характеристиками и другими параметрами.

Были проведены расчеты и построены следующие зависимости: окисления от времени при разных режимах ИО (Рисунок 1.22) и распределение температур по длине ГЭ при различном времени под током (Рисунок 1.23).

По результатам математического моделирования окисления ГЭ авторы [106] делают следующие заключения:

- около половины базового потребления ГЭ расходуется по причине окисления боковой поверхности;
- ИО водой является одним из ключевых факторов, влияющих на скорость окисления боковой поверхности ГЭ;

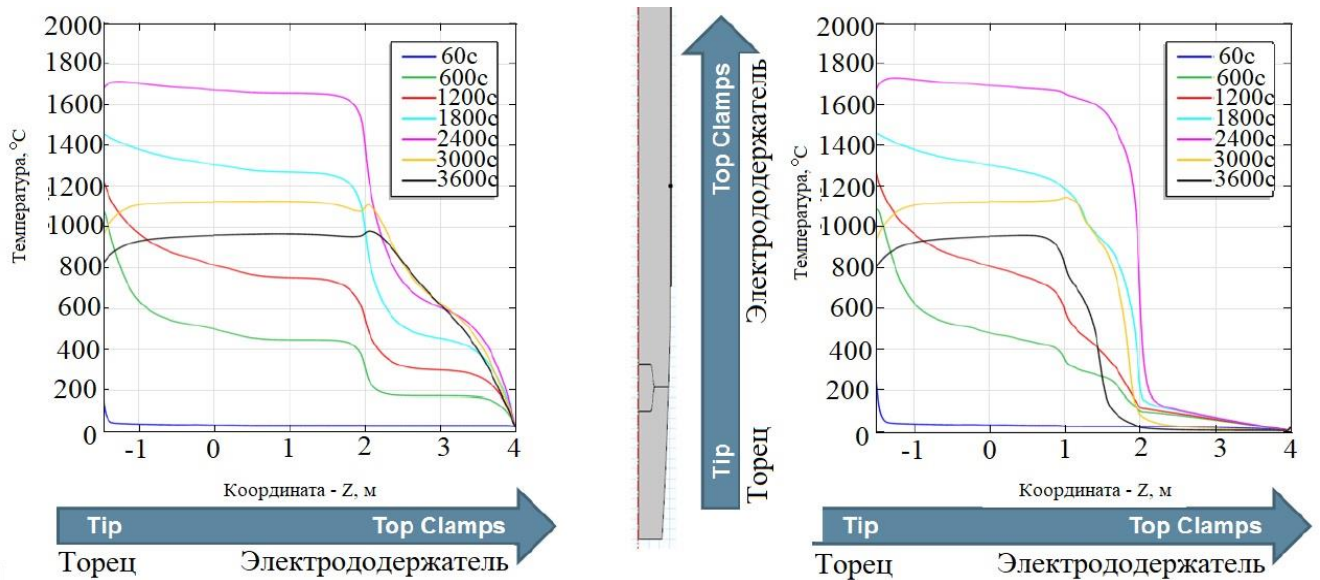


Рисунок 1.22 – Распределение температур по длине ГЭ с использованием ИО и без него [106]

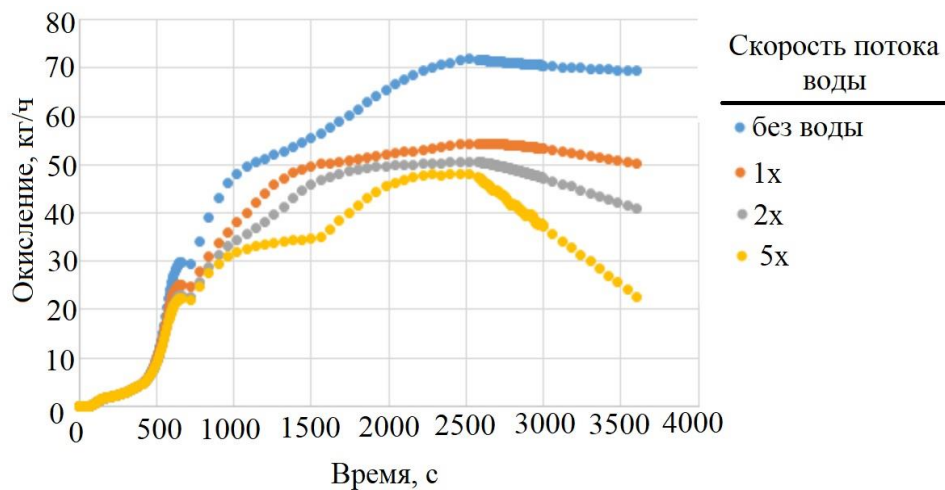


Рисунок 1.23 – Зависимость окисления боковой поверхности ГЭ с водяным охлаждением от времени нахождения в печи под током [106]

– моделирование помогает понять ключевые рабочие параметры для контроля и снижения окисления.

Также в результате работы было выявлено, что свойства материала ГЭ, их температурная зависимость, анизотропия и разность свойств между ГЭ и ниппелем оказывают существенное влияние на напряжения.

По мнению авторов работы [106], ИО боковой поверхности ГЭ водой является одним из наиболее эффективных способов снижения окисления. В работе

также отмечено, что слишком большой расход воды может неблагоприятно изменить энергетический баланс плавки.

Данная работа дает важную информацию, способствующую снижению затрат на потребление ГЭ при плавке, но и имеет поле для дополнительных исследований в части влияния толщины водяной пленки при ИО на скорость их окисления. Также необходимо отметить, что в работе не представлена ММ, по которой проводятся расчеты, в связи с чем невозможно дать обоснованное заключение об их корректности в представленном программном обеспечении.

Авторы статьи [107] считают, что для правильной эксплуатации дуговых печей важно иметь сведения о распределении температуры по электроду с учетом изменения времени. Для определения участков поверхности электрода, наиболее подверженных эрозии и окислению, и принятия соответствующих мер по созданию защитных покрытий, знание, как распределяется температура по ГЭ, является полезным.

Авторы приводят методику расчета температуры электрода, построенную на базе аналитической модели и данных о работе электрода в дуговых печах. На основе анализа работы дуговых печей авторы приходят к выводу, что для дугового разряда между электродом и шихтой характерны два положения опорных дуговых пятен: у центра торца на начальной стадии процесса плавки и на крае торца в основной период работы печи.

Авторы строят модель на основе дифференциального уравнения теплопроводности с учетом осевой симметрии температурного поля электрода в цилиндрической системе координат и источника объемного тепловыделения при прохождении тока. Для получения решения в конечном виде, действие дугового источника тепла на торец электрода имитируется действием объемного источника с максимальным тепловыделением в приповерхностном слое у торца.

Задаются граничные условия на оси симметрии электрода, на его боковой поверхности и на торцах. Значение коэффициента теплоотдачи на боковой поверхности выбирается из условия охлаждения за счет свободной конвекции. Коэффициент теплоотдачи на нерабочем конце учитывает принудительное охлажде-

ние электрододержателя водой, а на рабочем конце определяется с учетом излучения с поверхности горячего торца на шихту и расплав. По силе тока в электрической дуге и приэлектродному падению напряжения находится тепловой поток от разряда в электрод. В начальный момент времени температура во всех точках электрода принимается одинаковая.

Получены аналитические решения уравнения теплопроводности при размещении опорного пятна дуги у центра торца электрода и при смещении его к периферии торца. В качестве примера выполнены расчеты температурного поля угольного электрода диаметром 0,4 м при силе тока 20 кА.

Расчеты показывают, что вследствие принятия коэффициента теплоотдачи постоянным по радиусу рабочего торца распределение температуры по длине стержня электрода носит немонотонный характер. Этот недостаток модели авторы исправляют, проведя касательные прямые в точках перегиба температурных кривых. Пересечения прямых с осью ординат дают более достоверную картину распределения температуры на горячем торце электрода.

Для электродов дуговой печи из-за массивности время выхода на стационарный режим составляет ~ 10 ч.

Выявлена сильная зависимость температуры от положения разряда для точек электрода, удаленных от горячего торца на расстояние, меньшее радиуса. Авторы отмечают, что в местах наибольших температур при установившемся режиме горения дуг можно ожидать и наибольший износ электрода.

Температура электрода в месте крепления при его работе сильно зависит от условий охлаждения. Для водоохлаждаемого держателя электрода температура в момент времени $t = 36000$ секунд составляет около 40°C , а для держателя без водяного охлаждения – около 350°C .

Приведенная авторами методика позволяет определить температуру в любой точке электрода при разных положениях разряда в различные моменты времени с учетом теплофизических свойств материала. Конусообразная форма обгоревшего электрода после длительной его работы указывает на справедливость модельных представлений о многодуговом разряде и его положении на рабочем

торце электрода. По рассчитанному градиенту температуры на нерабочем конце электрода можно найти расход теплоносителя в системе охлаждения электродержателя.

Рассматриваемая в данной статье ММ теплового состояния электрода основана на аналитическом решении уравнения теплопроводности, что связано с известными трудностями его получения и применения. Кроме того, в данной модели не рассматривается оросительное охлаждение водой боковой поверхности электрода.

В результате обзора теоретических и экспериментальных исследований теплового состояния графитированного электрода установлено:

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 $\sim 400^{\circ}\text{C}$ незначительно влияет на окисление и, соответственно, расход ГЭ;

2. Нижний торец полого ГЭ имеет несколько более высокую температуру, чем сплошной. Для ее снижения возможно использовать подачу аргона в осевой канал;

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.

1.5. Существующие конструкции и эффективность использования системы испарительного охлаждения графитированных электродов в дуговых печах

Разработка систем ИО ГЭ водой и их практическое применение зафиксировано в XX веке. Для оценки их эффективности ниже описаны принцип работы и конструкция некоторых из таких систем.

За историю развития электроплавки на дуговых печах было предпринято несколько важных шагов для снижения расхода ГЭ. Первым шагом было использование защитного покрытия. Это привело к снижению потребления графита на 12–15%. Однако данный процесс требовал и дополнительные инвестиции. Следующим шагом была попытка устранения окисления боковой поверхности. К 1912 году были запатентованы комбинированные электроды, изготовленные из металлических валов в верхней части и графитовых стержней в качестве наконечника.

Недостаток комбинированного электрода с водяным охлаждением заключается в том, что нет защиты от короткого замыкания дуги, возникающей между ломом и металлическими электродами, и что такое короткое замыкание может привести к образованию отверстий в металлическом электроде, позволяющих воде течь в расплавленный металл. Таким образом, этот метод, имеющий риск возникновения серьезных аварий, оказался невостребованным.

Следующей разработкой было предложено заменить только один электрод из графитовой колонны на металлическую систему с водяным охлаждением. Это электрод в верхней части колонны, который заканчивается в зоне электрододержателя. Для осуществления данного способа требуется меньше изменений в конструкции, чем в предыдущем способе, но экономия сравнительно невелика. Она схожа с использованием защитных покрытий электродов.

В дальнейшем разработанный способ был снабжен электродами длиной около 4–5 метров, изолированными высокотемпературным керамическим материалом, верхние части которого также охлаждаются водой. Активная часть между металлической частью и дугой выполнена из графита. В результате не стало проблем с коротким замыканием, пока электрическая и теплоизоляционная керамика выдерживает коррозию, возникающую от воздействия шлака. Но через короткое время после использования охлажденный шлак будет образовывать толстые слои на охлажденном керамическом изоляционном материале и вызывать коррозию и повреждения. Риск того, что целые участки изоляции упадут, и свободная металлическая поверхность может вызвать короткое замыкание, чрезвычайно высок.

Так 25.07.1989 года в США был опубликован патент на изобретение [108], описывающий конструкцию и принцип действия устройства ИО. Авторы патента [108] считают, что все изобретенные на тот момент устройства сложны в исполнении и требуют постоянного обслуживания, что приводит к простоям и снижению производительности. Кроме того, они требуют высоких инвестиционных затрат.

Изобретение [108] предназначено для решения вышеупомянутых проблем и создания охлаждающего устройства, обладающего следующими преимуществами:

- снижение потребления электродов приблизительно на 15%;
- продление срока службы огнеупоров на своде печи приблизительно на 50% без дугообразования в металлическом сечении;
- снижение инвестиционных затрат на изготовление;
- автоматическая работа устройства с простым техническим обслуживанием, практически не требующим затрат;
- равномерное распыление воды по поверхности электрода за счет специальной конструкции сопла;
- снижение расхода охлаждающей воды.

Вкратце, изобретение [108] относится к охлаждающему устройству для ГЭ дуговой печи, в котором сопла распыляют воду и охлаждают поверхности ГЭ

выше свода печи, тем самым предотвращая окисление. Поток воды регулируется таким образом, что вода, стекающая вниз по ГЭ, испаряется перед входом в отверстие свода для обеспечения максимальной экономии графита и высокого уровня безопасности.

Распылительные кольца, выполненные из нержавеющей стали в незакрытой круглой форме для предотвращения индукционного нагрева, имеют сопла. Каждое из этих колец прикреплено к нижней части электрододержателя. Количество, размер и взаимное расстояние сопел зависят от температурного профиля ГЭ. Расход воды колеблется от 1,4 до 5 м³/час. Давление воды от 1,5 до 3,5 кг/см² на входе в водопроводную систему охлаждающего устройства печи.

Операция распыления включается и выключается автоматически с помощью концевых выключателей, реагирующих на движение ГЭ вверх и вниз. Из Рисунка 1.24 видно, что охлаждающая жидкость распыляется из форсунок 1 на поверхности ГЭ 2 над сводом печи 3, влага мгновенно испаряется и ГЭ за счет этого охлаждаются. Когда ГЭ 2 над сводом печи 3 охлаждаются, ГЭ 2 внутри печи охлаждаются тоже. Устройство ИО служит для поддержания температуры ГЭ внутри печи ниже 600°C путем охлаждения их наружных поверхностей вне печи, чтобы предотвратить окисление.

Как указано выше, распыленный хладагент испаряется почти мгновенно. Часть его течет внутрь печи вдоль поверхностей ГЭ, но влага полностью испаряется благодаря высокотемпературной атмосфере внутри печи. Следовательно, нет никакого риска, что некоторое количество влаги попадет на поверхность шлака.

В рамках патента [108] были проведены опытные работы на двух дуговых печах различной вместимости. На печи вместимостью 90 т по стали, диаметром корпуса 5800 мм., трансформатором 45/54 МВА и диаметром ГЭ 20 дюймов (508 мм) снижение расхода ГЭ составило 0,4 кг/т. Снижение расхода футеровки свода 0,05 кг/т. Для печи вместимостью 190 т по стали, диаметром корпуса 8000 мм, трансформатором 70/82 МВА и диаметром ГЭ 24 дюйма (610 мм) снижение расхода ГЭ составило 0,3 кг/т. Снижение расхода футеровки свода 0,19 кг/т.

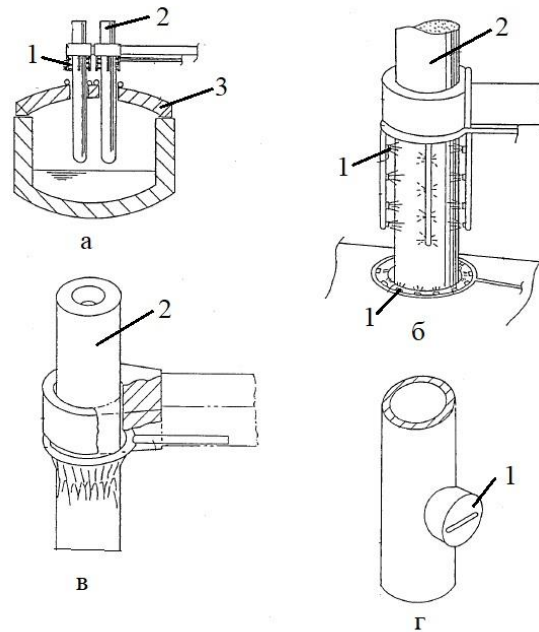


Рисунок 1.24 – Виды типичных вариантов исполнения изобретения [108]
 а – общий вид; б – увеличенный вид основной части устройства;
 в – облегченный вариант устройства; г – увеличенный вид сопла устройства

Настоящее изобретение является простым в проектировании, изготовлении и монтаже на любой дуговой печи. Требуется минимальных, относительно других видов снижения расхода ГЭ, инвестиционных затрат для реализации. Одним из минусов данной системы можно назвать то, что в ней не предусмотрена очистка сопел системы воздухом в процессе работы, что может привести к засорам от накипи (солями, окисью и закисью железа содержащимися в воде) и последующему закупориванию отверстий сопел и выходу системы орошения из строя. В изобретениях [98, 109–113], опубликованных позднее этот вопрос решен. Также для повышения эффективности использования данного изобретения необходима разработка ММ теплового состояния ГЭ, которая позволит рассчитывать рациональные параметры системы ИО.

Вышеописанный пример [108] конструкции систем ИО ГЭ в полной мере объясняет базовый принцип конструкции и работы таких устройств. Патенты, опубликованные позже по этой теме [98, 109–113], основаны на нем и не вносят кардинально новых решений в принципиальную схему работы и направлены на

улучшение конструкции, позволяющей увеличить их срок службы. При этом эффективность с точки зрения снижения расхода ГЭ практически не изменяется.

Что касается промышленного применения технологии оросительного (испарительного) охлаждения ГЭ, то в РФ и соседних странах СНГ таких примеров мало. Одним из таких можно назвать Магнитогорский металлургический комбинат, который в 2006 году запустил две дуговые сталеплавильные печи фирмы VAI Fuchs с весом плавки 180 т с уже установленной на них системой ИО. Технология ИО используется на этих печах, как неотъемлемая часть технологического процесса производства. Данное оборудование и вспомогательные агрегаты обеспечены автоматизированными системами контроля и управления.

Система ИО печей VAI Fuchs включает в себя клапанный стенд, установленный у стены трансформаторного помещения, кольцо ИО, рукава. Электрическое управление электромагнитными клапанами интегрируется в систему программируемых контроллеров и человеко-машинных интерфейсов ДСП. Кольцо ИО и гибкие участки трубопроводов встроены в рукава-консоли. Все остальные трубопроводы расположены в периферии. Расход воды 3,5 м³/ч.

В отличие от отечественного опыта, в европейских и американских странах данная технология более распространена. К примеру, Итальянская компания Smartec [114] занимается разработкой и изготовлением усовершенствованных систем для повышения эффективности дуговых печей, в число которых входит и система ИО ГЭ. Эта система динамически регулирует поток воздуха/воды через охлаждающие кольца, под управлением собственным программным обеспечением. Этот динамический контроль во время каждой фазы плавления значительно повышает эффективность охлаждения ГЭ по сравнению со стандартной практикой использования фиксированного количества охлаждающей воды. Система охлаждения включает в себя:

- динамическое регулирование потока водяного охлаждения в соответствии с профилем плавления;
- повышенную доступность охлаждающих колец благодаря конструкции, предотвращающей засорение и деформацию.

Схематичное изображение работы системы управления ИО и фотографии промышленного применения приведены на Рисунках 1.25, 1.26, соответственно.

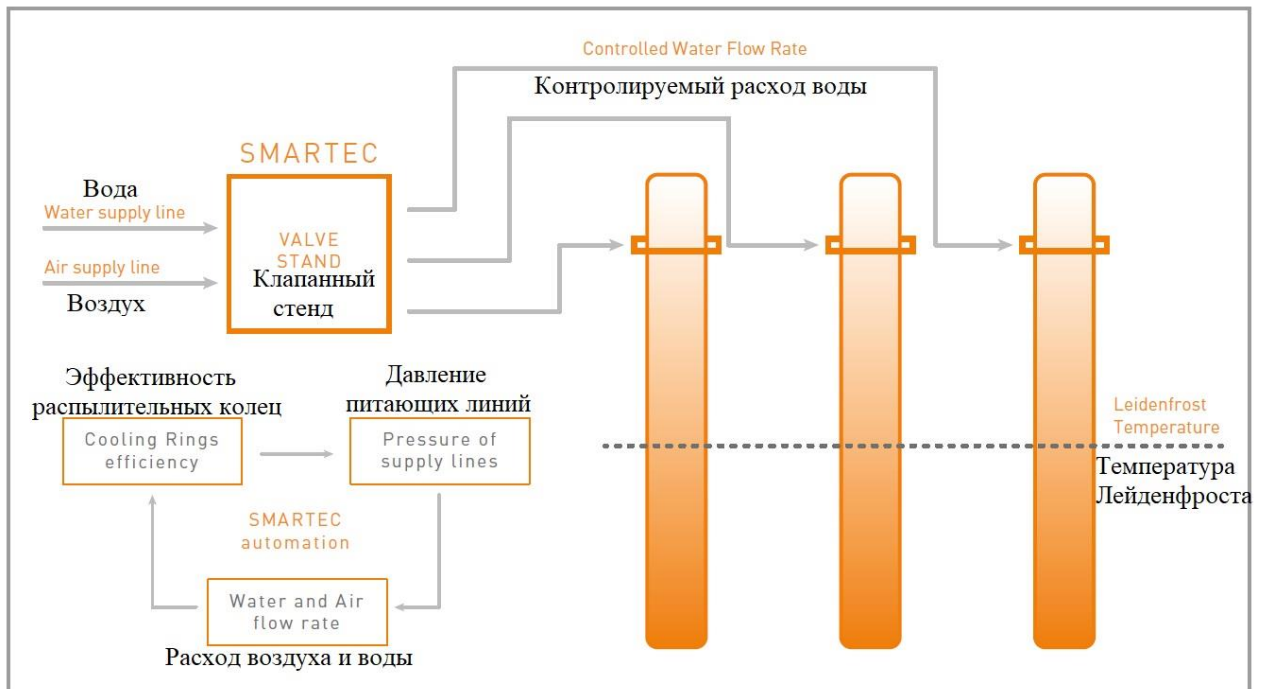


Рисунок 1.25 – Схема работы системы управления [114]



Рисунок 1.26 – Фотографии промышленного применения системы ИО [114]

Производители данных систем заявляют, что применение ИО их производства приводит к снижению потребления электродов до 15%. Данные системы были установлены на более чем 40 заводах по всему миру.

Эффективность рассматриваемой в данной статье системы ИО вызывает вопросы, т. к. в их случае динамическое регулирование потока водяного охлаждения зависит от профиля плавления, а не от теплового состояния ГЭ.

Теоретические исследования и опытные работы по использованию ИО ГЭ проводимые авторами [115] привели к следующим заключениям. Одной из последних практик, которая помогает предотвратить разрушение электродных соединений, является выключение распыления воды на несколько минут после добавления нового электродного сегмента. Температурный градиент в ГЭ намного больше, когда активна операция распыления воды. Этот тепловой градиент может вызвать проблему из-за теплового расширения графита. Даже если электрод был затянута с соответствующим крутящим моментом роботом, влияние температуры на электродное соединение достаточно, чтобы ослабить его.

Водоохлаждаемые электроды снижают скорость окисления боковых стенок на 40% и наконечника на 50% [115]. Одной из проблем, связанных с охлаждаемыми водой электродами, является выбор рационального значения расхода воды. Если скорость потока слишком высока, вода будет поступать в печь, что не безопасно, а также увеличит тепловые потери. Потеря тепла может в конечном итоге обойтись дороже, чем деньги, сэкономленные от снижения потребления электродов. В этой связи предварительный расчет технологических параметров системы охлаждения электродов, создание полностью контролируемой системы управления процессом является важной задачей, влияет на эффективность и безопасность производства.

В заключение по данному разделу необходимо отметить, что многие из вышеперечисленных изобретений (патентов) не действующие, что свидетельствует о малом проценте внедрения технологии ИО ГЭ на металлургических и литейных производствах. Это связано с недостатком теоретической/математической базы в этой сфере. Одной из задач данной работы является расширение внимания к

данному способу снижения температуры ГЭ среди ученых и специалистов, обоснование безопасности и эффективности применения данной технологии за счет математического моделирования процессов, участвующих в ИО водой ГЭ без проведения дорогостоящих опытных работ.

Принцип действия и конструкция всех изобретенных устройств для снижения температуры электродов во многом похожи. Усовершенствование конструкции этих систем в большей степени направлено на увеличение срока службы данного оборудования, а не на повышение стойкости ГЭ. В связи с этим повышение точности математического моделирования процессов, участвующих в оросительном охлаждении, определение наиболее эффективных параметров процесса повысит общую эффективность использования данных систем.

1.6. Цель работы и основные задачи

В результате анализа отечественных и зарубежных литературных источников установлено, что проблема сокращения эксплуатационного расхода ГЭ дуговых печей является актуальной и требует научной проработки.

ГЭ являются ценным расходным материалом, стоимость которого составляет до 30% от стоимости готовой продукции. Необходимость работы над исследованиями по уменьшению эксплуатационного расхода ГЭ определяется тем, что стоимость ГЭ в некоторых случаях превышает цену израсходованной электроэнергии в себестоимости стали. Потребление ГЭ зависит, в основном, от окисления его боковой поверхности под воздействием температуры (37,8%) и термомеханического разрушения и износа (35%), т. е. тепловое состояние электродов в большей степени влияет на их расход.

Рассмотренные выше варианты снижения расхода ГЭ имеют место для применения металлургическими предприятиями, но их основными недостатками являются высокая стоимость используемых компонентов, сложная аппаратура и методика, что во многом снижает экономический эффект по повышению стойкости ГЭ и снижает эффективность использования непосредственно в промышленных дуговых печах. Существуют способы снижения расхода ГЭ, в том числе и за

счет их принудительного охлаждения путем подачи газов и испарительного охлаждения.

В США и в технически развитых европейских странах технология сокращения расхода полых и цельных ГЭ за счет их принудительного охлаждения водой используется широко. В России данная технология фактически не находит применения за исключением единичных случаев, таких как Магнитогорский металлургический комбинат.

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. Это не безопасно, 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. Таким образом, **цель работы** заключается в следующем:

Цель работы: Сократить удельный расход графитированных электродов за счет использования принудительного охлаждения.

Для достижения поставленной цели были поставлены/сформулированы следующие **задачи**:

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 ИО 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.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛОГО ГРАФИТИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОДА ДУГОВОЙ ПЕЧИ И АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА ДИНАМИКУ УГАРА ГРАФИТА

В данной главе исследовано тепловое состояние ГЭ Ø300 мм и Ø500 мм используемых в ДСП-6 и ДСП-50, соответственно. Для достижения поставленной задачи разработана ММ, позволяющая рассчитывать тепловое состояние полого графитированного электрода при подаче газов в осевой канал. Для удобства расчетов создана компьютерная программа. Представлены и проанализированы результаты моделирования теплового состояния полых ГЭ при подаче различных газов в осевой канал. Результаты моделирования сведены в графики и проанализированы. Сделаны соответствующие заключения.

2.1. Выбор объекта моделирования и принятые в математической модели допущения

Объектом моделирования является ГЭ, выполненный в виде цилиндра (Рисунок 2.1), в котором расположен полый осевой канал. Известна начальная температура электрода t_0 . По каналу подается холодный газообразный теплоноситель с массовым расходом G_z , который, нагреваясь сам, охлаждает ГЭ. Известны геометрические размеры, технологические параметры и теплофизические свойства газообразного теплоносителя и материала ГЭ.

Принятые допущения

ГЭ имеет форму полого цилиндра. Наружный диаметр электрода $D_n = 2R_n$, внутренний диаметр $D_g = 2R_g$. Длина рассматриваемого участка электрода H . Принимаем коэффициент эффективной теплопроводности как линейно зависящий от температуры $\lambda = \lambda_0[1 + b(t - t_0)]$.

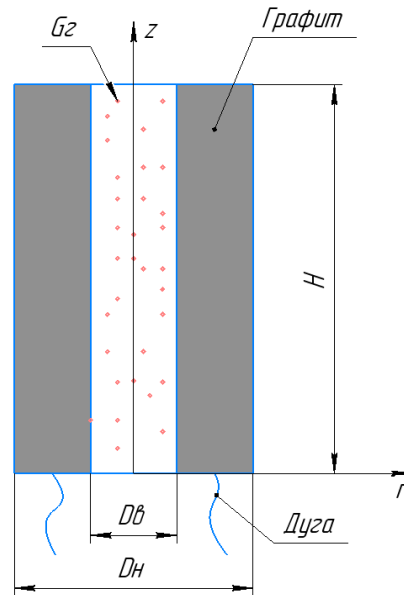


Рисунок 2.1 – Полый ГЭ

Распределение температуры по длине ГЭ зависит от теплового потока от дуги, теплообмена с окружающей печь атмосферой и газом, вдуваемым в осевой канал, а также от мощности внутренних источников тепла электрода. Считаем вдуваемый газ химически инертным и лучепрозрачным. Режим течения газа – турбулентный, течение установившееся. Тепловые потоки в ГЭ представлены на Рисунке 2.2.

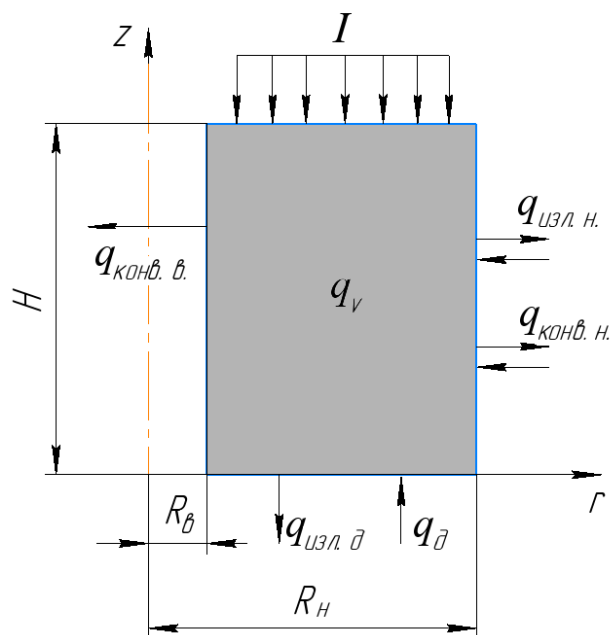


Рисунок 2.2 – Тепловые потоки в электроде

2.2. Математическая модель теплового состояния полого графитированного электрода при подаче инертного газа в осевой канал

Описываемый процесс рассматривается в цилиндрической системе координат. Ось O_z совмещена с осью цилиндра. Процесс осесимметричный $\left(\frac{\partial t}{\partial \varphi} = 0\right)$, а температурное поле в ГЭ двумерно: $\frac{\partial t}{\partial r} \neq 0, \frac{\partial t}{\partial z} \neq 0$.

Дифференциальное уравнение теплопроводности с учетом осевой симметрии температурного поля электрода в цилиндрической системе координат и источника объемного тепловыделения при прохождении тока.

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{c\gamma} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) \right] + \frac{q_v}{c\gamma}, \quad (2.1)$$

$R_6 < r < R_H, 0 < z < H$, где c, γ – соответственно, эффективные удельная теплоемкость и плотность материала электрода.

Мощность внутренних источников тепла можно оценить, как

$$q_v = J^2 \rho, \quad (2.2)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала электрода;

$$J = \frac{I}{S} \text{ – средняя плотность тока через электрод,}$$

где I – ток дуги.

Если площадь сечения электрода $S = \pi(R_H^2 - R_6^2) = \frac{\pi(D_H^2 - D_6^2)}{4}$, тогда средняя плотность тока будет равна $J = \frac{4I}{\pi(D_H^2 - D_6^2)}$, соответственно, джоулево

тепловыделение в электроде можно представить как

$$q_v = \frac{16I^2 \rho}{\pi^2 (D_H^2 - D_6^2)^2}, \quad (2.3)$$

Температура электрода в начальный момент времени $t(r, z, 0) = t_0$.

Верхний торец графитированного электрода теплоизолирован

$$q = \lambda \left. \frac{\partial t}{\partial z} \right|_{z=H} = 0, \quad (2.4)$$

Теплоотдача с боковой поверхности электрода определяется с учетом излучения и свободной конвекции с атмосферой печи

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial r} = q_{\text{изл}} + q_{\text{конв}}(z), \quad (2.5)$$

где $q_{\text{конв}}(z) = \alpha_K(z)(t(R_H, z) - t_{\text{окр}})$ – тепловой поток, учитывающий свободную конвекцию.

Коэффициент теплоотдачи α_K определяется по критериальному уравнению, описывающему свободную конвекцию около вертикальной пластины

$$\text{Nu}(z) = 0,6(\text{Gr}_{\text{окр}}(z) \text{Pr}_{\text{окр}})^{0,25} \left(\frac{\text{Pr}_{\text{окр}}}{\text{Pr}_c} \right)^{0,25}, \quad (2.6)$$

где $\text{Nu}_{K(z)} = \frac{\alpha_K(z)z}{\lambda_{\text{окр}}}$ – число Нуссельта (безразмерный коэффициент теплоотдачи,

характеризует теплообмен на границе «стенка-жидкость»);

$$\text{Gr}_{\text{окр}z} = \frac{g\beta_{\text{окр}}\mathcal{G}_c z^3}{\nu_{\text{окр}}^2} \text{ – число Грасгофа (характеризует подъемную силу, воз-}$$

никающую в жидкости вследствие разности плотностей);

$$\text{Pr}_{\text{окр}} = \frac{\nu_{\text{окр}}}{a_{\text{окр}}}, \text{Pr}_c = \frac{\nu_c}{a_c} \text{ – число Прандтля (мера подобия полей температур и}$$

скоростей) для температуры печной атмосферы и температуры боковой поверхности электрода.

В вышеприведенных комплексах $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, $\beta_{\text{окр}} = 1/273 \text{ град}^{-1}$ – температурный коэффициент объемного расширения газа печной атмосферы, $\mathcal{G}_c = t_c - t_{\text{окр}}$ – разность местной температуры стенки и температуры окружающей среды, a – коэффициент температуропроводимости газа печной атмосферы.

Тепловой поток излучением можно определить, как

$$q_{изл} = C_0 \cdot E_{np} \cdot \left[\left(\frac{t(R_H, z) + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_\phi + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (2.7)$$

где $E_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_k} + \frac{1}{\varepsilon_\phi} - 1}$ – приведенная степень черноты,

где $\varepsilon_k, \varepsilon_\phi$ – степень черноты соответственно поверхностей графитового катода и футеровки печи;

t_ϕ – средняя температура боковой поверхности и свода футеровки печи;

$C_0 = 5,7 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К}^4$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Теплообмен на торце электрода определяется с учетом излучения с торца и теплового потока от электрической дуги

$$q_\partial - q_{изл} = -\lambda \frac{\partial t(R_H, 0)}{\partial z}, \quad (2.8)$$

где $q_\partial = \frac{4IU_K}{\pi(D_H^2 - D_\partial^2)}$ – средний тепловой поток от дуги на торец электрода;

U_K – катодное падение напряжения;

$$q_{изл} = C_0 \cdot E_{np} \cdot \left[\left(\frac{t(R_H, z) + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_\partial + 273}{100} \right)^4 \right].$$

Теплообмен на стенке цилиндрического канала определяется из граничного условия 3-го рода

$$\frac{\partial t}{\partial z} = \alpha (t(R_\partial, z) - t_z(z)) \quad (2.9)$$

Изменение температуры подаваемого газа по длине цилиндрического канала можно определить из уравнения теплового баланса

$$\frac{dt_z}{dz} = \alpha(z) \cdot (t(R_\partial, z) - t_z(z)) \cdot \frac{\pi \cdot D_\partial}{G_z c_z(t)}, \quad (2.10)$$

где G_z – массовый расход газа;

c_z – теплоемкость газа.

Граничным условием для решения уравнения (2.10) является значение начальной температуры газа на входе в канал $t_2|_{z=H} = t_{20}$.

Коэффициент теплоотдачи $\alpha(z)$ определяется из критериального уравнения, описывающего турбулентное течение газа при вынужденной конвекции в цилиндрическом канале

$$\text{Nu}_{z(z)} = 0,022 \text{Re}^{0,8}(z) \text{Pr}_2^{0,43} \varepsilon_l, \quad (2.11)$$

где $\varepsilon_l = 1,38 \left(\frac{z}{D_\theta} \right)^{-0,12}$.

В вышеприведенных зависимостях:

$$\text{Nu}_{(z)} = \frac{\alpha(z) D_\theta}{\lambda_2} \text{ – число Нуссельта,}$$

$$\text{Re} = \frac{W_{(z)} D_\theta}{v_2(t)} \text{ – число Рейнольдса (характеризует соотношение сил инерции}$$

и сил вязкости),

где $W_{(z)} = \frac{4V}{\pi D_\theta^2}$ – скорость течения газа,

где $V = \frac{G_2}{\rho_2(t)}$ – объемный расход газа,

Pr – число Прандтля для газа.

Для численного решения краевой задачи использовали метод конечных разностей [116–118].

2.3. Исходные данные для моделирования

По ММ на языке программирования C++ Builder создана компьютерная программа, упрощающая расчеты. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019614348 [119].

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 полового ГЭ, а также параметры теплоносителя и дуговой печи. Для хранения теплофизических свойств газов и других исходных данных имеется возможность сохранять их в Microsoft Access.

Исходные данные для расчетов:

– Геометрические параметры ГЭ:

для ДСП-50 – $D_H = 500$ мм, $D_{BH} = 100$ мм, $H = 1800$ мм;

для ДСП-6 – $D_H = 300$ мм, $D_{BH} = 60$ мм, $H = 1500$ мм [120; 121]

– Технологические параметры:

Объемный расход газа V_r для ДСП-50	113 м ³ /ч
Объемный расход газа V_r для ДСП-6	41 м ³ /ч
Рабочая температура футеровки	1350 ⁰ С
Начальная температура ГЭ и начальная температура газа	$t_0=20^0$ С
Степень черноты футеровки	0,93
Температура газов в печи	1100 ⁰ С
Скорость газового потока при t_{20}	4 м/с

– Теплофизические свойства для ГЭ заданы уравнениями аппроксимации на основе литературных данных [122; 123].

Удельное электрическое сопротивление возрастает с увеличением диаметра ГЭ, что связано с технологией их изготовления. Помимо этого, оно зависит от температуры.

При температуре $t \leq t_1$ $\rho(t) = \rho_0(1 - 0,25(t - t_0)/(t_1 - t_0))$;

При температуре $t > t_1$ $\rho(t) = \rho(t_1)(1 + \alpha(t - t_1))$, $\alpha = 0,002 - 0,0024$ град⁻¹, $t_1 = 1000^0$ С, $\rho_0 = 5$ мкОм·см.

Удельная теплоемкость:

При температуре $t < 1700^0$ С, $c(t) = 681,81 + 2,6673t - 0,0019t^2 + 5 \cdot 10^{-7}t^3$, Дж/(кг·°С);

При температуре $t > 1700^0$ С, $c(t) = 2100$ Дж/(кг·°С); $\gamma = 1700$ кг/м³; $\varepsilon_T = 0,71$;

$\lambda(t) = 162,82 - 0,0407 \cdot t$, Вт/(м·°С).

Для газов, используемых в качестве теплоносителей при охлаждении электрода, а также для газа печной атмосферы по данным [124] были построены следующие эмпирические зависимости, определяющие свойства газов:

Плотность, кг/м^3 :

$$- \text{ азот } (N_2): \rho = \frac{1}{0,8012 + 0,0029 t}; \text{ аргон } (Ar): \rho = \frac{1}{0,5603 + 0,0021 t}$$

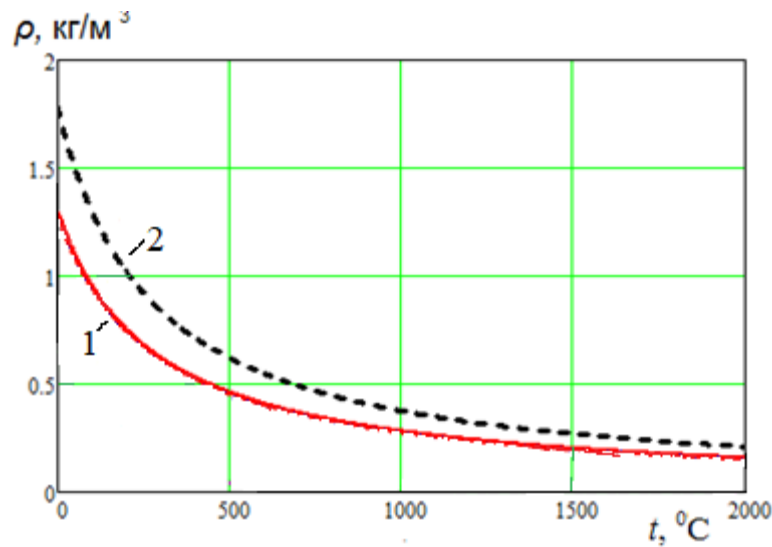


Рисунок 2.3 – Эмпирические зависимости плотности газов от температуры:

1 – азот; 2 – аргон

Теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$:

$$- \text{ азот } (N_2): c = \begin{cases} 1028 e^{0,0002 t} \\ 393,72 + 119,22 \ln(t) \end{cases}; \text{ аргон } (Ar): c = 522,76 - 0,0018 t.$$

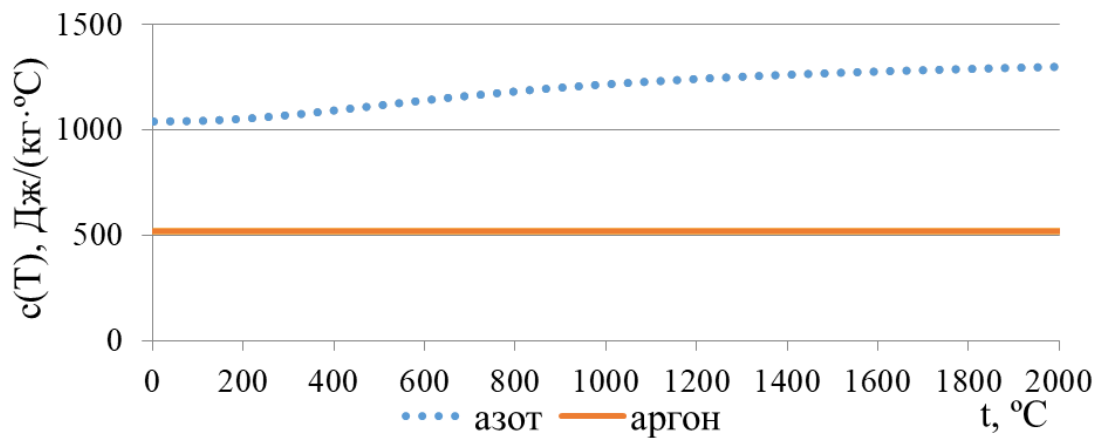


Рисунок 2.4 – Эмпирические зависимости теплоемкости газов от температуры

Теплопроводность, Вт/(м·°C):

– азот (N_2): $\lambda = 0,0283 + 5 \cdot 10^{-5} t - 6 \cdot 10^{-10} t^2$;

– аргон (Ar): $\lambda = 0,0173 + 4 \cdot 10^{-5} t - 8 \cdot 10^{-10} t^2$.

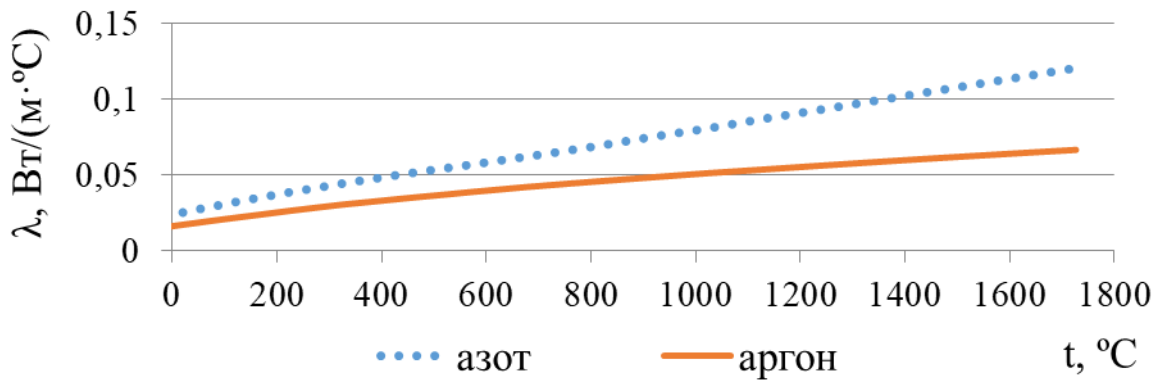


Рисунок 2.5 – Эмпирические зависимости теплопроводности газов от температуры

Вязкость, м²/с:

– азот (N_2): $\nu = 0,0007 + 4 \cdot 10^{-6} t + 6 \cdot 10^{-10} t^2$;

– аргон (Ar): $\nu = 0,0022 + 5 \cdot 10^{-6} t + 8 \cdot 10^{-10} t^2$.

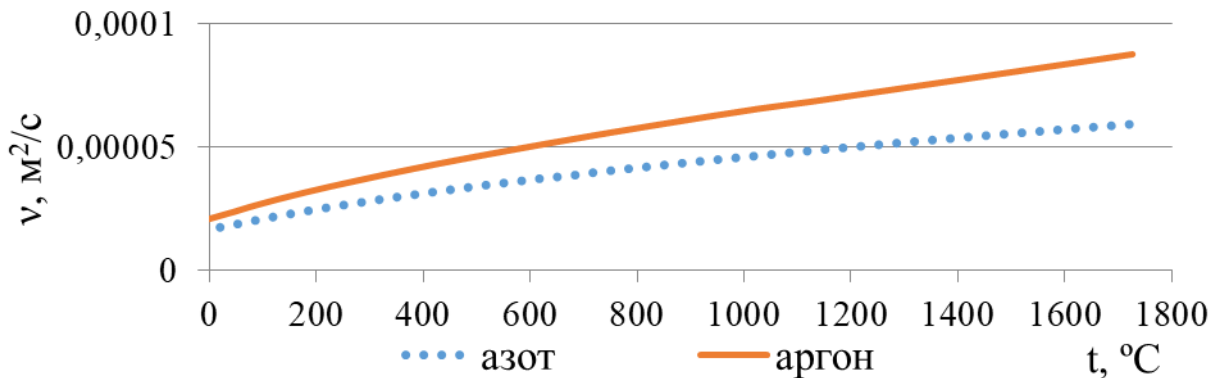
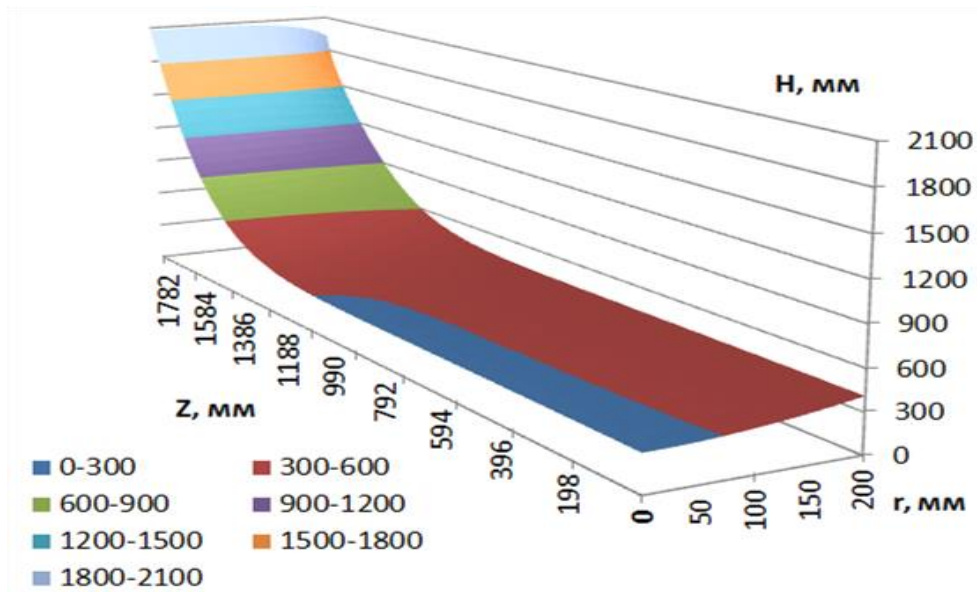


Рисунок 2.6 – Эмпирические зависимости вязкости газов от температуры

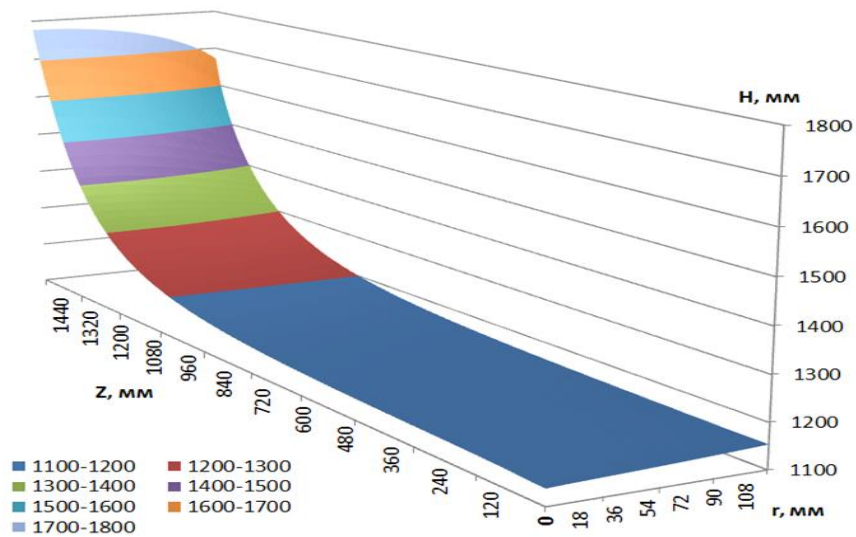
2.4. Результаты компьютерного моделирования теплового состояния ГЭ с осевым каналом

С использованием разработанного программного продукта [119] был проведен расчет теплового состояния (температурного поля) для полых ГЭ разного диаметра и разных параметров дуговых печей [125, 126]. Исследование температурного поля ГЭ, работающих на дуговых печах трехфазного тока вместимостью 6т и 50т было проведено с учетом подачи азота в осевой канал (Рисунок 2.7).

Установлено, что нижняя торцевая поверхность ГЭ имеет наибольшую температуру ($> 2000^{\circ}\text{C}$), т. к. к ней привязана дуга. Рисунок 2.7 позволяет говорить, что подача в осевой канал азота приводит к снижению температуры на начальном участке ГЭ до 300°C , чего достаточно для снижения интенсивности окисления в этой зоне.



а



б

Рисунок 2.7 – Температурное поле в ГЭ через 0,7 ч (42 мин) при подаче азота через осевой канал электрода: а – для ДСП-50 (ток дуги 34 кА); б – для ДСП-6 (ток дуги 6 кА) [125]

Далее в расчетах будем оценивать влияние аргона Ar на температуру ГЭ. Так проведен расчет и определена средняя температура по длине ГЭ в зависимости от времени с учетом охлаждения аргоном Ar осевого канала. При этом учитывалась разница значения проходящего через ГЭ тока (Рисунок 2.8).

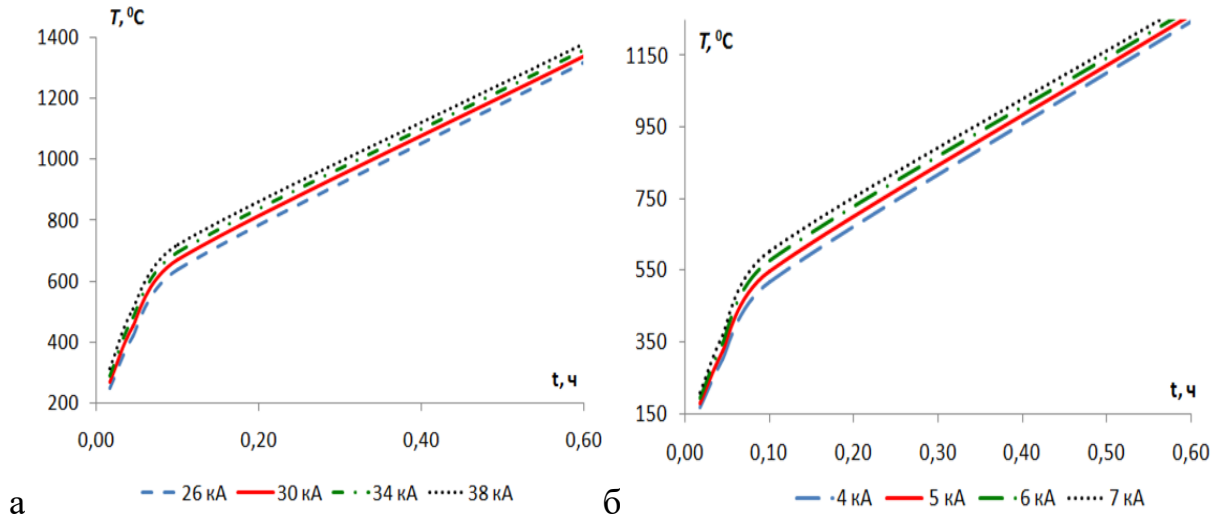


Рисунок 2.8 – Зависимость средней температуры ГЭ от времени работы печи при разных токах: а – ДСП-50, б – ДСП-6; охлаждающий газ – Ar [125]

Далее рассмотрим зависимости, представленные на рисунке 2.9а и 2.9б. На Рисунке 2.9а представлены результаты моделирования средней температуры полого ГЭ от объемного расхода, подаваемого в осевой канал Ar для ДСП-50. Установлено, что средняя температура поверхности ГЭ изменяется в пределах двух градусов.

Средняя температуры полого ГЭ в зависимости от значения тока показана на Рисунке 2.9б. С ростом тока дуги до 34 кА увеличивается и температура ГЭ на 90°C . Рассмотрим тепловые мощности, которые отдает ГЭ в результате охлаждения аргоном и при увеличении токовых нагрузок. Аргон Ar , отбирает от электрода тепловую мощность $P_T = C_p G_T \Delta t \approx 40$ кВт при нагреве до 1000°C . Тепловую мощность в ГЭ за счет джоулева тепловыделения, запишем как $P_3 = 4 \cdot I^2 \rho H / (\pi(D_H^2 - D_8^2))$ при токе дуги $I=30$ кА $P_3 \approx 43$ кВт. Ток дуги в большей степени влияет на температурное поле ГЭ. Связано это с тем, что процессы выделения тепла от тока внутри ГЭ распространяются по всему объему. В то время как

газ, используемый для охлаждения, снижает температуру только в осевом канале и не охлаждает наружную поверхность ГЭ.

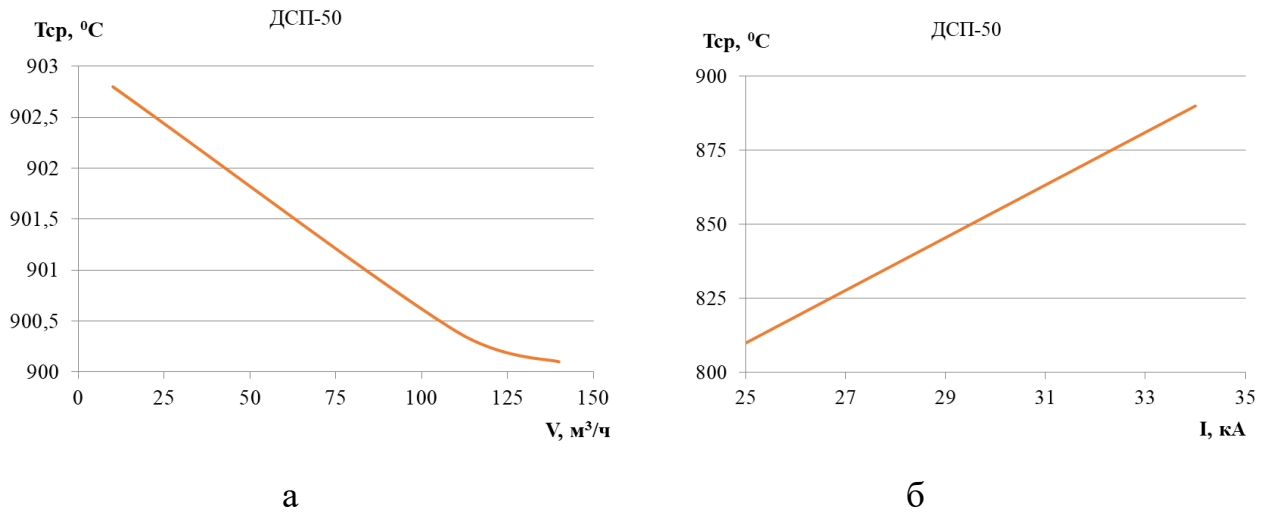


Рисунок 2.9 – Зависимость средней температуры ГЭ в ДСП-50 от объемного расхода аргона Ar (а) и тока дуги (б) при расходе $Ar = 113 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($G_T \approx 9,5 \text{ кг/ч}$) через 0,1 ч (6 минут) от начала плавки [125, 126]

Для определения температуры и скорости, рассматриваемых в данном разделе газов по длине осевого канала ГЭ был сделан расчет. Полученные данные сведены в графики и представлены на Рисунке 2.10.

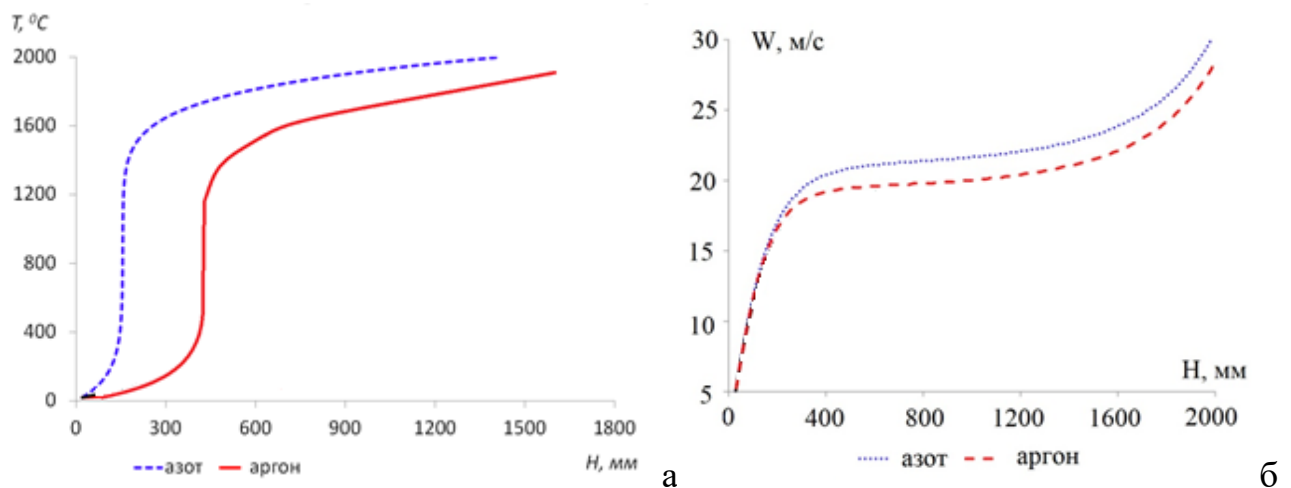


Рисунок 2.10 – Изменение температуры (а) и скорости (б) охлаждающего газа по длине осевого канала электрода ДСП-50 [125, 126]

При анализе зависимости температуры охлаждающего газа вдоль осевого канала ГЭ, зафиксировано, что все исследуемые газы нагреваются до температуры $\approx 1600^\circ\text{C}$ уже на расстоянии ≈ 500 мм от верхнего торца электрода (рисунок 2.10а). Из Рисунка 2.10б установлено, что все газы разгоняются до скорости 25–30 м/с при нагреве до 1800°C . Вдувание газов в осевой канал ГЭ приводит к стабилизации горения дуги.

2.5. Выводы по второй главе

1. Разработана ММ, обеспечивающая возможность комплексного анализа температурного поля ГЭ при охлаждении его осевого канала различными газами при заданных геометрических и технологических параметрах.

2. Разработана специальная компьютерная программа под названием «Тепловое состояние графитированного электрода при подаче охладителя в осевой канал».

С использованием программы проведено моделирование теплового состояния полого ГЭ для ДСП-6 и ДСП-50. В ходе последующего анализа полученных данных обнаружено, что [125–129]:

3. Газы (N_2 , Ar) быстро достигают высоких температур, которые сопоставимы с температурой ГЭ, поэтому охлаждение происходит в незначительной зоне только на начальном участке электрода.

4. Все газы разгоняются в 6–7 раз до скорости 25–30 м/с при нагреве до 1800°C . Это приводит к стабилизации горения дуги, дополнительному перемешиванию металла и шлака, а также снижению содержания кислорода в зоне торцевой части ГЭ.

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

6. Происходит незначительное снижение расхода ГЭ.

ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ И ДИНАМИКИ УГАРА ГРАФИТИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОДА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИСТЕМЫ ИСПАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

В данной главе исследовано тепловое состояние цельных ГЭ для дуговых печей разной вместимости. Для достижения поставленной задачи разработана ММ. По ММ создана компьютерная программа «Моделирование теплового состояния электрода ДСП», написанная на языке программирования *C++ Builder*. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №№2017617959. Рассмотрены ход и результаты моделирования теплового состояния ГЭ при подаче воды на их боковую поверхность. Приведены зависимости угара при разных расходах воды в зависимости от термической стойкости ГЭ, изменения толщины водяной пленки по высоте ГЭ при разных расходах воды и др. Сделаны соответствующие заключения.

3.1. Объект моделирования и принятые допущения

Объектом моделирования является ГЭ, выполненный в виде цилиндра диаметром $D = 2R$ и высотой H (Рисунок 3.1). Известна его начальная температура электрода T_0 . ГЭ опускают в печь ($\tau = 0$), зажигают дугу и начинается процесс его нагрева. Через время $\Delta\tau$ начинает функционировать система ИО, и вода с массовым расходом $V_{ж}$ начинает подаваться на боковую поверхность ГЭ. Эта вода, постепенно нагреваясь, испаряется и в процессе охлаждает ГЭ. Технологические параметры плавки, теплофизические свойства теплоносителя и материала ГЭ являются известными.

Требуется определить распределение температуры в ГЭ для момента времени $\tau > 0$ и изменение массы ГЭ во времени.

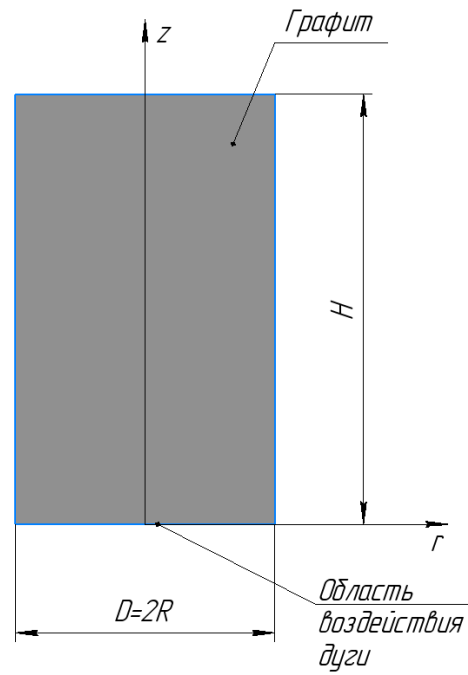


Рисунок 3.1 – Объект моделирования

Распределение температуры вдоль ГЭ зависит от теплового потока от дуги, теплообмена с окружающей печной атмосферой и водой, подаваемой на боковую поверхность, взаимодействия с футеровкой печи, а также от мощности внутренних источников тепла в ГЭ. Рассматриваемые тепловые потоки в ГЭ приведены на Рисунке 3.2.

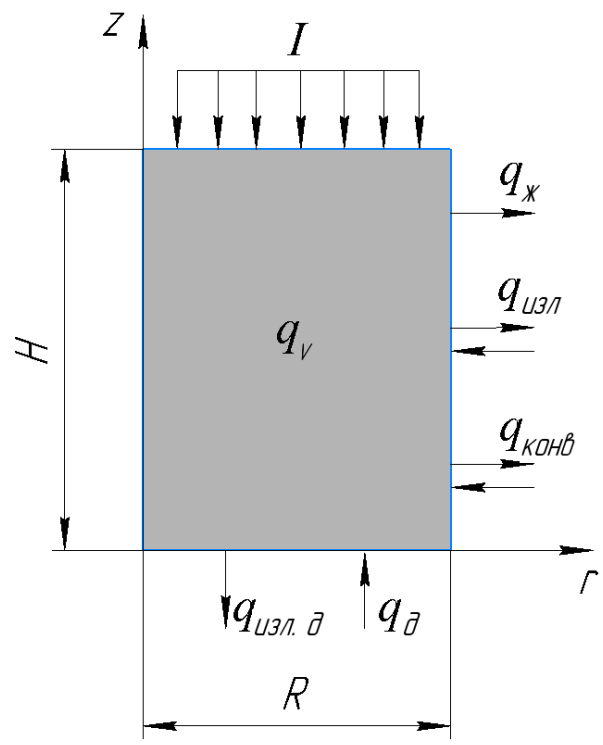


Рисунок 3.2 – Тепловые потоки, действующие на ГЭ

Модель теплового состояния электрода будем строить на основе следующего ряда допущений:

- 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.

3.2. Математическая модель теплового состояния графитированного электрода дуговой печи с учетом испарительного водяного охлаждения

Рассмотрим процесс нагрева ГЭ в цилиндрической системе координат, где ось OZ совмещена с осью цилиндра (см. Рисунок 3.1). Температурное поле является осесимметричным $\frac{\partial t}{\partial \varphi} = 0$, $\frac{\partial t}{\partial r} \neq 0$, $\frac{\partial t}{\partial z} \neq 0$.

Дифференциальное уравнения теплопроводности с учетом осевой симметрии температурного поля электрода в цилиндрической системе координат и источника объемного тепловыделения при прохождении тока для нестационарного процесса:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{c\gamma} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + \frac{q_v}{c\gamma}, \quad (3.1)$$

где $0 < r < R$, $0 < z < H$; c , γ – соответственно, удельная теплоемкость и плотность материала ГЭ;

$$q_v = \frac{16I_{\partial}^2 \rho}{\pi^2 D^4} - \text{объемная мощность внутренних источников тепла (за счет джоулева тепловыделения) в ГЭ;}$$

ρ – удельное электрическое сопротивление материала ГЭ;

I_{∂} – ток дуги.

I_{∂} – ток дуги.

Граничные условия:

1. На верхнем торце ГЭ ($0 \leq r \leq R, z = H$) тепловой поток равен нулю, т. к. считаем его теплоизолированным: $q = \lambda \frac{\partial T}{\partial z} = 0$;
2. На боковой поверхности ($r = R, 0 < z < H$) считаем, что теплоотдача определяется:
 - свободной конвекцией с атмосферой печи и излучением на боковые стенки для боковой поверхности, не охлаждаемой водой $-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = q_{изл} + q_{конв}$;
 - вынужденной конвекцией с водой посредством ИО $-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = q_{ж}$.
3. На нижнем торце электрода ($z = 0, 0 < r < R$) теплообмен определяется с учетом излучения с торца на футеровку печи и теплового потока от электрической дуги $q_{\partial} - q_{\partial}^{изл} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}$;
4. На оси симметрии ($r = 0, 0 < z < H$) имеем $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$.

Представленная выше краевая задача представляет собой модель теплового состояния электрода, и в дальнейшем будем приближенно находить распределение температур $t(r, z, \tau)$.

Тепловой поток, падающий на боковую поверхность ГЭ за счет свободной конвекции

$$q_{конв}(z) = \alpha_k(z)(T(R, z) - T_{окр}) \quad (3.2)$$

Коэффициент теплоотдачи α_k определяется по критериальному уравнению, описывающему свободную конвекцию около вертикальной пластины:

$$Nu_{(z)} = 0,6(Gr_{окр(z)} Pr_{окр})^{0,25} \left(\frac{Pr_{окр}}{Pr_c} \right)^{0,25}, \quad (3.3)$$

где $Nu_{(z)} = \frac{\alpha_k(z)z}{\lambda_{окр}}$ – число Нуссельта (безразмерный коэффициент теплоотдачи,

характеризует теплообмен на границе стенка-жидкость);

$$Gr_{окр(z)} = \frac{g\beta_{окр}\vartheta_c z^3}{\nu_{окр}^2} \text{ – число Грасгофа (характеризует подъемную силу,$$

возникающую в жидкости вследствие разности плотностей);

$$Pr_{окр} = \frac{\nu_{окр}}{a_{окр}}, Pr_c = \frac{\nu_c}{a_c} \text{ – числа Прандтля (мера подобия полей температур}$$

и скоростей) для температуры печной атмосферы и температуры боковой поверхности ГЭ.

В вышеприведенных комплексах $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; $\beta_{окр} = 1/273 \text{ град}^{-1}$ – температурный коэффициент объемного расширения газа печной атмосферы; $\vartheta_c = T_c - T_{окр}$ – разность местной температуры стенки и температуры окружающей среды; индексы $c, окр$ – параметры среды берутся при температуре стенки или печной атмосферы, соответственно.

Тепловой поток на боковой поверхности ГЭ за счет излучения

$$q_{изл} = C_0 \cdot E_{пр} \cdot \left[\left(\frac{T(R, z) + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_\phi + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (3.4)$$

где $E_{пр} = \frac{1}{1/\varepsilon_k + 1/\varepsilon_\phi - 1}$ – приведенная степень черноты; $\varepsilon_k, \varepsilon_\phi$ – степень

черноты соответственно поверхностей графитированного электрода и футеровки печи; T_ϕ – средняя температура боковой поверхности и свода футеровки печи;

$C_0 = 5,7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Известно, что в основной период работы печи электрическая дуга смещается к краю торца, в результате чего на крае торца тепловой поток q_∂ больше, чем в его середине. Поэтому тепловой поток от дуги на торец ГЭ примем равным

$$q_{\partial}(r) = \eta_{\partial} \bar{q} + 3 \cdot (1 - \eta_{\partial}) \bar{q} \left(\frac{r}{R} \right)^2, \quad (3.5)$$

где $\bar{q} = \frac{4I_{\partial}U_a}{\pi \cdot D^2}$ – средний тепловой поток на торце электрода; U_a – приэлектродное падение напряжения; η_{∂} – доля тепловой мощности дуги, выделяющейся в середине торца ГЭ (принимается $\eta_{\partial} = 0,3$).

Тепловой поток излучения от торца ГЭ

$$q_{\partial}^{изл}(r) = C_0 \cdot E_{np} \cdot \left[\left(\frac{T(r,0) + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\phi} + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (3.6)$$

Тепловой поток на боковой поверхности ГЭ за счет вынужденной конвекции с охлаждающей водой

$$q_{жс} = -\alpha_{нов} (T_{жс} - T_{нов}), \quad (3.7)$$

где $T_{нов}$ – температура боковой поверхности ГЭ; $T_{жс}$ – температура воды; $\alpha_{нов}$ – коэффициент теплоотдачи ИО.

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

- переданная к жидкости теплота затрачивается на испарение жидкости и поднимается вверх вместе с паром (процесс адиабатного испарения);
- тепловой поток к жидкости направлен от окружающей среды, а также от поверхности ГЭ;
- газ не насыщен паром в отдалении от жидкости, возникает поток вещества, направленный от поверхности испарения;
- теплотой нагрева жидкости до температуры испарения пренебрегаем и принимаем $T_{жс} = 100^{\circ}C$;
- вода имеет постоянную скорость W_0 при движении вниз по стенке ГЭ (рисунок 3.3).

Учитывая вышеизложенное, имеем

$$\alpha_{нов}(T_{жс} - T_{нов}) + q_{окр} = \psi J, \quad (3.8)$$

где $q_{окр}$ – тепловой поток излучения и конвекции на поверхность воды со стороны печи; ψ – теплота парообразования; J – поток массы испаряющейся воды.

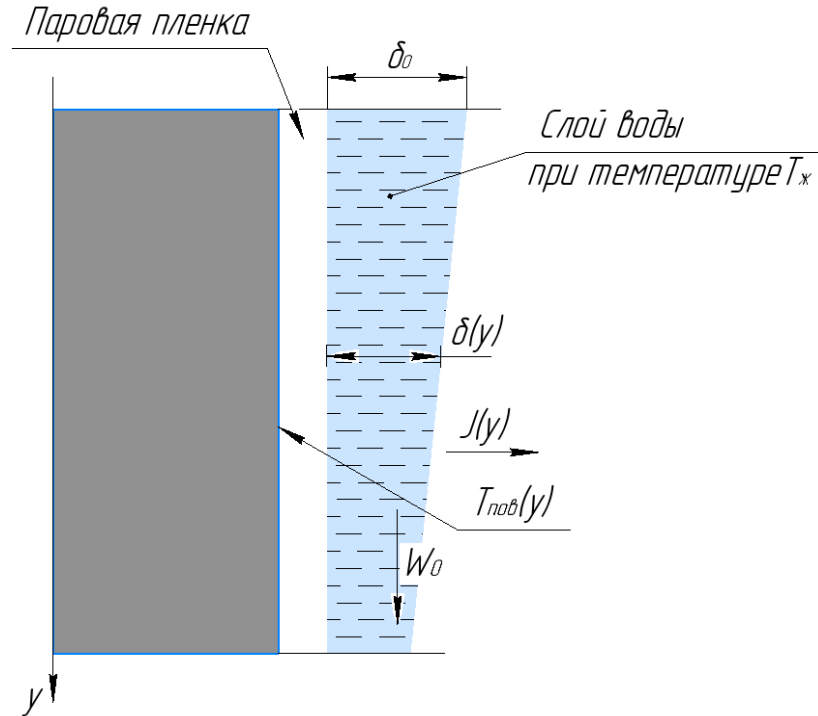


Рисунок 3.3 – Схема тепломассообмена при испарении воды с боковой поверхности электрода

Толщина водяной пленки δ меняется за счет испарения как

$$\frac{d\delta(y)}{d\tau} = -\frac{J(y)}{\gamma_{жс}}, \quad (3.9)$$

где $J(y)$ – поток массы пара по длине ГЭ; $\gamma_{жс}$ – плотность воды; τ – время нахождения воды в печи; $y = H - z$.

Считаем скорость стекания воды по паровой пленке постоянной, соответственно, получим

$$W_0 = \frac{dy}{d\tau}, \quad (3.10)$$

Рассматривая совместно (3.8), (3.9) и (3.10), получим

$$\frac{d\delta(y)}{dy} = -\frac{\alpha_{нов}(T_{нов} - T_{жс}) + q_{окр}}{\psi W_0 \gamma_{жс}}. \quad (3.11)$$

Для решения дифференциального уравнения (3.11) зададим граничные условия: $\delta|_{y=0} = \delta_0$, где $\delta_0 = \frac{V_{жс}}{\pi DW_0}$ – толщина пленки воды в области ее подачи.

С учетом принятых допущений тепловой поток на поверхность воды за счет излучения и конвекции определяется по формуле:

$$q_{окр} = C_0 \cdot E_{нр} \cdot \left[\left(\frac{t(R, z) + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{ф} + 273}{100} \right)^4 \right] + \alpha_{нов}(t_{нов} - t_{жс}), \quad (3.12)$$

где $E_{нр} = 1 / \left(\frac{1}{\varepsilon_{жс}} + \frac{1}{\varepsilon_{ф}} - 1 \right)$ – приведенная степень черноты, где $\varepsilon_{жс}$ – степень черноты воды.

Данные для определения зависимости коэффициента теплоотдачи $\alpha_{нов}$ от разности температур нагреваемой поверхности электрода и охлаждающей ее воды ΔT при атмосферном давлении взяты из работы [7]. Эти значения сведены в таблицу и на основе нее получены уравнения аппроксимации:

$$\lg \alpha_{нов} = \begin{cases} 0,3578 \lg \Delta T + 3,0397, & \text{при } 0,1 \leq \Delta T \leq 6, \\ 1,6691 \lg^2 \Delta T - 1,2071 \lg \Delta T + 3,2238 & \text{при } 6 < \Delta T \leq 20, \\ -0,9846 \lg^2 \Delta T + 1,3219 \lg \Delta T + 4,4551 & \text{при } 20 < \Delta T \leq 100, \\ -0,0645 \lg \Delta T + 3,3569 & \text{при } 100 < \Delta T \leq 1000 \end{cases} \quad (3.13)$$

График экспериментальной зависимости скорости окисления ГЭ на открытом воздухе от температуры его поверхности взят также из работы [7]. Данные с него были сведены в таблицу и по ним получено уравнение аппроксимации:

$$V(T) = \psi \cdot 10^{a \lg(T)^2 + b \lg(T) + c}, \quad \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{час}), \quad (3.14)$$

где $a = 4,9627$; $b = -23,836$; $c = 27,167$, T – температура, K ; $\psi = 0,1-1$ – коэффициент термической стойкости ГЭ. Чем меньше значение ψ , тем стойкость ГЭ к окислению и сублимации выше. Зная $V(T)$, можно определить выражение для линей-

ной скорости уноса материала ГЭ $v(T) = \frac{V(T)}{3600\rho_T}$ м/с, где ρ_T – плотность графита.

При известном тепловом состоянии электрода можно определить скорость угара за счет окисления и сублимации боковой поверхности ($r = R$)

$$V_{бок} = \frac{dm}{d\tau} = \int_F V(T) dF = 2\pi R \int_0^H V(T) dz, \text{ кг/час,} \quad (3.15)$$

Аналогично, скорость угара нижнего торца электрода ($z = 0$)

$$V_{тор} = \frac{dm}{d\tau} = \int_F V(T) dF = 2\pi \int_0^R V(T) r dr, \text{ кг/час,} \quad (3.16)$$

Суммарная скорость уноса одного ГЭ

$$V_{\Sigma} = V_{бок} + V_{тор}. \quad (3.17)$$

3.3. Моделирование теплового состояния графитированного электрода дуговых печей разной вместимости и анализ полученных результатов

Для теоретического анализа эффективности использования ИО водой боковой поверхности ГЭ проведено моделирование температурного поля электродов в дуговых печах разной вместимости трехфазного и постоянного тока. Расчеты проводили в компьютерной программе «Моделирование теплового состояния электрода ДСП» созданная по ММ, описанной выше. Программа написана в среде разработки и проектирования Borland C++ Builder. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017617959 [130].

Программа предназначена для определения теплового состояния ГЭ дуговой печи. Определяется 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.

Так, первым объектом исследования были выбраны плавильные агрегаты, используемые в «большой» металлургии – ДСП и ДППТ вместимостью 80–200 т. Параметры для расчетов приведены в Таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры для расчета теплового состояния ГЭ

Параметр	Единица измерения	Значение для ДСП и ДППТ 80 – 200
Геометрические данные		
Диаметр ГЭ	мм	610
Длина ГЭ	мм	2100
Теплофизические свойства ГЭ		
Удельная теплоемкость	кДж/(кг·К)	2,1
Плотность	кг/м ³	1700
Степень черноты графита	–	0,71
Удельное электрическое сопротивление	мкОм·см	5
Коэффициент теплопроводности	Вт/(м·°С)	120
Технологические параметры печи		
Значение тока дуги	кА	16
Приэлектродное падение напряжения на дуге	В	8
Рабочая температура футеровки	°С	1400
Степень черноты футеровки	–	0,93
Температура печных газов	°С	1200
Время включения ИО после ввода холодных ГЭ	с	60
Параметры охлаждающей воды		
Начальная температура	°С	20
Степень черноты	–	0,5
Теплота парообразования	МДж/кг	2,3
Плотность	кг/м ³	1000
Скорость стекания по ГЭ	м/с	0,3
Расход	м ³ /ч	0 – 1,5

Адаптация параметров созданной компьютерной модели проводилась для повышения ее адекватности по производственным данным об удельном расходе ГЭ [131–135]. Полученные данные сведены в графики, представленные на Рисунке 3.4. Проведен анализ зависимости угара ГЭ от вместимости дуговых печей трехфазного и постоянного тока при работающей и отключенной системе ИО [136]. Установлено, что при значении расхода воды 0 м³/ч, т. е. отключенной системе охлаждения, наблюдается разница в 20–30% между литературными и рас-

четными данными расхода ГЭ. Это связано в первую очередь с тем, что источники информации являются разнородными. Во многих нет информации по режимам работы дуговых печей, какие учитывались статьи расхода ГЭ и т. д. Вместе с тем 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.

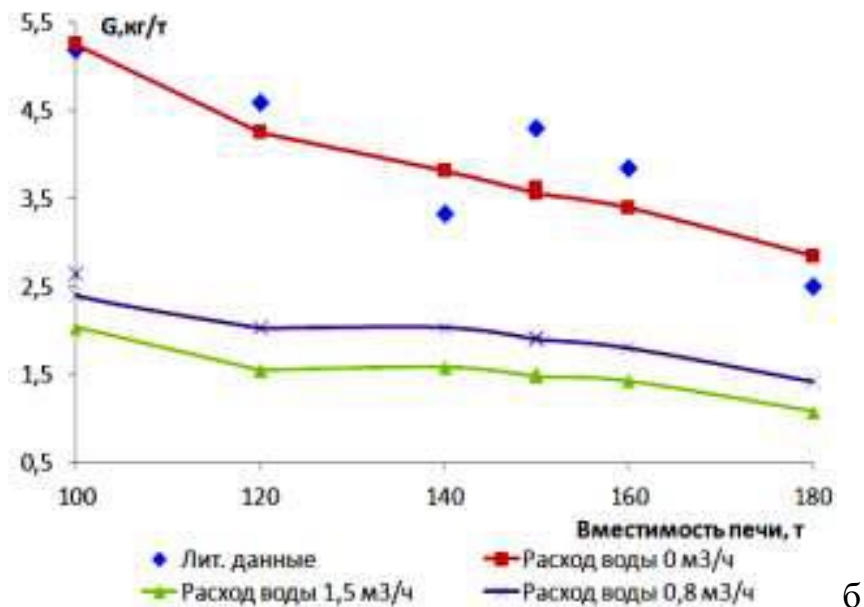
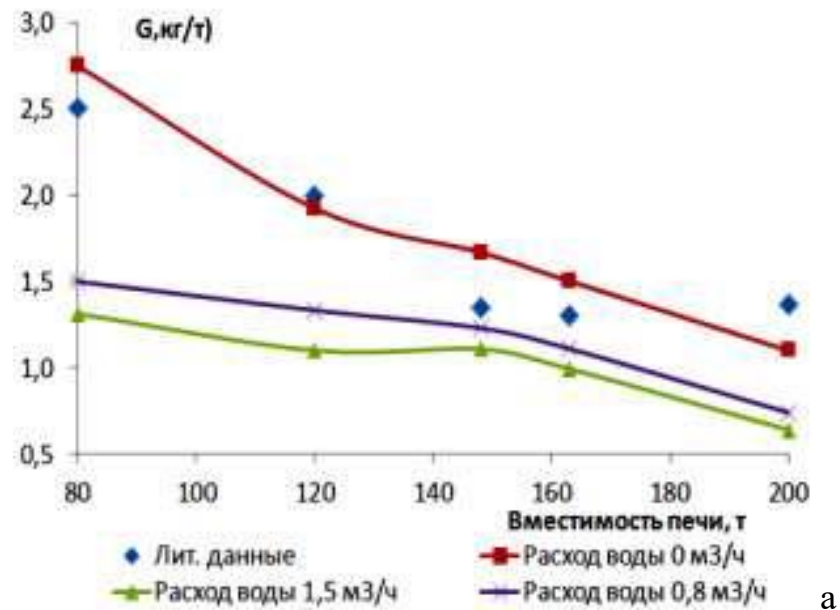


Рисунок 3.4 – Удельный расход ГЭ в зависимости от вместимости печей при наличии и отсутствии испарительного охлаждения:

а – для ДППТ; б – для ДСП [136]

В результате проведенного моделирования [136] было 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. Угар ГЭ снижается ориентировочно в 2,7 раза при расходе воды на охлаждение равном $1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$. 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 «Магнитогорский металлургический комбинат». На протяжении уже более 13 лет на предприятии успешно работает ДСП-180 производства фирмы VAI Fuchs с встроенной системой ИО [137]. Также система ИО успешно используется на ОАО «Белорусский металлургический завод» в ДСП-100. По данным наблюдения специалистов предприятия, принудительное охлаждение водой ГЭ обеспечило снижение их удельного расхода и уменьшило себестоимость выпуска стали на 5% [138].

Опираясь на вышеописанный положительный опыт применения систем ИО для крупных дуговых печей вместимостью более 80 т, было решено провести исследование по влиянию принудительного охлаждения водой ГЭ для малотоннажных печей вместимостью от 0,5 до 25 т. 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.

Параметры для моделирования теплового состояния ГЭ печей малой вместимости сведены в Таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Параметры для расчета теплового состояния ГЭ

Параметр	Единица измерения	Значение для ДСП–3	Значение для ДСП–6	Значение для ДСП–12 /ДППТ–12
Геометрические данные				
Диаметр ГЭ	мм	250	250	350
Длина ГЭ	мм	1800	1500	1800
Теплофизические свойства ГЭ				
Удельная теплоемкость	кДж/(кг·К)	2,1	2,1	2,1
Плотность	кг/м ³	1700	1700	1700
Степень черноты графита	–	0,71	0,71	0,71
Удельное электрическое сопротивление	мкОм·см	5	5	5
Коэффициент теплопроводности	Вт/(м·°С)	120	120	120
Технологические параметры печи				
Значение тока дуги	кА	4,8	6,0	6,4 / 16
Начальная температура ГЭ	°С	20	20	20
Приэлектродное падение напряжения на дуге	В	8	8	8
Рабочая температура футеровки	°С	1400	1400	1400
Степень черноты футеровки	–	0,93	0,93	0,93
Температура печных газов	°С	1200	1200	1200
Время включения ИО после ввода холодных ГЭ	с	0–420	0–60	0–120
Параметры охлаждающей воды				
Начальная температура	°С	20	20	20
Степень черноты	–	0,5	0,5	0,5
Теплота парообразования	МДж/кг	2,3	2,3	2,3
Плотность	кг/м ³	1000	1000	1000
Скорость стекания по ГЭ	м/с	0,3	0,3	0,3
Расход	м ³ /ч	0 – 0,3	0 – 0,3	0 – 0,6

В результате моделирования теплового состояния ГЭ для ДСП–3 [128, 139] получена зависимость угара ГЭ от времени под током при наличии и отсутствии ИО, представленная на Рисунке 3.5.

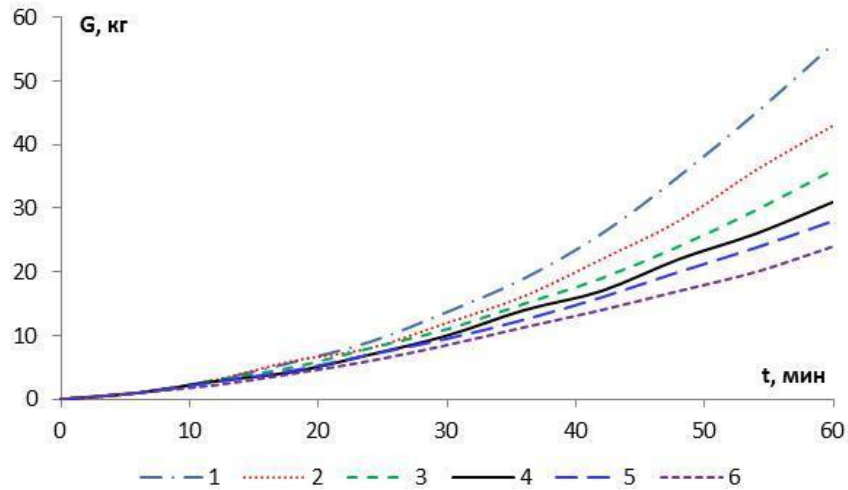


Рисунок 3.5 – Угар ГЭ от времени нахождения его в печи ДСП–3 под током при наличии и отсутствии испарительного охлаждения при разных расходах воды, м³/ч: 1 – 0; 2 – 0,05; 3 – 0,1; 4 – 0,15; 5 – 0,2; 6 – 0,3 [128, 139]

Установлено, что угар ГЭ сокращается на 20% при подаче воды с расходом 0,1 м³/ч. При увеличении расхода до 0,2 м³/ч угар ГЭ снижется приблизительно в 2 раза. Также проведена оценка влияния толщины водяной пленки на эффективность охлаждения боковой поверхности ГЭ. В результате получена зависимость, представленная на Рисунке 3.6.

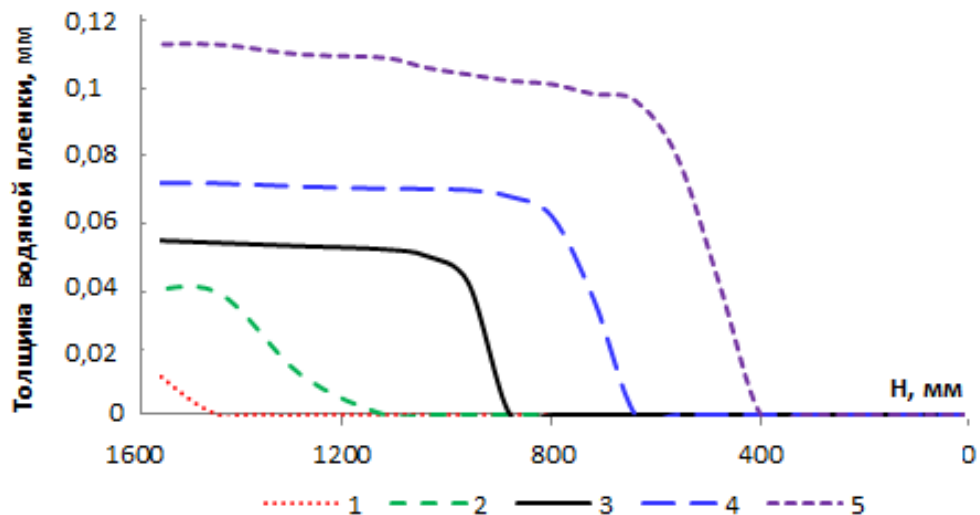


Рисунок 3.6 – Зависимость толщины водяной пленки по высоте ГЭ в ДСП–3 при разных расходах воды, м³/ч: 1 – 0,05; 2 – 0,1; 3 – 0,15; 4 – 0,2; 5 – 0,3 [139]

Установлено, что с ростом расхода воды увеличивается толщина водяной пленки и длина зоны воздействия ИО. Вода эффективно защищает ГЭ от влияния

излучения дуги, футеровки печи и конвекции печных газов. Также было выявлено, что ИО еще холодного ГЭ не безопасно и не рационально, т. к. вода, стекающая по ГЭ, не испаряется и может попасть в лом. В этой связи начинать охлаждение для ДСП–3 следует не ранее, чем через 6 минут после подачи тока на ГЭ.

Важно понимать, что энергия, затраченная на испарение воды, имеет прямое влияние на эффективность процесса. Поэтому стоит учесть, что при охлаждении трех электродов ДСП-3 и подаче $0,1 \text{ м}^3/\text{ч}$ воды, на ее испарение требуется дополнительная энергия в размере 690 Мдж, что эквивалентно 192 кВт·ч. В связи с этим существует рациональный расход воды, который приводит к наиболее эффективному использованию системы ИО. Он определяется исходя из стоимости потраченных ресурсов.

Расчет выглядит приведенным ниже образом. Экономию расхода ГЭ при использовании ИО можно записать как:

$$\Delta G = G(V_B) - G_0, \quad (3.18)$$

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 рассчитываем следующим образом:

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta G \cdot C_r - V \cdot E_1 \cdot C_э, \text{ руб./ч}, \quad (3.19)$$

где C_r – цена ГЭ, руб./кг; $E_1 = 675 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ – количество электроэнергии, которая требуется для испарения 1 м^3 воды; $C_э$ – цена электроэнергии, руб./кВт·ч.

Для того чтобы рассчитать скорость термического уноса графита, использована зависимость 3.14, предложенная в работе [128].

$$V(T) = \psi \cdot 10^{a \lg(T)^2 + b \lg(T) + c}, \text{ кг}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}, \quad (3.20)$$

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

В результате расчетов по формуле 3.18 получены зависимости уменьшения расхода ГЭ от расхода воды при различных коэффициентах термической стойкости ГЭ ψ (Рисунок 3.7).

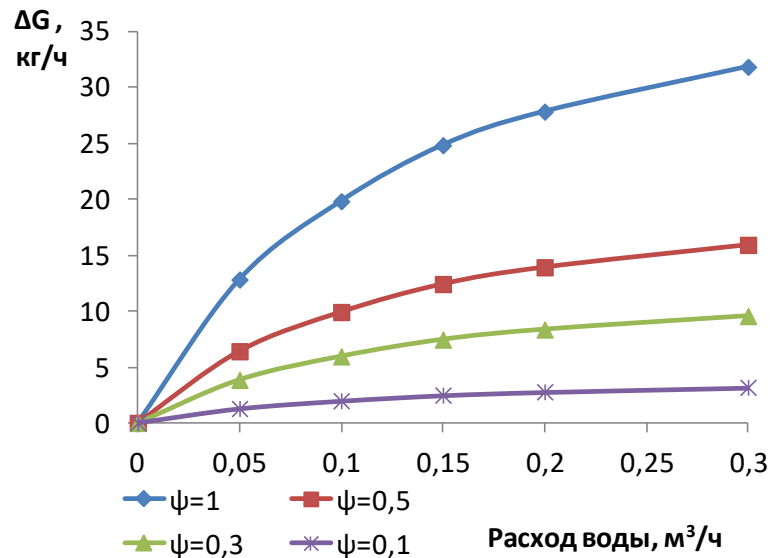


Рисунок 3.7 – Снижение расхода ГЭ при разных расходах воды для ДСП–3 в зависимости от термической стойкости ГЭ [128]

Видно, что чем меньше значение ψ , тем ниже расход электродов.

Для оценки эффективности ИО взяты предполагаемые ценовые характеристики цеха: стоимость ГЭ $C_r = 300$ руб./кг, стоимость 1 кВт·ч – $C_{\text{э}} = 3\text{--}5$ руб. Исходя из расчетов были построены графики, представленные на рисунке 3.8.

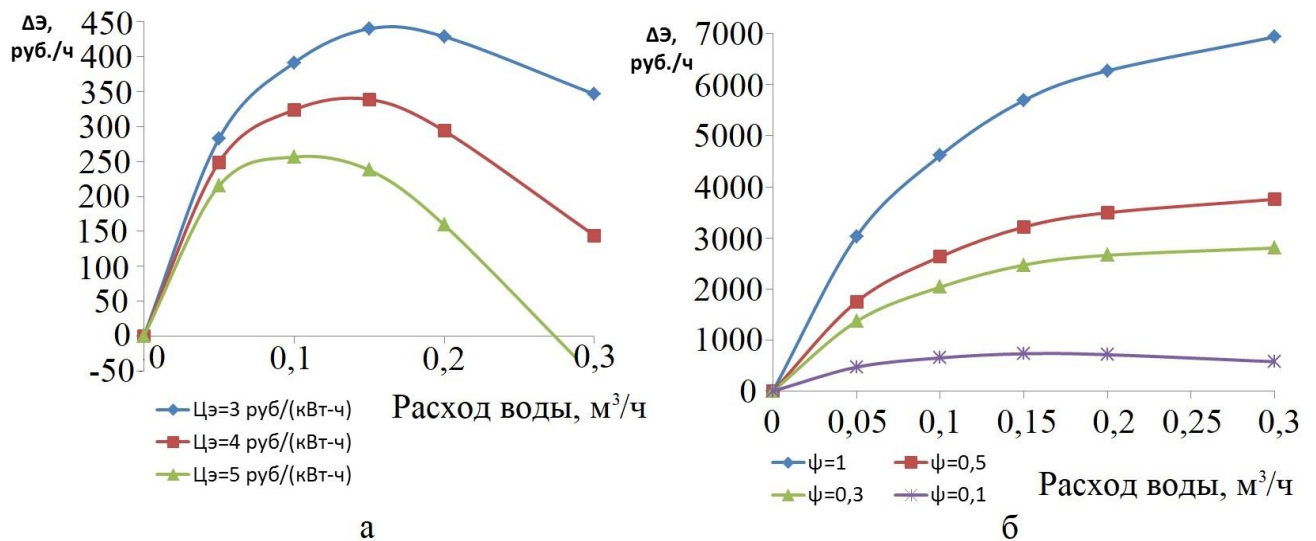


Рисунок 3.8 – Зависимость суммарной удельной экономии средств для ДСП–3 от расхода охлаждающей воды: а – при $\psi = 0,1$, $C_r = 300$ руб./кг, для разной стоимости 1 кВт·ч электроэнергии; б – при фиксированной цене электроэнергии ($C_{\text{э}} = 5$ руб./кВт·ч) и при разной термической стойкости используемого графита (при разной его стоимости) [128]

Зависимость, представленная Рисунком 3.8а показывает некий рациональный расход, составляющий $0,1-0,15 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($\sim 45\%$). Такой расход воды обеспечивает максимальную эффективность использования системы ИО. На Рисунке 3.8б представлен график зависимости удельной экономии средств от расхода охлаждающей воды в определенных условиях. Так, цена электроэнергии составляет $5 \text{ руб.}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$, цена ГЭ зависит от их качества и составляет $C_2 = 500 \text{ руб.}/\text{кг}$, $\psi = 0,1$; $C_2 = 400 \text{ руб.}/\text{кг}$, $\psi = 0,3$; $C_2 = 300 \text{ руб.}/\text{кг}$, $\psi = 0,5$; $C_2 = 250 \text{ руб.}/\text{кг}$, $\psi = 1$. Анализируя данный рисунок сделан вывод, что суммарная удельная экономия средств растет со снижением качества ГЭ и увеличением значения расхода воды. Моделирование показывает, что существует рациональный расход воды, поддерживая который, возможно снизить угар ГЭ на тонну металла и затраты электроэнергии.

Для ДСП-6 моделирование теплового состояния ГЭ было проведено [129] с учетом эмпирического коэффициента термической стойкости электродов ψ , впервые опубликованного в работе [128] (Рисунок 3.9).

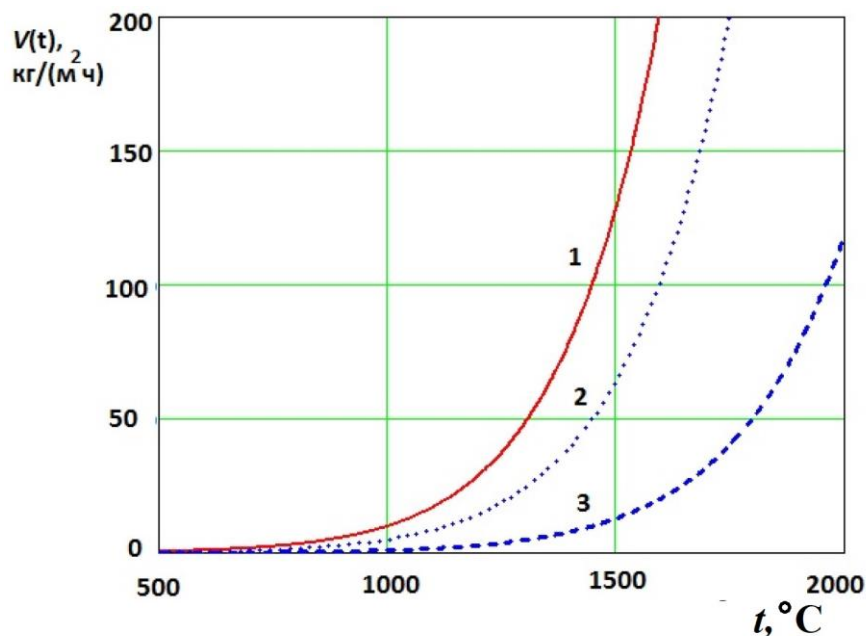
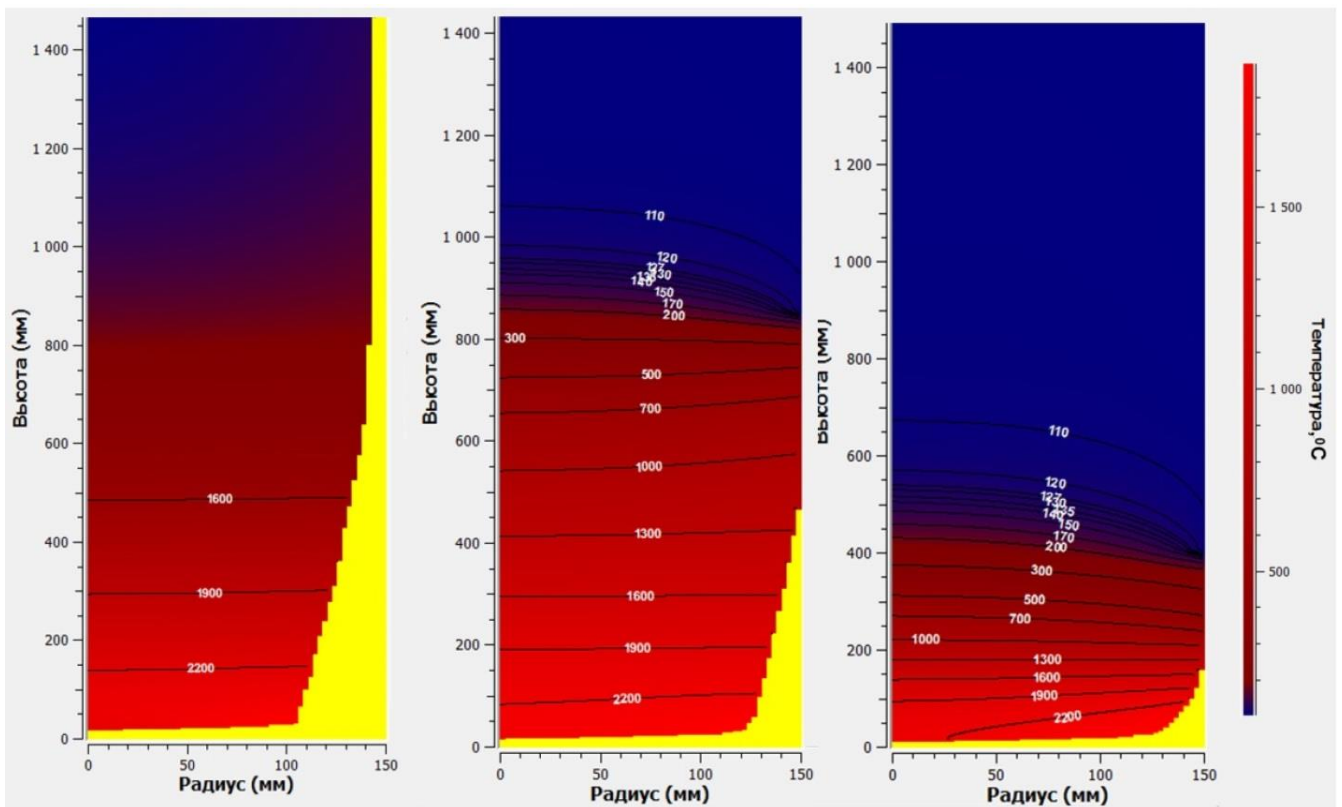


Рисунок 3.9 – Зависимость потока массы с поверхности ГЭ для ДСП-6 в связи с термическим износом от температуры при различной термической стойкости материала ψ : 1 – $\psi = 1$; 2 – $\psi = 0,5$; 3 – $\psi = 0,1$ [129]

На Рисунке 3.10 представлена диаграмма распределения температуры по поверхности ГЭ для ДСП-6 с учетом принудительного испарительного охлаждения при разных значениях расхода воды. Коэффициент термической стойкости для расчета $\psi = 1$. Синяя зона на диаграмме отвечает за температуру 150°C , красная $150\text{--}2200^{\circ}\text{C}$, желтая обозначает угар графита. Видно, что при увеличении расхода воды до $0,3 \text{ м}^3/\text{ч}$, длина синей зоны на диаграмме тоже растет, а красная и желтая сокращаются, что подтверждает положительный эффект от применения ИО для ДСП-6.



а

б

в

Рисунок 3.10 – Тепловое состояние и угар ГЭ при разных расходах воды на испарительное охлаждение для ДСП-6: а – $0 \text{ м}^3/\text{ч}$; б – $0,1 \text{ м}^3/\text{ч}$; в – $0,3 \text{ м}^3/\text{ч}$. Желтым цветом представлен угар материала ГЭ. Время нахождения печи под током – 1 ч, коэффициент термической стойкости материала ГЭ $\psi=1$ [129]

На Рисунках 3.11а и 3.11б представлены графики зависимости расхода ГЭ от времени работы ДСП-6 и расхода воды на охлаждение, соответственно. Установлено, что расход воды на ИО, составляющий $0,05 \text{ м}^3/\text{ч}$, приводит к снижению

угара ГЭ в ДСП-6 на 25–30%. Расчет для коэффициента термической стойкости $\psi = 1$, т. е. для некачественного электрода.

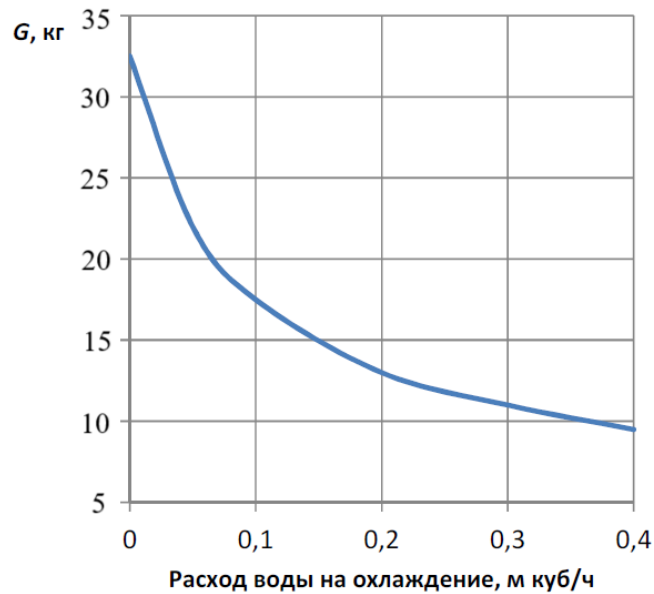
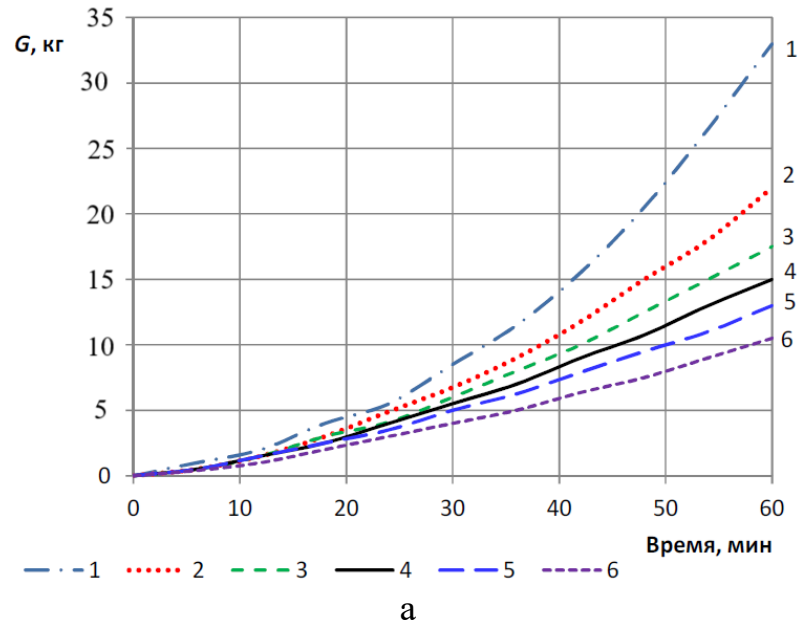


Рисунок 3.11 – Уменьшение массы ГЭ при $\psi = 1$: а – от времени его нахождения в ДСП-6 под током при различных расходах воды на ИО, м³/ч:

1 – 0; 2 – 0,05; 3 – 0,1; 4 – 0,15; 5 – 0,2; 6 – 0,3;

б – от расхода воды на ИО в момент времени, равный 1 ч [129]

Помимо этого, проведен анализ влияния толщины стекающей водяной пленки по длине ГЭ ДСП-6 от нижнего торца при разных расходах воды на снижение его температуры. График представлен на Рисунке 3.12.

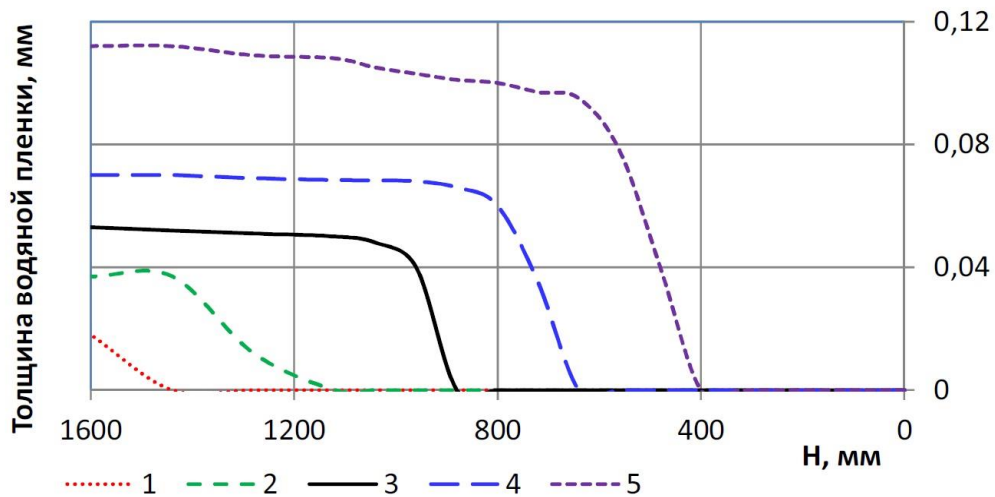


Рисунок 3.12 – Изменение толщины водяной пленки по высоте ГЭ в ДСП-6 при разных расходах воды, м³/ч: 1 – 0,05; 2 – 0,1; 3 – 0,15; 4 – 0,2; 5 – 0,3 [129]

Установлено, что с ростом значения расхода воды наблюдается увеличение как толщины, так и длины водяной пленки, что, в свою очередь, влияет на зону воздействия ИО на ГЭ. Известно, что с повышением расхода воды, расход ГЭ снижается, но эта зависимость, как показано на Рисунке 3.11б нелинейная и постепенно эффективность этой зависимости снижается. Помимо этого, при превышении определенного расхода воды и повышении ее температуры, пленка на стенке ГЭ перестает удерживаться за счет эффекта поверхностного натяжения. Исходя из этого понятно, что существует ограничение по расходу воды, которую можно использовать для ИО.

Также проведен расчет для ДСП-6 реальной эффективности использования ИО с учетом затраченной электроэнергии, требуемой для испарения воды с поверхности ГЭ. При использовании ИО экономия расхода ГЭ рассчитана по формулам (3.18–3.20).

В модель (3.18) была включена зависимость стоимости ГЭ от их термической стойкости ψ , которая определяет их качество и стоимость. Для расчета возьмем следующие значения:

при $\psi = 0,1$, $C_r = 600$ руб./кг;

при $\psi = 0,3$, $C_r = 400$ руб./кг;

при $\psi = 0,5$, $C_r = 300$ руб./кг;

при $\psi = 1$, $C_r = 200$ руб./кг.

Получаем уравнение аппроксимации в виде квадратичной зависимости:

$$C_r(\psi) = 651,67 \cdot \psi^2 - 1153,1 \cdot \psi + 702,76, \text{ руб./кг.}$$

В результате расчетов была построена зависимость (Рисунок 3.13) суммарной удельной экономии средств от расхода воды при разной термической стойкости ГЭ и стоимости электроэнергии.

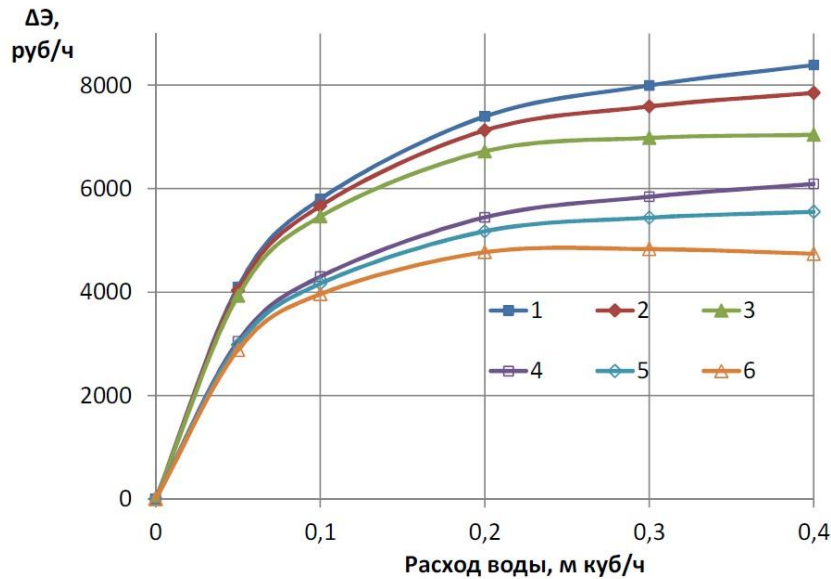


Рисунок 3.13 – Зависимость суммарной экономии средств от расхода воды при разной термической стойкости ГЭ и стоимости электроэнергии: 1– $\psi = 1$, $C_э = 3$ руб./кВт·ч); 2– $\psi = 1$, $C_э = 5$ руб./кВт·ч); 3– $\psi = 1$, $C_э = 8$ руб./кВт·ч); 4– $\psi = 0,5$, $C_э = 3$ руб./кВт·ч); 5– $\psi = 0,5$, $C_э = 5$ руб./кВт·ч); 6– $\psi = 0,5$, $C_э = 8$ руб./кВт·ч) [129]

Исследование показывает, что рациональный расход воды для данной задачи составляет от 0,2 до 0,3 м³/ч. При увеличении расхода наблюдается незначительный рост экономии $\Delta Э$, а в некоторых случаях даже ее снижении. Также при решении задачи оптимизации $\Delta g(V, \psi) \cdot C_r(\psi) - V \cdot E_1 \cdot C_э = \max$, с ограничениями $0,1 \leq \psi \leq 1$ и $0 \leq V \leq 0,4$ (м³/ч), $3 \leq C_э \leq 8$ (руб./кВт·ч)) было обнаружено, что для ДСП–6, с учетом использования системы ИО, наиболее целесообразно применять ГЭ низкого качества.

Далее для проведения моделирования были выбраны плавильные агрегаты вместимостью 12 т и примерно одинаковой электрической мощностью, это ДСП–12 и ДППТ–12. Для ДСП–12 напряжение на дугах $U_d^* = 100–250$ В; для ДППТ–12

напряжение на дуге $U_d = 120\text{--}300$ В, т. е. напряжение на дуге постоянного тока немного выше, чем переменного $U_d / U_d^* \approx 1,2$.

Мощность, выделяемая в дуге ДППТ, определяется как $P_o = I_d U_d$, а мощность на трех дугах ДСП – $P_o = 3 \cdot I_d^* U_d^*$, где $I_d = 16$ кА – номинальный ток дуги ДППТ; I_d^* – активная составляющая номинального тока дуги ДСП. При одинаковой мощности рассматриваемых печей получим $I_d^* = 1,2 I_d / 3 \approx 6,4$ кА.

Проведенные расчеты теплового состояния электрода [126, 127, 140, 141] позволили получить зависимость расхода ГЭ от времени работы дуговой печи при различных расходах воды на ИО для двенадцати тонных печей ДСП–12 и ДППТ–12 (Рисунок 3.14). В результате определено, что при расходе воды $0,6$ м³/ч снижение угара ГЭ происходит ориентировочно в 1,5 раза для рассматриваемых печей одинаково.

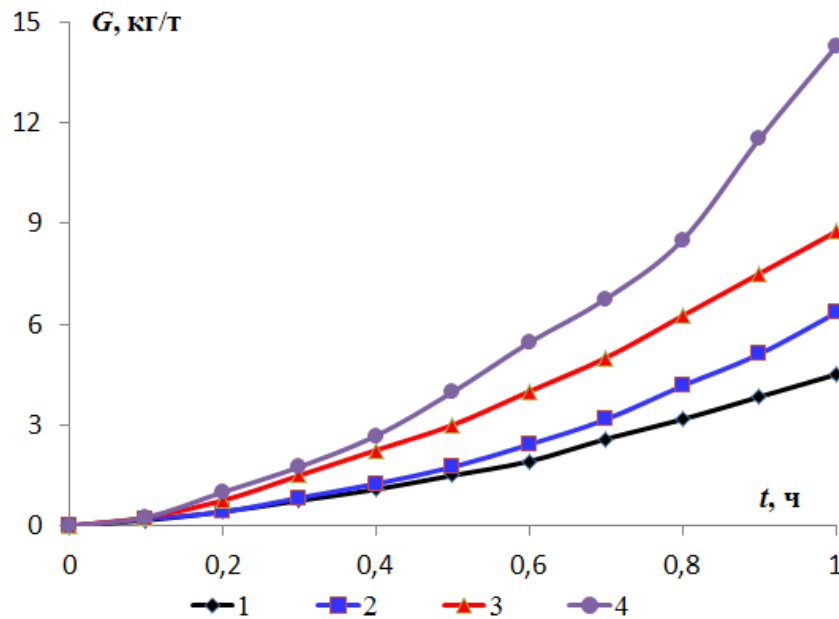


Рисунок 3.14 – Угар ГЭ от времени его нахождения в печи под током при наличии и отсутствии ИО:

для печи ДППТ-12: 1 – расход воды $0,6$ м³/ч; 2 – расход воды 0 м³/ч; для печи ДСП-12: 3 – расход воды $0,6$ м³/ч, 4 – расход воды 0 м³/ч [126, 140, 141]

Для определения рационального расхода подаваемой воды и времени включения системы ИО получены соответствующие графики для ДППТ-12 (Ри-

сунок 3.15, Рисунок 3.16). Из Рисунок 3.15 очевидно, что толщина пленки воды и зона теплового воздействия ИО увеличиваются при увеличении расхода воды. Рисунок 3.16 представляет зависимость угара графита от времени включения системы ИО. Было определено, что в течение первой минуты после начала подачи тока расход ГЭ не зависит от момента включения системы ИО. Однако, начиная со второй минуты, с увеличением задержки включения системы ИО, угар ГЭ растет.

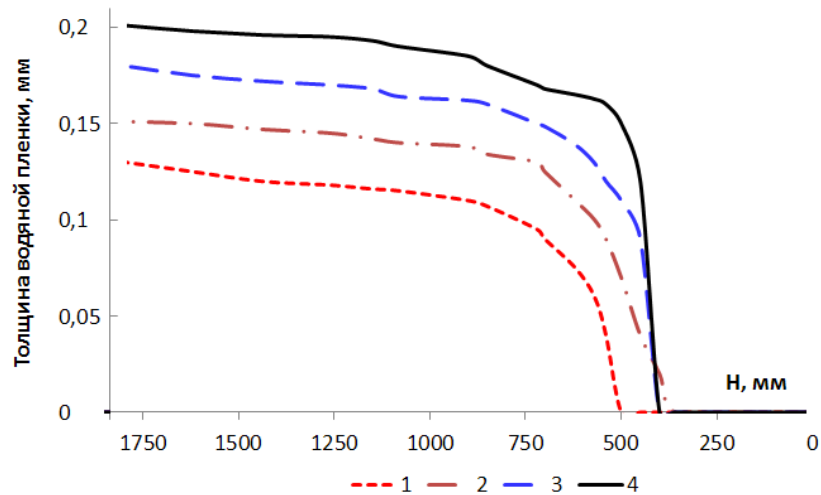


Рисунок 3.15 – Изменение толщины водяной пленки по высоте ГЭ в ДППТ-12 при разных расходах воды на его охлаждение:

1 – 0,5 м³/ч; 2 – 0,6 м³/ч; 3 – 0,7 м³/ч; 4 – 0,8 м³/ч [140, 141]

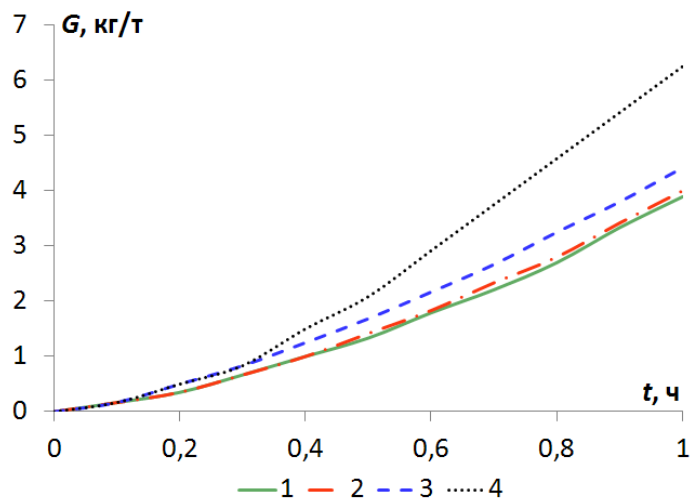


Рисунок 3.16 – Расход ГЭ в зависимости от момента включения водяного охлаждения в ДППТ-12:

1 – через 0,08 мин, 2 – 1 мин, 3 – 2 мин, 4 – 5 мин [126, 140, 141]

Далее моделирование теплового состояния ГЭ было проведено для ДСП-6, ДСП-12 и ДСП-25 [142]. Технические характеристики этих печей были взяты из источника [143]. Результаты расчетов были объединены с уже имеющимися описанными выше и сведены в графики расхода ГЭ от расхода подаваемой в систему ИО воды, представленные на Рисунке 3.17.

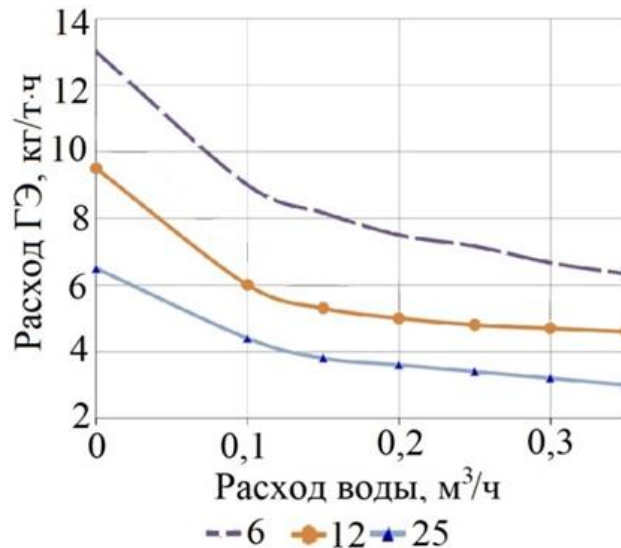


Рисунок 3.17 – Расход ГЭ на тонну стали в зависимости от расхода подаваемой в систему ИО воды для дуговых печей вместимостью 6; 12 и 25 т при $\psi=1$ [142]

Установлено, что использование системы ИО для всех исследуемых дуговых печей приводит к существенному снижению их расхода. Видно, что чем меньше вместимость печи, тем выше потребление ГЭ. При расходе воды более 0,2 м³/ч снижение расхода ГЭ становится несущественным.

На Рисунке 3.18 представлена зависимость потребления ГЭ от вместимости дуговой печи при отсутствии или наличии ИО с расходом воды 0,1 м³/ч. При вместимости печей 6 т, наблюдается снижение потерь ГЭ примерно на 28%. Для печей вместимостью 25 т снижение потерь ГЭ составляет около 11,5%. Данные расчеты приведены с учетом коэффициента термической стойкости равном 1, т.е. для электродов низкого качества. Также установлено, что подача воды в систему ИО наиболее эффективна в период с 3 по 5 минуту после подачи тока на электрод.

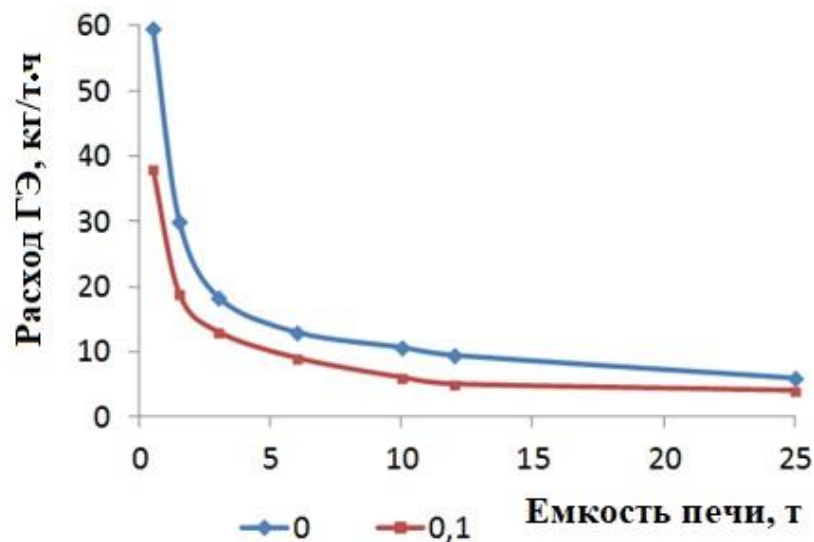


Рисунок 3.18 – Расход ГЭ на тонну стали в зависимости от вместимости дуговой печи: 1 – расход воды 0 м³/ч, 2 – расход воды 0,1 м³/ч [142]

3.4. Выводы по третьей главе

1. Разработана ММ с решением, основанном на численном методе конечных разностей. ММ позволяет анализировать тепловое состояние ГЭ и унос графита с течением времени для ДСП и ДППТ любой вместимости при наличии или отсутствии ИО водой боковой поверхности ГЭ.

2. Создана компьютерная программа «Моделирование теплового состояния ДСП». Программа позволяет облегчить инженерные расчеты и повысить эффективность исследования теплового состояния ГЭ при подаче воды на их боковую поверхность. Вместе с тем, данный программный продукт дает информацию по скорости уноса графита с боковой поверхности ГЭ, расходу ГЭ и по толщине водяной пленки в процессе работы ИО.

С использованием программы проведено компьютерное моделирование теплового состояния ГЭ для дуговых печей «большой» металлургии вместимостью от 80–200 т и печей малой вместимости от 0,5–25 т. В результате анализа полученных данных, установлено:

3. Использование системы ИО водой боковой поверхности ГЭ существенно снижает температуру в верхней половине ГЭ, тем самым экранирует ГЭ

от окисления и уменьшает расход графита для дуговых печей разной вместимости;

4. Экономическая эффективность применения ИО в дуговых печах трехфазного и постоянного тока зависит от нескольких факторов, включающих расход воды, затраты на электроэнергию, качество и стоимость ГЭ, и время начала подачи этой воды. Оптимизация этих параметров повышает эффективность всего процесса;

5. Существует максимальный расход воды, выше которого использование ИО неэффективно;

6. Эффективный расход воды в системе ИО для печей малой вместимости составляет 0,1–0,2 м³/ч на каждый электрод, при котором снижение расхода ГЭ составляет от 11–40% в зависимости от вместимости печи. Для крупных металлургических печей расход воды может достигать значения 1,5 м³/ч, при котором расход ГЭ может быть снижен в 2,7 раза;

7. При ограничениях $0,1 \leq \psi \leq 1$ и $0 \leq V \leq 0,4$ (м³/ч), $3 \leq C_9 \leq 8$ (руб./кВт·ч) установлено, что для дуговых печей вместимостью от 0,5–25 т применение ИО более целесообразно на ГЭ более низкого качества. С ростом цены электроэнергии, эффективность снижается;

8. Моделирование позволяет определять рациональное время включения системы ИО в зависимости 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.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ГРАФИТИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

Важной частью работы является организация экспериментального исследования по снижению температуры ГЭ и его экранирования от окисления путем ИО водой с использованием компьютерного моделирования на предприятии, имеющем в своем составе дуговые электрические печи. Целью эксперимента является верификация результатов расчета теплового состояния ГЭ с учетом принудительного охлаждения и рабочих параметров системы ИО. Необходимо проанализировать эффективность использования ИО на дуговых печах, определить рациональные параметры системы ИО для максимального снижения уноса графита с боковой поверхности ГЭ. Экспериментальные исследования проводились на предприятиях «АВИСМА» г. Березники и ПАО «СИБЛИТМАШ» г. Новосибирск.

4.1. Экспериментальные исследования на предприятии «АВИСМА» г. Березники

Основным продуктом предприятия «АВИСМА» г. Березники является производство диоксида титана. Одной из технологических операций получения этого продукта служит восстановительный переплав ильменитовых концентратов в дуговой рудно-термической печи (РТП) вместимостью 100 т (Рисунок 4.1). Его выплавляют в смеси с антрацитом, что способствует восстановлению оксидов титана и железа. Полученное железо науглероживается, образуя чугун, а низшие оксиды титана уходят в шлак. Титановый шлак и чугун отдельно заливаются по изложницам. Основным продуктом процесса плавки является титановый шлак, а чугун считается попутным. Процесс плавки в режиме работы печи периодический. Он состоит из завалки исходных материалов (ильменита и антрацита), нагрева, восстановления железа, получения первичного титанового шлака, доводки титанового шлака, отделения металла, перегрева шлака и выпуска готовых продуктов плавки.

4.1.1. Расчет теплового состояния графитированных электродов для РТП-100 с учетом испарительного охлаждения водой

Моделирование процесса распределения температуры по ГЭ проводили с использованием компьютерной программы «Моделирование теплового состояния электрода ДСП», разработанной в соответствии с методами и алгоритмами, изложенными в Главе 3. Подтверждением государственной регистрации программы является свидетельство №2017617959 [130]. Все необходимые исходные данные для расчетов приведены в Таблице 4.1.

Таблица 4.1 – 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 электродов	1400 °С
Температура расплава шлака	1800 °С
Средняя температура газов в печи вблизи графитированных электродов (ГЭ)	1200–1400 °С
Начальная температура ГЭ	20 °С
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, $2,1 \cdot \pi \cdot 0,61^2 / 4 \cdot 1700 =$ =1043 кг

Продолжение Таблицы 4.1	
Параметр	Значение
Существующий средний расход одного ГЭ или скорость подачи электродов в печь во время плавки (без учета поломок электродов)	1043 кг/24ч ≈ 43,5 кг/час
Время между наращиванием графитированных электродов	2100 мм/24 час ≈ 87,5 мм/час
Температура подаваемой воды	20°C
Теплота парообразования воды	2300 кДж/кг
Степень черноты воды	0,5
Плотность воды	1000 кг/м ³
Скорость стекания воды	0,15 м/с

4.1.2. Результаты расчетов

Выбор расхода воды.

На Рисунке 4.2 приведены результаты расчета квазистационарного температурного поля ГЭ без подачи воды на ИО. Стойкость материала графита была выбрана таким образом, чтобы его расход при квазистационарном режиме работы ГЭ составил примерно 44 кг/час.

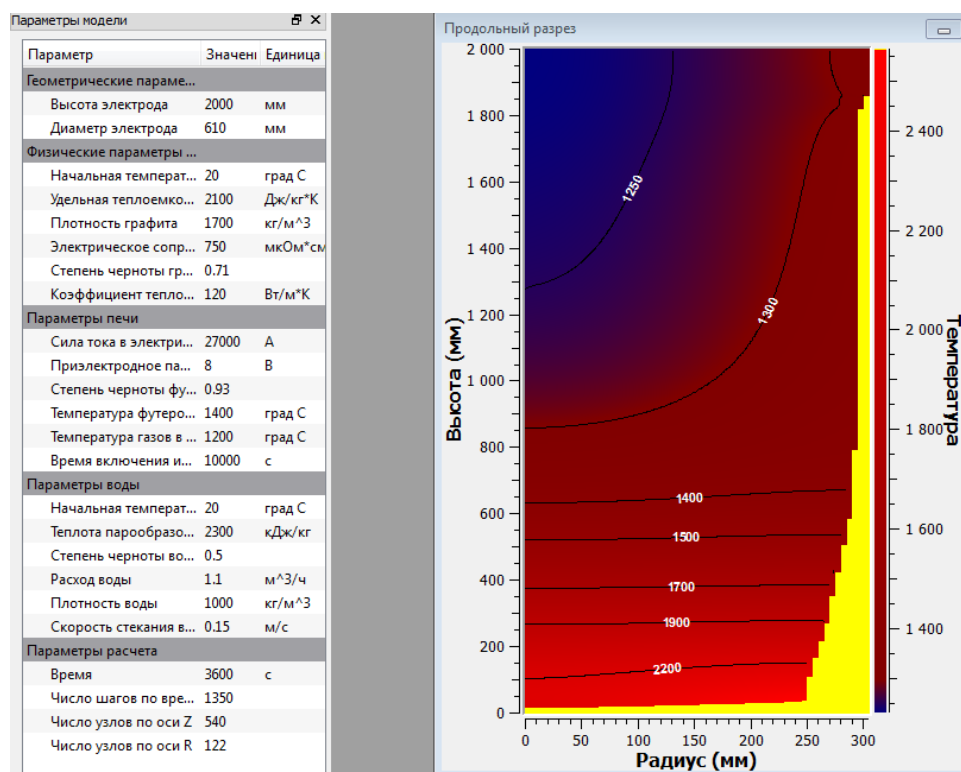


Рисунок 4.2 – Температурное поле в ГЭ в установившемся режиме без подачи воды на испарительное охлаждение

На основе этих параметров были 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 4.3. Видно, что чем больше расход воды, тем ниже средняя температура ГЭ и значит меньше его унос.

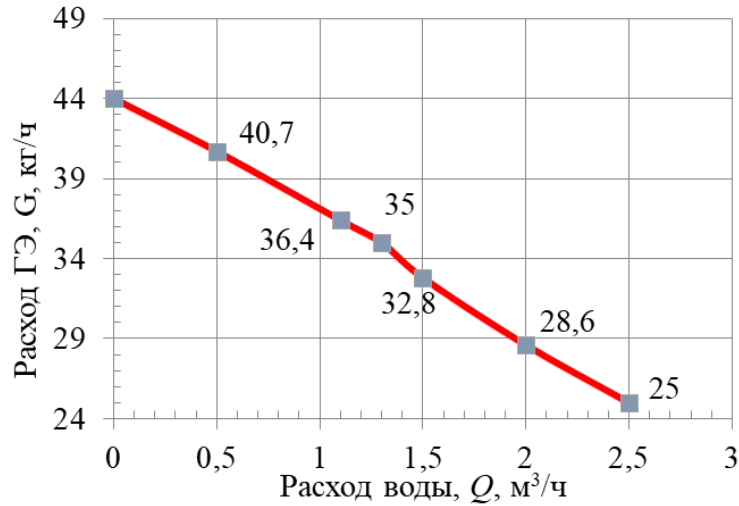


Рисунок 4.3 – Расход ГЭ за счет угара и термического разрушения в зависимости от расхода воды подаваемой на ИО

Это все справедливо, если вся вода, которая попадает 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 расхода подаваемой воды. График толщины пленки при расходе воды 1,5 м³/ч представлен на Рисунке 4.4.

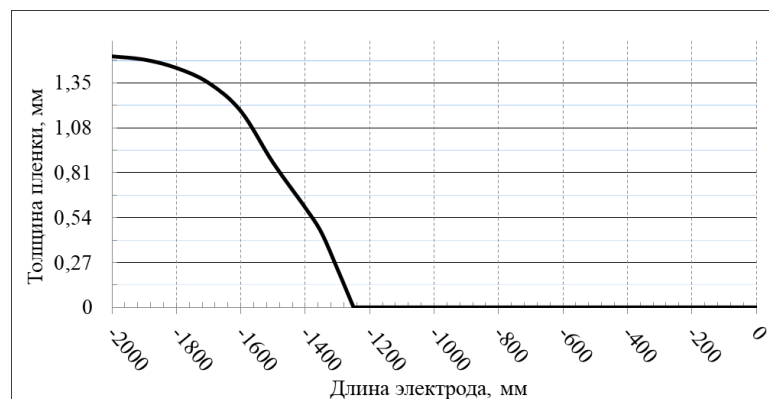


Рисунок 4.4 – Толщина водяной пленки по длине ГЭ от места подачи воды при расходе воды 1,5 м³/час

Исходя из этого, рекомендуемый максимальный расход воды должен составлять около $1,5 \text{ м}^3/\text{час}$, при котором экономия ГЭ может достигать 25%.

Выбор времени включения водяного испарительного охлаждения.

Рассмотрен расход уноса ГЭ при разном времени включения подачи воды на ИО в количестве $1,5 \text{ м}^3/\text{час}$ от начала его нагрева. Считаем, что время полного нагрева до квазистационарного состояния составляет 1 час. Результаты расчетов показаны на Рисунке 4.5.

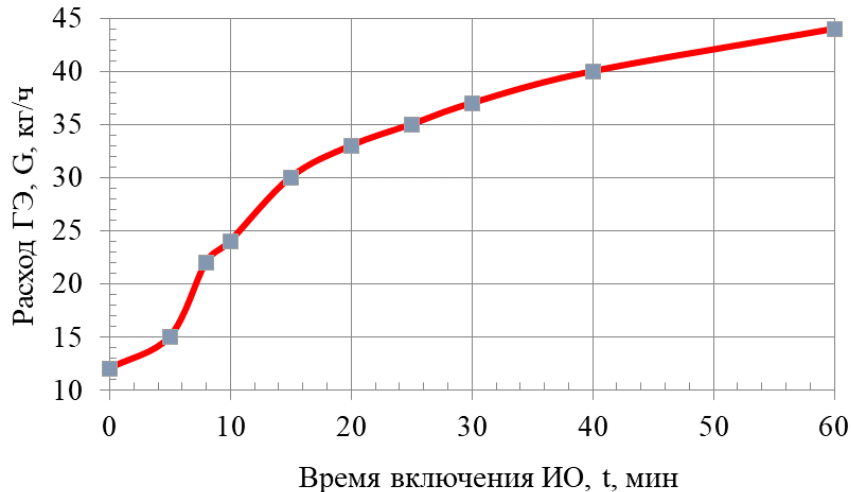


Рисунок 4.5 – Расход ГЭ от момента включения ИО при изначально холодном электроде

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. Исходя из Рисунка 4.5, рекомендуемое время включения составляет с 5–15 мин.

4.1.3 Промышленные испытания

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» г. Березники 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 4.6). Верхнее полукольцо служит для подачи воды в зону охлаждения электродов и имеет четыре форсунки. Нижнее кольцо предназначено для подачи воздуха, имеет четыре форсунки, создающих 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.

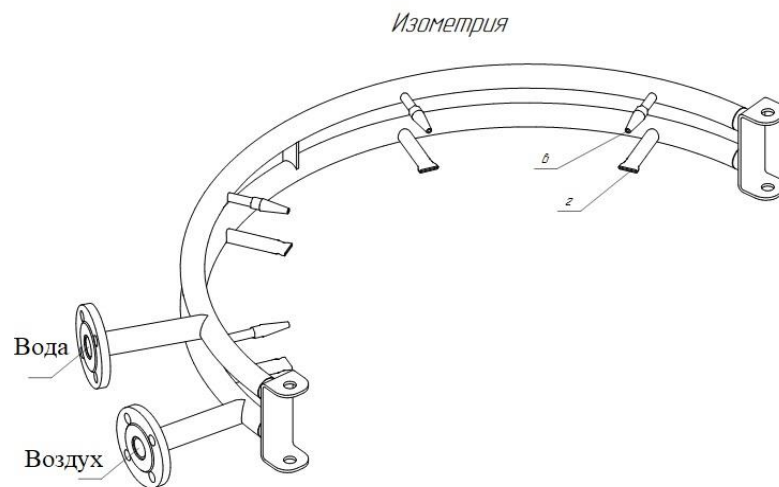


Рисунок 4.6 – Секция системы ИО

Для сравнительного анализа расхода охлаждаемых и не охлаждаемых ГЭ устройство ИО смонтировано на одном из трех электродов РТП-1 (первая фаза) 01 февраля 2023. На Рисунке 4.7 представлена фотография смонтированной системы ИО на первой фазе на отметке +5600 на кессоне в период ее настройки. Аппаратурно технологическая схема опытной системы ИО, смонтированной на РТП-1, показана на Рисунке 4.8.



Рисунок 4.7 – Фотография смонтированной на первой фазе системы ИО

Эксперимент проводили следующим образом: подачу сжатого воздуха на охлаждение ГЭ начинали через один час после окончания загрузки шихты в ванну РТП-1. Воду подавали после подачи сжатого воздуха путем открытия шарового крана, расположенного на цеховом напорном коллекторе и крана шарового, расположенного после расходомера. В целях безопасности начало подачи воды осуществлялось с минимальным открытием крана. Охлаждение электрода продолжалось весь цикл восстановительной плавки до начала следующей загрузки шихты. Охлаждение воздухом не прекращали. Эксперимент проводили с 01 февраля по 20 февраля 2023 года.

На 20.02.2023 получены следующие результаты:

1. В верхней части охлаждаемого ГЭ зафиксировано снижение температуры. Она не превышала 500°C . Измерение проводились пирометром. Результаты расхода ГЭ по фазам следующие: на охлаждаемом ГЭ первой фазы – 11800 кг, на второй фазе – 9100 кг, и на третьей – 10800 кг. Данные расхода формируются автоматически в системе управления печью (по изменению длины электрода). Повышенный расход на первой фазе, где установлено охлаждение, объясняется ненормативным (внеочередным) наращиванием ГЭ в один из дней

опытных работ. Со слов специалистов «АВИСМА», это связано с плохим качеством ГЭ. Стоит отметить, что на предприятии используются ГЭ от трех разных производителей. Эти электроды имеют различные свойства, такие как электрическое сопротивление, что влияет на термомеханическую стойкость в процессе работы и соответственно на их расход.

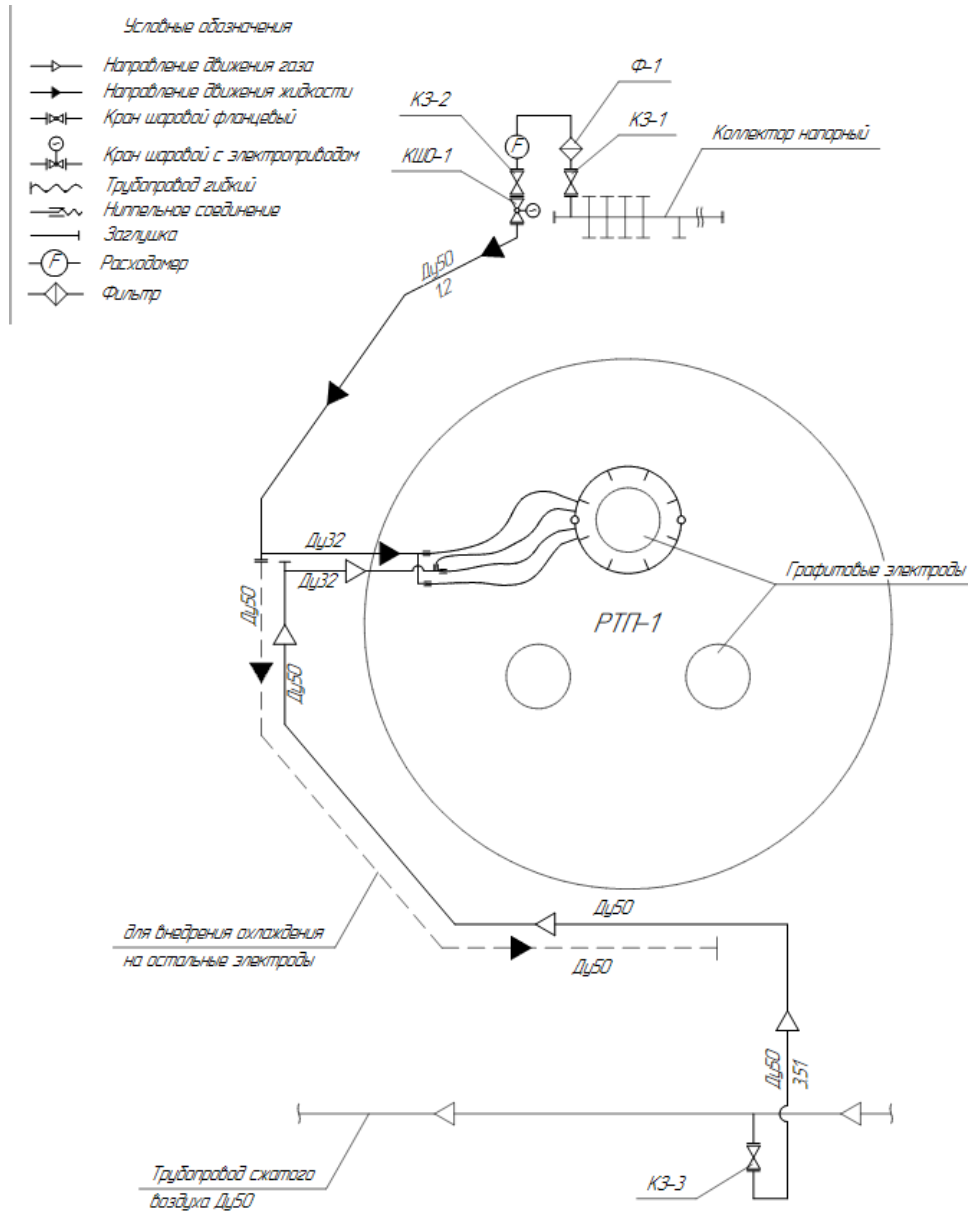


Рисунок 4.8 – Аппаратурно технологическая схема опытной системы ИО, смонтированной на РТП-1

2. Визуально наблюдается значительное разбрызгивание воды при попадании ее на ГЭ, в результате на своде образуются большие ее скопления.

3. Расход воды в течение всего периода работ составил $0,2 \text{ м}^3/\text{ч}$. Выше поднимать опасно в связи с большим разбрызгиванием воды. Для обеспечения расчетного снижения расхода ГЭ, расход воды должен составлять $1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ для печей такой мощности.

4. При использовании «воздуха» совместно с водой, замечено значительное утонение ГЭ в зоне крепления системы ИО.

По итогам первых полученных результатов эксперимента было принято решение о дополнительном проведении нескольких плавок с электродами одного производителя и поставщика с целью исключения повторения внеочередной поломки в процессе восстановительной плавки концентратов. При повторных опытных работах контур подачи сжатого воздуха был отключен, использовали исключительно охлаждение водой. Расход воды намеренно не поднимали выше $0,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ в связи с разбрызгиванием. Начало включения охлаждения с 10 минуты от подачи тока на электрод. Охлаждение продолжали весь цикл восстановительной плавки до начала следующей загрузки шихты. В результате расход по фазам получился следующий: первая фаза – 2048 кг; вторая – 2112 кг; третья – 2126 кг. Таким образом, при расходе воды $0,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ снижение расхода охлаждаемого ГЭ составило около 3% относительно двух соседних электродов. Разбрызгивание воды при попадании ее на горячий электрод осталось прежним. Увеличение расхода воды приводило к резкому увеличению интенсивности разбрызгивания.

По результатам полученных данных были сделаны следующие замечания и рекомендации:

1. Для уменьшения/исключения разбрызгивания воды необходимо снизить скорость ее вытекания из сопел и изменить направление ее подачи. С этой целью был проведен расчет скорости вытекания воды по формуле 4.1 для системы ИО при разных значениях диаметра сопел, их количестве и значении расхода воды. Результаты расчетов сведены в Таблицу 4.2.

$$W = \frac{4Q}{\pi d_{\text{отв}}^2 n}, \quad (4.1)$$

где W – скорость вытекающей из сопел воды, м/с; Q – расход воды на охлаждение ГЭ, м³/с; $d_{\text{отв}}$ – внутренний диаметр сопла, мм; n – количество сопел, шт.

Таблица 4.2 – Результаты расчетов скорости вытекающей воды

Расход воды, Q , м ³ /ч	Диаметр отверстия, $d_{\text{отв}}$, м	Количество отверстий, n , шт	Скорость воды, W , м/с
1,5	0,005	8	2,6
1,5	0,005	10	2,1
1,5	0,005	12	1,8
1,5	0,005	14	1,5
Если снизим расход воды 1 м ³ /ч			
1	0,005	8	1,7
1	0,005	12	1,2
1	0,005	16	0,9
Если увеличим диаметр $d_{\text{отв}}$			
1	0,007	12	0,6

Понятно, что с увеличением внутреннего диаметра и количества сопел, скорость вытекающей воды снижается. Также увеличение количества сопел приведет к более равномерному распределению воды по поверхности ГЭ. Тем самым повысит эффективность работы системы ИО.

Исходя их технической документации на систему охлаждения, установленную на 180 т печах VAI Fuchs в Магнитогорском металлургическом комбинате, номинальным значением скорости вытекания воды является 1,9 м/с, номинальный расход воды 4,3 м³/ч (для трех электродов).

Предложено увеличить количество сопел до 16 без изменения внутреннего диаметра. Все сопла расположить под углом 45–65° к оси ГЭ.

2. Расход воды 0,2 м³/ч слишком незначительный для снижения температуры ГЭ в дуговых печах такой мощности, поэтому после корректировки кольца ИО необходимо начать постепенно поднимать расход до 1–1,5 м³/ч открытием шарового крана.

3. Для исключения утонения в зоне охлаждения, отключить контур подачи сжатого воздуха. Продолжить работы только на водяном контуре без воздушного охлаждения.

4. Для повышения чистоты эксперимента использовать ГЭ одного производителя и одной марки.

По итогам проведенных работ и полученных результатов специалисты ПАО «АВИСМА» (г. Березники) считают опыт применения ИО на РТП-1 положительным и перспективным. Температура ГЭ в верхней части в момент охлаждения не превышает 500°C, расход ГЭ снижается примерно на 3% при незначительном для печей такой мощности расходе воды в 0,2 м³/ч. Принято решение об изменении конструкции системы ИО с учетом выявленных замечаний и сформулированных рекомендаций, в том числе и разработке современной автоматической системы регулирования давления воды и воздуха, так, как это сделано на дуговых сталеплавильных печах. Изменения приведут к возможности повышать расход охлаждаемой воды до расчетного 1,5 м³/ч, что обеспечит увеличение эффективности работы системы ИО и приведет к снижению расхода ГЭ на 25%.

Окупаемость проектирования и изготовления системы ИО и суммарную удельную экономию средств ΔЭ для одного ГЭ с учетом его стоимости, количества энергии, требуемой на испарение заданного объема воды, стоимости этой электроэнергии, а также значением расхода воды на охлаждение определим по формулам 3.18–3.19. Результаты сведены в Таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты экономических расчетов

№ п/п	Параметр	Исходные и расчетные данные	
		3% (опытное)	25% (расчетное)
1	Снижение расхода	3% (опытное)	25% (расчетное)
2	Расход воды на охлаждение, м ³ /ч	0,2	1,5
3	Цена ГЭ, руб/т	337,7	
4	Цена электроэнергии, руб/кВт·ч	2,9	
5	Количество энергии, затрачиваемой на испарение воды, кВт·ч/м ³	675	
6	Суммарная удельная экономия средств ΔЭ, руб./ч	622,2	1217
7	Суммарная удельная экономия средств ΔЭ, руб./плавку	4978	9736
8	Себестоимость системы ИО, руб.	536129	
9	Окупаемость, количество плавков	108	55

Цены расходников для расчета предоставлены специалистами «АВИСМА» г. Березники и актуальны на первый квартал 2023 года.

В 2023 году была спроектирована новая система водяного охлаждения. В бюджете предприятия заложены финансовые средства на ее реализацию в 2024 году. После чего промышленные испытания на РТП будут продолжены.

4.1.4. Результаты экспериментального исследования на «АВИСМА» г. Березники

1. Проведен расчет теплового состояния ГЭ с учетом использования ИО водой их боковой поверхности. Определены рациональные параметры расхода воды и времени включения ИО, составляющие 1,5 м³/ч и 5–15 мин соответственно.
2. Спроектирована, изготовлена и установлена на первую фазу РТП-1 экспериментальная система ИО ГЭ.
3. Проведены экспериментальные плавки с использованием системы ИО. Зафиксировано снижение температуры ГЭ. Расход снизился на 3% при относительно небольшом расходе воды в 0,2 м³/ч. Увеличение расхода воды до расчетного 1,5 м³/ч не проводилось при существующей конструкции кольца ИО.
4. Сформулированы рекомендации по совершенствованию конструкции кольца ИО. С учетом этого, по итогам эксперимента специалисты «АВИСМА» разработали новую конструкцию системы ИО.
5. При снижении расхода ГЭ на 25% при расходе воды 1,5 м³/ч срок окупаемости капитальных затрат на проектирование и изготовление системы ИО составит 55 плавов или 19 суток при трехсменном режиме работы.
6. Результаты работ зафиксированы актом внедрения (Приложение А).

4.2. Экспериментальные исследования на предприятии ПАО «СИБЛИТМАШ» г. Новосибирск

Предприятие имеет в своем составе цех, оснащенный плавильными агрегатами в виде ДППТ-6 вместимостью 6 тонн (Рисунок 4.9) и вагранки. Литейное производство предприятия специализируется на изготовлении стальных и чугунных отливок в «землю» весом до 8 т. Марки выплавляемых сплавов: СЧ10–СЧ35

ГОСТ 1412–85, ВЧ40–ВЧ50 ГОСТ 7293–85, 35ХМЛ и углеродистые стали до 45Л
ГОСТ 977–88.



Рисунок 4.9 – ДППТ-6 ПАО «СИБЛИТМАШ»

Основные технические данные ДППТ-6 приведены в Таблице 4.3

Таблица 4.4 – Паспортные данные ДППТ-6

№ п/п	Наименование параметра	Значение
1	Номинальная вместимость, т	6
2	Номинальная мощность трансформатора, кВА	4300
3	Напряжение высокой стороны трансформатора, кВ	10
4	Мощность источника силового питания, кВт	4000
5	Номинальный выходной ток источника, кА	16; 10; 5
6	Номинальное выходное напряжение источника питания, В	250; 400; 800
7	Род тока	постоянный
8	Число электродов, шт.: – сводовых (катодов) – подовых (анодов)	1 2
9	Диаметр ГЭ, мм	300
10*	Удельный расход электроэнергии на расплавление, кВт·ч/т	500–510
11*	Продолжительность расплавления под током, мин	50
12*	Удельный расход ГЭ, кг/т	1,5-1,8

* – уточняются при проведении опытно-промышленной эксплуатации.

Необходимо отметить, что по истечении проведения опытно-промышленной эксплуатации и по сегодняшний день реальный удельный расход ГЭ составляет 2,5 кг/т.

Применяемые на производстве ГЭ имеют технические характеристики, соответствующие Таблице 4.5. Производителем электродов является АО «ЭПМ – Новосибирский электродный завод». Контроль, производство и поставка ГЭ и ниппелей к ним осуществляется по ТУ 1911-109-052-2010 «Электроды графитированные и ниппели к ним».

Таблица 4.5 – Характеристики ГЭ и ниппелей

№ п/п	Наименование параметра	Значение
1	Марка электродов	ЭГ-РР
2	Размеры применяемых ГЭ:	
	– Типичный диаметр, мм	305
	– Номинальный диаметр, мм	300
	– Максимальный диаметр, мм	307
	– Минимальный диаметр, мм	302
	– Нормальная длина, мм	1500
3	Предел прочности при изгибе, МПа	6,5-14,0
4	Температурный коэффициент линейного расширения в интервале температур от 20 до 520°C, $10^{-6}/K^{-1}$	-
5	Объемная плотность, г/см ³	1,55-1,65
6	Удельное электрическое сопротивление, мкОм·м	7,0-11,0
Ниппели		
1	Марка ниппеля	177Т4N
2	Объемная плотность, г/см ³	1,65
3	Предел прочности при изгибе, МПа	14
4	Удельное электрическое сопротивление, мкОм·м (не более)	7

4.2.1. Моделирование теплового состояния графитированных электродов и подбор рациональных параметров для охлаждения

Для получения наиболее эффективных параметров системы ИО была использована специальная компьютерная программа «Моделирование теплового со-

стояния электрода ДСП» [130]. Данная программа основана на ММ, приведенной в ранее опубликованной работе [142].

Для проведения компьютерного моделирования были учтены следующие параметры: технологические характеристики печи, геометрические и теплофизические свойства ГЭ, параметры охлаждающей воды. Все они систематизированы в Таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Данные для моделирования

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

По итогам теоретических исследований/моделирования теплового состояния ГЭ с учетом принудительного охлаждения водой получены зависимости удельного расхода ГЭ от времени его нахождения в печи под током (при нагреве от холодного состояния) при разных расходах охлаждающей воды (Рисунок 4.10) и измене-

ния угара от времени включения ИО (Рисунок 4.11). Установлено, что с увеличением расхода воды, расход ГЭ снижается в связи с ростом толщины стекающей водяной пленки и зоны теплового воздействия ИО. Рациональным моментом включения системы ИО и подачи воды на ГЭ является период с 1 по 2 минуту после включения тока.

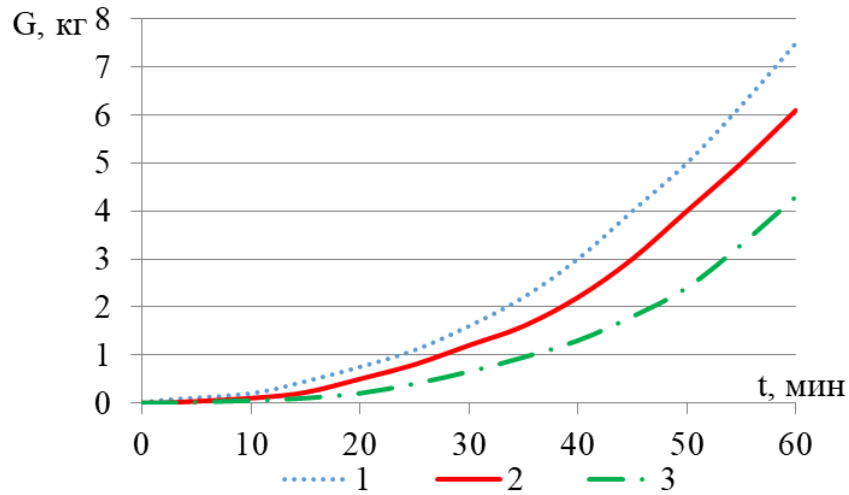


Рисунок 4.10 – Зависимости угара электрода для ДППТ–6 от времени нахождения его в печи под током при разных расходах охлаждающей воды (м³/ч):

1 – 0; 2 – 0,15; 3 – 0,3

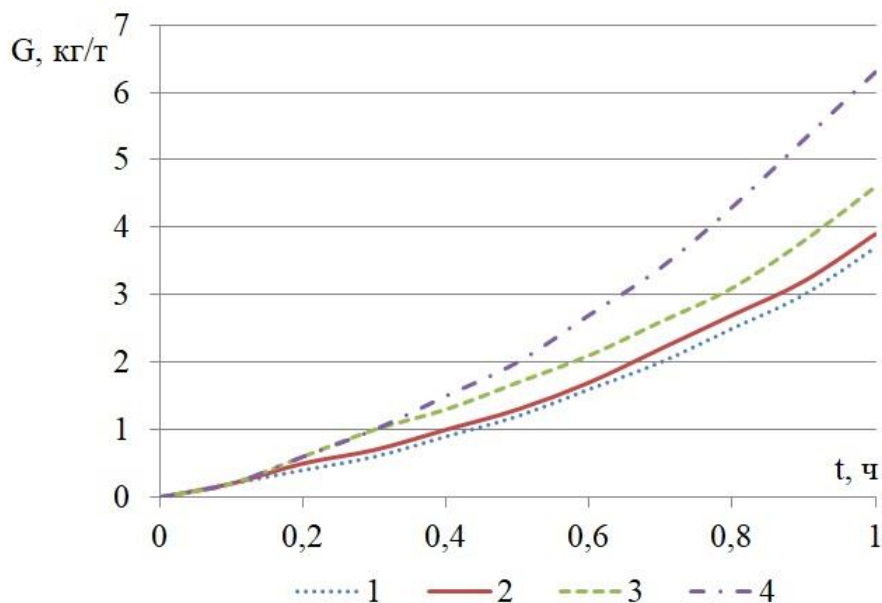


Рисунок 4.11 – Расход ГЭ от времени работы ДППТ-6 под током при разных моментах включения системы ИО (мин.):

1 – через 0,08 мин, 2 – 1 мин, 3 – 2 мин, 4 – 5 мин [144]

Результаты проведенных исследований [128, 129] свидетельствуют о том, что экономическая эффективность применения водяного ИО в малотоннажных ДСП и ДППТ зависит от нескольких факторов, таких как расход воды, стоимость ГЭ и энергопотребление. В связи с этим требуется определить рациональное значение расхода воды, которое обеспечит максимальную эффективность всей системы с учетом общей экономии средств. Исходя из результатов расчетов, эффективным рекомендуемым расходом воды для системы ИО ГЭ ДППТ-6 является $0,15 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Наиболее эффективные значения системы ИО для ДППТ-6:

- расход воды должен составлять $0,15 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- подача воды на ГЭ в период с 1–2 минуты после включения тока.

4.2.2. Расчет конструктивных параметров системы испарительного охлаждения для ДППТ-6

Система водяного ИО ГЭ представляет собой систему подачи воды орошением на боковую поверхность ГЭ и состоит из кольца ИО с отверстиями по внутреннему диаметру, которая крепится ниже электрододержателя вокруг ГЭ. Расход воды регулируется редуктором давления [137].

Для расчета конструктивных параметров системы испарительного охлаждения была использована действующая на ДСП–180 (Рисунок 4.12).

Характеристики системы для ДСП-180:

- диаметр ГЭ – $d'_1=610 \text{ мм}$;
- расстояние от ГЭ до кольца испарительного охлаждения – $\Delta'=150 \text{ мм}$;
- внутренний диаметр подводящей трубки $d'=20 \text{ мм}$;
- внешний диаметр подводящей трубки $d_{\text{вн}}=22 \text{ мм}$;
- материал кольца – медь.

Исходные данные для ДППТ-6:

- диаметр ГЭ – $d_1=300 \text{ мм}$;
- расход воды на охлаждение одного ГЭ из теплового расчета – $Q=0,15 \text{ м}^3/\text{ч}=0,00004166 \text{ м}^3/\text{с}$.

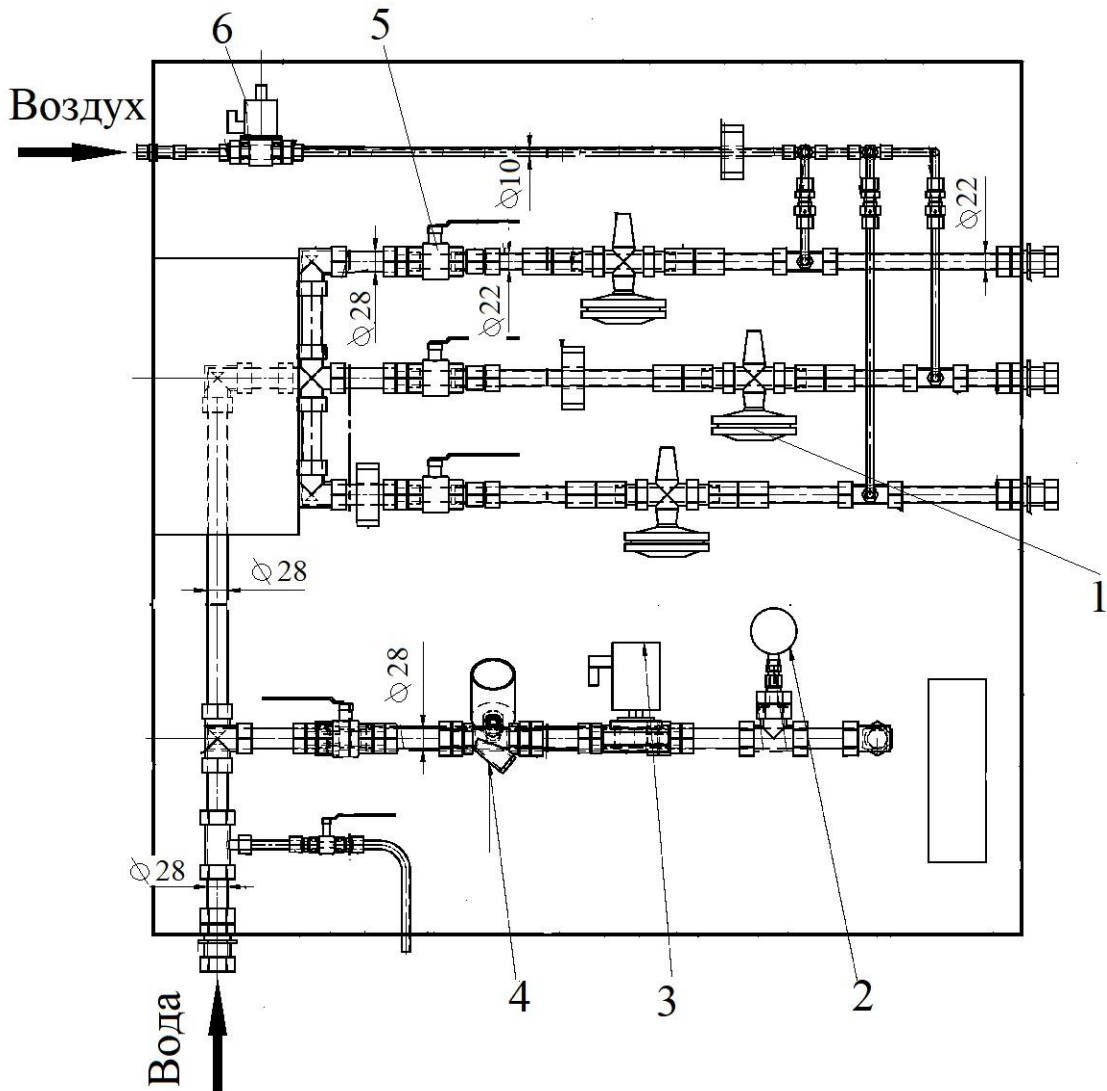


Рисунок 4.12 – Клапанный стенд системы ИО на ДСП-180:

1 – регулятор давления воды, 2 – механический манометр, 3 – электромагнитный клапан, 4 – реле протока, 5 – шаровой кран

Коэффициент геометрического подобия $\lambda = \frac{d'_1}{d_1} = 2,03$. Для обеспечения

одинаковой плотности орошения поверхности электрода расход воды для ДСП-180 – $Q' = \pi d'_1 W = \lambda \cdot Q$.

Определим недостающие данные через коэффициент подобия.

1. Расстояние от ГЭ до кольца испарительного охлаждения – $\Delta = \Delta' / \lambda = 73,8$ мм; $L = d_1 + 2 \Delta = 300 + 2 \cdot 73,8 = 447$ мм.

2. Внутренний диаметр подводящей трубки определим из расхода воды и равенства скоростей воды для рассматриваемой и базовой схемы.

$$3. \quad Q' = Q\lambda = W\lambda \frac{\pi d^2}{4} = W \frac{\pi d'^2}{4}, \text{ получим } d = d'/\sqrt{\lambda} = 20/\sqrt{2,03} \approx 14 \text{ мм.}$$

При толщине стенки 1 мм внешний диаметр трубки $d_{\text{тр}}=16$ мм.

4. Расстояние от оси трубки до оси электрода $R = d_1/2 + \Delta + d_{\text{тр}}/2 \approx 300/2 + 73,8 + 16/2 = 231,8$ мм, $2R = 464$ мм.

5. Диаметр отверстий d_0 зависит от их количества n и расхода воды $Q = W_0 \frac{\pi d_0^2}{4} n$. Отсюда скорость вытекающей из сопел воды определим как

$$W = \frac{4Q}{\pi d_{\text{отв}}^2 n}. \text{ Скорость воды при разных размерах отверстий и их количествах}$$

приведена в Таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Скорость воды при разных размерах отверстий и их количествах

Расход воды, Q , м ³ /ч	Диаметр отверстия, d_0 , мм	Количество отверстий, n , шт	Скорость воды, W , м/с
0,15	3	12	0,53
0,15	2,5	12	0,70
0,15	2,5	10	0,85
0,15	2,5	15	0,5
0,15	2,5	20	0,32
0,15	2,5	25	0,3
0,15	2,5	30	0,25

Выбираем $d_0=2,5$ мм, $n=30$. Основные размеры кольца испарительного охлаждения приведены на Рисунке 4.13.

6. На клапанном стенде системы испарительного охлаждения ДППТ-6 размеры всех водяных и воздушных трубок должны быть уменьшены в $\lambda=2,03$ раз.

7. Вода с клапанного стенда подводится к кольцу испарительного охлаждения посредством резиновых трубок с внутренним диаметром $d_{\text{тр}}$. Длина трубок зависит от конструкции крепления кольца к электрододержателю.

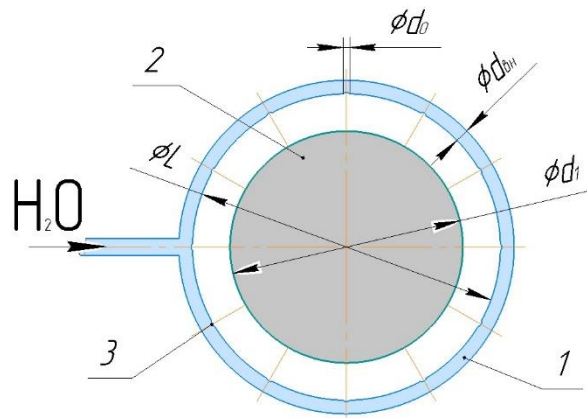


Рисунок 4.13 – Принципиальная конструктивная схема кольца ИО:

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

4.2.3. Результаты опытно-промышленных исследований охлаждения графитированных электродов в дуговых печах

На основе результатов моделирования и технического задания было изготовлено и установлено на ДППТ-6 экспериментальное устройство под электрододержатель ИО ГЭ. 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. 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 [Приложение А].

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 4.8). Средняя сходимость

расчетных и экспериментальных значений более 80%.

Таблица 4.8 – Результаты экспериментальных работ

№ плавки	Расход ГЭ при расходе воды равном 0,15 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

4.2.4. Заключение по экспериментальному исследованию на ПАО «СИБЛИТМАШ» г. Новосибирск

1. Проведен расчет теплового состояния ГЭ ДПШТ–6 с учетом использования ИО водой его боковой поверхности. Определены рациональные параметры расхода воды и времени включения ИО, составляющие 0,15 м³/ч и 1–2 мин, соответственно.

2. Спроектирована, изготовлена и установлена на ГЭ экспериментальная система ИО ГЭ.

3. Проведены 5 экспериментальных плавки с использованием системы ИО. В результате снижение ГЭ при расходе воды 0,15 м³/ч составило 15%.

4. 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.

5. Результаты работ зафиксированы актом внедрения (Приложение А).

4.3. Практические рекомендации по повышению эффективности охлаждения графитированных электродов для дуговых печей

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 Таблицах 4.9 и 4.10 ниже. Установлено, что для малых печей применение ИО более целесообразно на ГЭ более низкого качества.

Таблица 4.9 – 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 3.18–3.19 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, в основном, один сводовый ГЭ, и он не подвержен эффекту дополнительного нагрева от соседних. 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 электродов 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 восстановления 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.

4.4. Выводы по четвертой главе

1. Созданная ММ и программный продукт позволяют с практической точностью определять температурное поле ГЭ и эффективные параметры системы ИО для дуговых печей как переменного, так и постоянного тока любой вместимости.

2. Проведены экспериментальные работы по использованию системы ИО для снижения расхода ГЭ на предприятиях «АВИСМА» г. Березники и ПАО «СИБЛИТМАШ» г. Новосибирск. Установлено, что с применением системы ИО расход ГЭ на ДППТ-6 снизился на 15%, а для РТП-1 на 3%.

3. Установлено, что существует рациональное значение расхода воды, при котором достигается максимальная эффективность системы ИО. Увеличение этого расхода не приводит к значительному росту экономии средств.

4. Сформулированы и рассчитаны практические рекомендации по повышению эффективности охлаждения графитированных электродов для дуговых печей.

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 расход. Средняя температура поверхности ГЭ снижается на 2°C . Исследуемые газы по длине ГЭ разгоняются 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 других 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 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 в дуговых печах разной вместимости. Рациональный расход воды для печей малой вместимости должен составлять $0,1\text{--}$

0,2 м³/ч, для крупных печей 1–1,5 м³/ч. Время включения с 1–10 минуту от начала подачи тока на электрод. Скорость вытекания воды из сопел 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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ГЭ – графитированный электрод;

ДСП – дуговая сталеплавильная печь;

ДППТ – дуговая печь постоянного тока;

ВДП – вакуумно-дуговой переплав;

ЭЛП – электронно-лучевой переплав;

ПДП – плазменно-дуговой переплав;

ИО – испарительное охлаждение;

ММ – математическая модель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Объем выпуска стали в 2021 году [Электронный ресурс] / <https://rusmet.ru/proizvodstvo-stali-v-dekabre-2021-goda-i-mirovye-proizvodstvo-stali-v-2021-godu/> (дата обращения 13.03.2022).
2. Совещание по вопросам металлургического комплекса 2022 [Электронный ресурс] / <http://kremlin.ru/events/president/news/69089/> (дата обращения 08.08.2022).
3. Сокунов, Б.А. Электроды для дуговых сталеплавильных печей [Электронный ресурс] / <https://studopedia.info/10-36576.html> (дата обращения 13.03.2022).
4. Угольные и графитированные электроды [Электронный ресурс] / <https://www.hgraphite.com/history-carbon-graphite-electrodes/> (дата обращения 13.03.2022).
5. Производство электродов для дуговой плавки металлов [Электронный ресурс] / <http://steeltimes.ru/books/steelmaking/kipdsp/3/32/32.php> (дата обращения 10.06.2020).
6. Производство электродов для дуговой плавки металлов [Электронный ресурс] / https://studopedia.net/1_20377_tehnologiya-proizvodstva-grafitirovannih-elektrodov.html (дата обращения 10.06.2020).
7. Огороков, Н.В. Дуговые сталеплавильные печи / Н.В. Огороков. – Металлургия, 1971. – 344 с.
8. Сокунов, Б.А. Электроды для дуговых сталеплавильных печей [Электронный ресурс] / <https://studopedia.info/10-36576.html> (дата обращения 10.06.2020).
9. Сойфер, В.М. Дуговые печи в сталелитейном цехе / В.М. Сойфер, Л.Н. Кузнецов. – М.: Metallurgy, 1989. – 176 с.
10. Фокин, В.П. Модернизация производства графитированных электродов в России / В.П. Фокин, И.Н. Калайда, С.В. Ульяновченко // Metallurg. – 2010. – № 3. – С. 61-63.

11. Дыскина, Б.Ш. Теоретическое обоснование расхода сырьевых материалов в производстве графитированных электродов и ниппелей / Б.Ш. Дыскина, Е.М. Малютина, В.А. Смолко, Г.А. Лысова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallургия. – 2008. – № 9 (109). – С. 51-53.
12. Мордухович, Б.Ш. Научные основы и опыт применения вспучивающихся коксов в технологии производства графитированных электродов: автореф. дис. доктора техн. наук: / 05.17.07 Мордухович Бария Шакировна. – Уфа, 1999. – 48 с.
13. Фандеев, Е.И. Средства контроля температуры при производстве графитированных электродов / Е.И. Фандеев, В.А. Карчков // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 1998. – № 4. – С. 105-106.
14. Каримов, А.Р. Оптимальные критерии оценки качества графитированных электродов / А.Р. Каримов, В.Г. Зеленкин // Торгово-экономические проблемы регионального бизнес пространства. – 2013. – № 1. – С. 297-299.
15. Казанов, Ю.К. О формировании пекококсовых смесей при производстве крупногабаритных графитированных электродов / Ю.К. Казанов // Кокс и химия. – 2008. – № 7. – С. 30-34.
16. Graphite Electrodes Production and Optimization Practices [Электронный ресурс] / <https://www.ukessays.com/essays/engineering/graphite-electrodes-production-and-optimization-practices.php> (дата обращения 20.05.2020).
17. Технологическая цепочка производства графитированных электродов [Электронный ресурс] / <https://www.instagram.com/explore/tags/steelmaking/> (дата обращения 20.05.2020).
18. Панов, Е.Г. Анализ развития печей графитирования Кастнера в условиях потребностей современного рынка / Е.Г. Панов, А.Ю. Педченко // Технологический аудит и резервы производства. – 2014. – № 4/1(18). – С. 57-60.

19. Левашова, А.И. Химическая технология углеродных материалов: учебное пособие / А.И. Левашова, А. В. Кравцов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 112 с.
20. Пат. RU 2452910 Электрическая печь графитации / Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт конструкционных материалов на основе графита «НИИГрафит». Заявл. 04.08.2010; опубл. 10.06.2012.
21. Кузнецов, Д.М. Эксплуатационная стойкость графитированных электродов в дуговых электропечах / Д.М. Кузнецов, В.К. Коробов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 1999. – № 2. – С. 129-132.
22. Fokin, V. P. Modernizing the production of graphitized electrodes in Russia / V.P. Fokin, I. N. Kalaida, S. V. Ulyanchenko // Metallurgist. – 2010. – V. 54. – Nos. 3-4, – P.178-181.
23. Журавлев А.А. Расчет материальных и энергетических балансов при выплавке стали в дуговых сталеплавильных печах: Учеб.-метод. пособие / А.А. Журавлев, В.Ф. Мысик, А.В. Жданов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 128 с.
24. Анализ рынка графитированных электродов [Электронный ресурс] / https://www.megaresearch.ru/news_in/analiz-rynka-grafitirovannyh-elektrodov-v-rossii-1174 (дата обращения 28.06.2019).
25. Industrial Minerals 7th Graphite & Graphene Conference. Understanding the synthetic graphite electrode crisis [Электронный ресурс] / <https://www.indmin.com/events/download.ashx/document/speaker/E001526/a0ID000000cta9VMAQ/Presentation> (дата обращения 28.06.2019).
26. Graphite Electrode Crisis to Deepen in 2018 [Электронный ресурс] / <https://www.steel-360.com/cover-story/graphite-electrode-crisis-to-deepen-in-2018> (дата обращения 28.06.2019).

27. Schwabe W.E. The Mechanics of Consumption of Graphite Electrodes in Electric Steel Furnaces // W.E. Schwabe. Electric Furnace Proceedings, 1971. – P. 140-148.
28. Козырев, Н.А. Пофакторный анализ изменения удельного расхода графитированных электродов / Н.А. Козырев, А.Б. Тверской, Т.П. Захарова, Д.И. Гришин, Д.В. Бойков // Электromеталлургия. – 2010. – №12. – С. 23-28.
29. Kuznetsov, D.M. Factors influencing the operational resistance of graphitized electrodes in electric arc furnaces / D.M. Kuznetsov, V. K. Korobov // Metallurg. – 2000. – No. 6. – P. 33-34.
30. Ячиков, И.М. Моделирование теплового состояния графитированных электродов дуговых печей / И. М. Ячиков, И. В. Портнова, А.Н. Веселовский, Е.А. Крылов // Создание и внедрение корпоративных информационных систем (КИС) на промышленных предприятиях Российской Федерации: Всероссийская научно-техническая конференция, Магнитогорск, 25–26 октября 2005 года. – Магнитогорск, 2005. – С. 175-178.
31. Volodin, A.M. The results of AC furnace operation at 'Tyazhpressmash' enterprise / A.M. Volodin, A.S. Bogdanovskij, V.S. Malinovskij // Литейное производство. – 2004. – No. 11. – P. 31-35.
32. Jaccard L.R. Effects of EAF design and operation on electrode consumption [Электронный ресурс] / <http://www.jaccard.com.br/EN/consumo.htm> (дата обращения 17.05.2019).
33. Давыдович, Б.И. Основные направления повышения эксплуатационных свойств графитированных электродов в ОАО "Энергопром – Челябинский Электродный Завод" / Б.И. Давыдович, С.В. Бойко, А.В. Золотайко, И.В. Рыбьянец, В.В. Улейский, Г.Д. Апалькова // Электromеталлургия. – 2009. – №12. – С. 8-10.
34. Факторы, влияющие на потребление электродов [Электронный ресурс] / <http://www.hgraphite.com/questions-answers> (дата обращения 14.03.2020).
35. Маслов, Д.В. Анализ причин и последствий поломок электродов в дуговой сталеплавильной печи / Д.В. Маслов, В.П. Рубцов // Вестник МЭИ. – 2013. – № 2. – С. 69-72.

36. Калмыков, В.А. Электрометаллургия стали: учебное пособие / В.А. Калмыков, В.П. Карасев. – СПб: Изд-во СПбГТУ, 1999. – 292 с.
37. Ячиков, И.М. Снижение расхода графитированных электродов в дуговых печах при их принудительном охлаждении / И.М. Ячиков, В.М. Колокольцев // Электрометаллургия. – 2008. – №8. – С. 23-26.
38. Ткачев, А.С. Исследование и оценка эффективности применения трубчатых электродов с целью снижения энергетических затрат при выплавке стали в дуговых сталеплавильных печах малой и средней вместимости : дис. канд. тех. наук : 05.16.02 / Ткачев Александр Сергеевич. – М., 2016. – 184 с.
39. Давыдов, В.П. Современное плавильное оборудование для комплектования литейных производств / В.П. Давыдов, В.Д. Малиновский, А.В. Афонаскин // Электрометаллургия. – 2016. – №1. – С. 24-27.
40. Богдановский, А.С. Последние внедрения дуговых печей постоянного тока научно-технической фирмы «Экта» / А.С. Богдановский, В.В. Долгополов, В.С. Малиновский, В.Д. Малиновский // Электрометаллургия. – 2012. – №4. – С. 20-22.
41. Елизаров, К.А. Сравнительные показатели дуговых сталеплавильных печей постоянного и переменного тока для литейного производства / К.А. Елизаров, М.М. Крутянский, С.М. Нехамин, А.И. Черняк // Электрометаллургия. – 2011. – №1. – С. 9-15.
42. Губарева, В.И. Стойкость электродов в дуговых печах постоянного тока нового поколения / В.И. Губарева, В.А. Кудрин // Электрометаллургия. – 2011. – №11. – С. 9-10.
43. Линчевский, Б.В. Сравнение показателей работы дуговой печи переменного и постоянного тока ОАО «Тяжпрессмаш»/ Б.В. Линчевский, В.М. Зайцев, Д.Г. Маслов // Электрометаллургия. – 2008. – №8. – С. 20-22.
44. Афонаскин, А.В. Возможности и результаты увеличения источников питания на дуговых плавильных печах постоянного и переменного тока / А.В. Афонаскин, В.С. Малиновский, В.Д. Малиновский // Электрометаллургия. – 2016. – №2. – С. 36-42.

45. Сравнение дуговых печей постоянного и переменного тока [Электронный ресурс] / <https://magmatex.ru/uploads/s/3/x/r/3xr4ohkl1ihu/file/fumeJ19v.pdf> (дата обращения 16.06.2020).

46. Kuznetsov, D.M. Factors affecting the service life of graphitized electrodes in electric-arc furnaces / D.M. Kuznetsov, V.K. Korobov // Metallurgist. – 2000. – Vol. 44. No. 5-6. – P.302-305.

47. Gorlani, C. Continuous simulation and industrial processes: electrode consumption in arc furnaces / C. Gorlani, L. Zavanella // Fonderie di Lonato, Brescia, Lonato, Italy. International Journal of Production Research. – 1993. – Vol. 31. – No.8. – P. 1873-1890.

48. Migas, P. Selected Aspects of Graphite Applications in Ferrous Metallurgy / P. Migas, M. Karbowniczek // AGH-University of Science and Technology, Department of Ferrous Metallurgy, Faculty of Metals Engineering and Industrial Computer Science. Freiberg, 16.10.2013. [Электронный ресурс] / https://www.dkg.de/Vortraege%20-%20AKK%20Veranstaltungen/2013-_2rd_polnisch_deutsches_symposium/abstract_migas_aspects-of-graphite-applications.pdf (дата обращения 06.02.2024).

49. Крутянский, М.М. Электрические режимы дуговых печей постоянного и переменного тока для литейного производства / М.М. Крутянский, С.М. Нехамин, М.В. Митрофанов // Электротехнология. – 2018. – №2. – С. 8-16.

50. Hongsun, Seon. Electrode erosion and arc stability in transferred arcs with graphite electrodes. ES. – 197p. – 2001. [Электронный ресурс] / https://escholarship.mcgill.ca/catalog?q=Seon%2C+Hongsun%2C+1965-&search_field=nested_ordered_creator_label_ssim. (дата обращения 20.03.2020).

51. Бойков, Д.В. Особенности расхода электродов в агрегатах ковш-печь / Д.В. Бойков, К.В. Волков, А.Б. Тверской, Г.Д. Апалькова // Электротехнология. – 2014. – №1. – С. 22-25.

52. Фридрих, К. Выбор оптимального диаметра электродов для электродуговых печей переменного тока / К. Фридрих, Х. Фухс // Черные металлы. – 2006. – № 7-8. – С. 59-61.

53. Фрос, В. Оптимизация свойств составных графитированных электродов для дуговых печей / В. Фрос // Черные металлы. – 2000. – Ноябрь. – С. 33-36.
54. Шишимиров, М.В. Ресурсосбережение и резервы повышения эффективности выплавки стали в ДСП / М.В. Шишимиров, О.М. Сосонкин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. – 2015. – № 3. – С. 70-79.
55. Минаков, С.Е. Модернизация дуговых сталеплавильных печей / С.Е. Минаков, Э.В. Панфилов // Литейщик России. – 2016. – № 2. – С. 34-36.
56. Рахмонов, И.У. Снижение электропотребления мощных дуговых сталеплавильных печей / И.У. Рахмонов // Промышленная энергетика. – 2016. – № 9. – С. 7-10.
57. Электроды. Metallurgy. – 2012 [Электронный ресурс] / <http://metallurgiya.net/elektrometallurgiya/42-yelektrody.html> (дата обращения 10.05.2020).
58. Chiappelli, B. Improving EAF operations by utilizing ALX™ graphite electrodes and the ARCHITECH™ furnace evaluation system / B. Chiappelli, D. Potey, P. Stafford // La Metallurgia Italiana. – 2016. – No. 9. – P. 17-25.
59. Piekło, J. Analysis of the state of stress in the connection of graphite electrodes / J. Piekło, M. Maj // AGH University of Science and Technology, Faculty of Foundry Engineering, Reymonta 23, Kraków, Poland. Archives of foundry engineering. – 2015. – Vol. 15. – P. 85-88.
60. Engineering and applications of carbon materials [Электронный ресурс] / https://www.researchgate.net/publication/288205355_Engineering_and_Applications_of_Carbon_Materials (дата обращения 14.03.2020).
61. Маслов, Д.В. Разработка алгоритмов и систем управления дуговыми печами, снижающих поломки электродов : дис. ... канд. тех. наук : 05.09.10 / Маслов Дмитрий Владимирович. – М., 2014. – 134 с.
62. Energy efficient technology packages for electric arc furnace [Электронный ресурс] / <http://sameeksha.org/books/Electric-Arc-Furnace.pdf> [дата обращения 01.04.2021].

63. Ben Bowman. Optimum use of electrodes in arc furnaces [Электронный ресурс] / https://www.researchgate.net/publication/321420814_OPTIMUM_USE_OF_ELECTRODES_IN_ARC_FURNACES (дата обращения 14.03.2020).

64. Мартынова, Е.С. Автоматизированный контроль теплового состояния электродных печей при регулировании мощности электрической дуги : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Мартынова Елизавета Сергеевна. – Санкт-Петербург, 2019. – 132.

65. Грудницкий, О.М. Влияние климатического фактора на удельный расход графитированных электродов / О.М. Грудницкий, А.И. Рожков, А.В. Феклистов // *Литье и металлургия*. – 2011. – № 1. – С. 94-97.

66. Волынцев В.В. Исследование технологии плавки стали в ДСП с использованием газокислородных горелок / В.В. Волынцев, П.А. Гнитиев // *Металлургия XXI столетия глазами молодых: Материалы VI Междунар. научно-практической конф. молодых ученых и студентов: сборник докладов*. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2020. – С. 285-287.

67. Цвинкайло П.С. Применение источников альтернативной энергии для интенсификации плавки в ДСП / П.С. Цвинкайло // *Экономика и социум*. – 2022. – №3-1. – С. 518-523.

68. Грудницкий, О.М. Пути снижения удельного расхода графитированных электродов на электросталеплавильных печах / О.М. Грудницкий, Р.А. Исхаков, В.К. Коробов // *Литье и металлургия*. – 2011. – № 1. – С. 100-101.

69. Кабанова, Т. В. Современные методы защиты графитированных электродов / Т. В. Кабанова, Б. Ш. Дыскина, В. С. Лесюк // *Научный поиск : Материалы седьмой научной конференции аспирантов и докторантов. Естественные науки, Челябинск, 01-10 февраля 2015 года*. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – С. 122-127.

70. Дыскина, Б. Ш. Оптимизация состава защитного покрытия от высокотемпературного окисления графитированных электродов / Б. Ш. Дыскина,

В. С. Лесюк, Т. В. Кабанова // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2015. – Т. 58, № 7. – С. 53-55.

71. Protective coatings for graphite electrodes [Электронный ресурс] / https://www.graphitecova.com/files/coating_4.pdf (дата обращения: 10.03.21).

72. Zhenting Wang. High temperature in-situ antioxidation coating fabricated by AAC method / Zhenting Wang, Gang Liang, Guogang Zhao // College of Materials Science & Engineering, Heilongjiang Institute of Science & Technology, Harbin, China. – 2013. – V. 537. – P. 42-45. – DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.537.42.

73. Semchenko, G.D. Protection of graphite and graphite-containing materials from oxidation / G.D. Semchenko, I.Y. Shuteeva, O.N. Slepchenko, L.A. Angolenko // Refractories and Industrial Ceramics. – 2005. – Vol. 46, No. 4. – P. 260-267. – DOI 10.1007/s11148-006-0021-1.

74. Dallaire, S. Protection of graphite electrodes from oxidation. Surface and Coatings Technology, 1987. – Vol. 32. – P.141–152. [Электронный ресурс] / <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0257897287901034#:~:text=The%20first%20layer%20deposited%20onto,selected%20to%20perform%20the%20coating> (дата обращения 12.05.2021).

75. Rewell refractory develops new products Graphite electrode coating effect is remarkable [Электронный ресурс] / <http://www.rewell.cc/News-Center/291.html>. (дата обращения 12.05.21).

76. Пат. 5352523, United States. Graphite/carbon articles for elevated temperature service and method of manufacture / Zbigniew Zurecki, Edward A. Hayduk, Jr., John G. North, Robert B. Swan, David L. Mitchell, Jr. Заявл. 08.05.1992; Опубл. 04.10.1994.

77. Кабанова, Т. В. Антиокислительная защита боковой поверхности графитированных электродов с применением техногенных отходов Уральского региона / Т. В. Кабанова, Б. Ш. Дыскина // Актуальные вопросы науки и техники : Студенческая международная научно-практическая конференция, Воронеж, 18 июня 2014 года / под ред. А.А. Платонова, О.А. Калачевой, С.А. Прицеповой. – Воронеж: Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное учреждение

высшего профессионального образования Московский государственный университет путей сообщения. Воронежский филиал, 2014. – С. 60-63.

78. Егоров, А.В. О применении трубчатых электродов в дуговых печах / А. В. Егоров, Л. Е. Никольский, Н.В. Огороков // Электротермия. – 1962. – № 9. – С. 27-31.

79. Кожухов, А.А. Экспериментальное изучение влияния полого (трубчатого) электрода на характер горения электрической дуги в дуговой сталеплавильной печи / А.А. Кожухов, А.С. Ткачев, Е.Н. Мельников // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2015. – Т. 58, № 3. – С. 207-209.

80. Огороков, Н.В. Эффективность работы дуговой печи на трубчатых электродах / Н.В. Огороков, Л.Е. Никольский, А.В. Егоров // Электротермия. – 1962. – № 9. – С. 13 - 18.

81. Ерофеев, М.М. Обработка стали в агрегате ковш-печь при подаче инертного газа через полые электроды : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02 / Ерофеев Михаил Михайлович. - Магнитогорск, 2007. – 154 с.

82. Сазонов, А.В. Исследование процесса плавки окатышей при дуговом нагреве в печи с полыми электродами с целью энергосбережения : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02 / Сазонов Александр Васильевич. – М., 2009. – 231 с.

83. Поляков, И.И. Исследование продувки парогазовой смеси через электроды ферросплавной печи / И.И. Поляков, Г.М. Махонь, И.Т. Жердев, В.А. Кравченко, Е.Г. Цыбульник // Изв. вуз. Черная металлургия. – 1980. – № 11 – С. 59 – 61.

84. Солдаев, А.Н. Повышение эффективности обработки металла с использованием стабилизированных дуг / А.Н. Солдаев, Е.Б. Агаников // В сборнике «Прогрессивные процессы и оборудование металлургического производства», Череповец. – 2003г. – С. 63-64.

85. Бигеев, В.А. Результаты обработки расплава стали на агрегате печь-ковш с полыми электродами / В.А. Бигеев, Е.Б. Агапитов, М.М. Ерофеев и др. // Вестник МГТУ. – 2007. – №1 (17). – С. 36-38.

86. Бигеев, В.А. Освоение технологии обработки расплава стали в агрегате ковш-печь с полыми электродами / В.А. Бигеев, Е.Б. Агапитов, М.М. Ерофеев и др. // *Материалы Междунар. Промышленного форума-выставки «Реконструкция промышленных предприятий – прорывные технологии в металлургии и машиностроении»*. – Челябинск, 2007. – №1 (17). – С. 86-87.

87. Агапитов, Е.Б. Перспектива применения технологии внепечной обработки стали на агрегатах ковш-печь при подаче аргона в полые электроды / Е.Б. Агапитов, С.А. Самойлин, М.М. Ерофеев и др. // *Теория и технология металлургического производства. Межрегион. Сб. науч. Трудов. Вып. 6*. – Старый Оскол. – 2006. – С. 86-87.

88. Колокольцев, В.М. Пути снижения расхода графитированных электродов в дуговых печах / В.М. Колокольцев, И.М. Ячиков, А.В. Сарычев // *Литейные процессы*. – 2006. – №6. – С.51-56.

89. Мохов, В.А. Моделирование теплового состояния графитированного электрода дуговой печи с учетом испарительного охлаждения / В.А. Мохов, И.М. Ячиков // *Электromеталлургия*. – 2012. – № 11. – С. 35-41.

90. Моделирование теплового состояния графитированных электродов дуговых печей / И. М. Ячиков, И. В. Портнова, А. Н. Веселовский, Е. А. Крылов // *Создание и внедрение корпоративных информационных систем (КИС) на промышленных предприятиях Российской Федерации : Всероссийская научно-техническая конференция, Магнитогорск, 25-26 октября 2005 года*. – Магнитогорск, 2005. – С. 175-178.

91. Zhang De-ming. Analysis for graphite electrode unit consumption in manufacture. System and use system of steelmaking EAF [Электронный ресурс] / <https://businessdocbox.com/Metals/72274302-Analysis-for-graphite-electrode-unit-consumption-in-manufacture-system-and-use-system-of-steelmaking-eaf.html> (дата обращения 06.02.2024)

92. Achieving maximum benefit from electrode spray cooling (English). Innovation in EAF and in Steelmaking Processes, 2009 Associazione Italiana di Metallurgia (AIM), Milano; 2009 [Электронный ресурс] / <https://www.tib.eu/en/search/id/tema:>

ТЕМА20090803373/Achieving-maximum-benefit-from-electrode-spray?cHash=a923e90d8d2f32e737fdd5b6186c1b7c. (дата обращения 20.06.2021).

93. Klaus-Gerd Bullerschen. Cooling of arc furnace electrodes with heat pipes / Klaus-Gerd Bullerschen, Herbert Wilhelmi // Chem. Eng. Technol. – 1991. – No.14. – P.45-53.

94. Опыт внедрения систем испарительного охлаждения Итальянской фирмой Danieli [Электронный ресурс] / <http://eurometal.net/danieli-supplies-electrode-water-cooling-technology-to-sidoc-colombia/> (дата обращения 20.06.2021).

95. Хорошун, Г.В. Применение водоохлаждаемых электродов при выплавке стали в ДСП / Г.В. Хорошун // В сборнике: Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении: сборник трудов IX Всероссийской научно-практической конференции для студентов и учащейся молодежи. Юргинский технологический институт. – 2018. – С. 40-42.

96. Электроды дуговых печей // Украинская Ассоциация Сталеплавателей информационный портал о черной и цветной металлургии. [Электронный ресурс] / <http://uas.su/books/2011/dsp/32/razdel32.php>. (дата обращения 23.05.19).

97. Ячиков, И. М. Снижение расхода графитированных электродов в дуговых печах за счет их принудительного охлаждения / И. М. Ячиков, В. М. Колокольцев // Современные проблемы электрометаллургии, Челябинск, 01 сентября 2007 года. Том 2. – Челябинск, 2007. – С. 167-172.

98. Пат. RU 2007896 С1. Устройство орошения электрода дуговой сталеплавильной печи / предприятие «Пионер». Заявл. 31.03.1992; опубл. 15.02.1994.

99. Дыскина, Б. Ш. Использование техногенных отходов уральского региона для защиты графитированных электродов / Б. Ш. Дыскина, Т. В. Кабанова // Успехи в химии и химической технологии. – 2014. – Т. 28, № 10(159). – С. 39-41.

100. Atsushi Ukai. Some Considerations on Graphite Electrodes in Electric Arc Furnace / Atsushi Ukai, Takashi Ohtsuka, Yasuhiko Tsuruta. [Электронный ресурс] / https://www.jstage.jst.go.jp/article/denkiseiko1925/53/3/53_3_211/_pdf. (дата обращения 10.05.2020).

101. Жмуриков, Е. И. Графит в науке и ядерной технике / Е. И. Жмуриков, И. А. Бубненко, В. В. Дремов [и др.]. – Новосибирск : Издательство Сибирского отделения РАН, 2013. – 163 с. – ISBN 978-5-7692-1314-4. – EDN ZBONRT.

102. Гурвич, О.С. Высокотемпературные электропечи с графитовыми элементами. Библиотека электротермиста, выпуск № 53 / О.С. Гурвич, Ю.П. Ляхин, С.И. Соколов. – М.: Энергия, 1974. – 104 с.

103. Rafiei, R. Numerical thermal simulation of graphite electrode in EAF during normal operation / R. Rafiei, A. Kermanpur, F. Ashrafizadeh // *Ironmaking and Steelmaking*. – 2008. – Vol. 35. – No. 6. – P. 465-472.

104. Borlée, J. Monitoring system for controlling and reducing the electrode consumption in DC EAF plant / J. Borlée, M. Wauters, C. Mathy, M. Weber, M. Picco, J.-C. Baumert, B. Kleimt, L. Sante Di., P. Frittella // *Research Fund for Coal and Steel*. – 2009. – 139 p. [Электронный ресурс] / <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/92d34db7-fa6c-4897-964a-dc9963018193/language-en>. (дата обращения 12.05.2019).

105. Кожухов, А.А. К вопросу о распределении температур в электродах дуговой сталеплавильной печи / А.А. Кожухов, Э.Э. Меркер, А.В. Сазонов // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2008. – №9. – С.7-10.

106. Nathan May. Multiphysics modeling of the graphite electrode joint in electric arc furnaces for scrap steel recycling. Nathan May, James Glickstein, Maren Waldner. [Электронный ресурс] / https://www.comsol.com/paper/download/437312/may_presentation.pdf. (дата обращения 10.06.2020).

107. Пашацкий, Н.В. Тепловое состояние электродов дуговых печей / Н.В. Пашацкий, Е.А. Молчанов // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 1998. – №5. – С. 24-26.

108. Пат. US 4852120 A. Cooling apparatus for electric arc furnace electrodes / Eigi Udo. Заявл. 08.11.1988; опубл. 25.07.1989.

109. Пат. DE 19806332 A1. Electrode spray cooling arrangement for electro-melting furnace / Helmut Wolfram. Заявл. 05.02.1998; опубл. 19.08.1999.

110. Пат. RU 2293450. Устройство охлаждения электрода / Карк У. Патентообладатель Карк АГ (DE). Заявл. 08.08.2003; опубл. 10.02.2007.

111. Пат. u20040005. Устройство для охлаждения графитированных электродов / В.А. Яцко, В.Н. Прохоренко. Республиканское унитарное предприятие «Белорусский металлургический завод». Заявл. 08.01.2004; опубл. 30.09.2004.

112. Пат. u20050523. Устройство для охлаждения графитированных электродов / Н.В. Андрианов, В.А. Маточкин, В.Н. Прохоренко, В.Ю. Гуненков. Республиканское унитарное предприятие «Белорусский металлургический завод». Заявл. 30.08.2005; опубл. 28.02.2006.

113. Пат. DE 19624481. Опорное устройство для электрода дуговой печи / Koester Volkwin, Paul Guenter. Заявл. 19.06.1996; опубл. 02.01.1998.

114. Итальянский производитель систем ИО [Электронный ресурс] / <http://www.more-oxy.com/smartec-a-technological-package-to-reduce-electrode-consumption/> (дата обращения 13.05.2021).

115. Graphite Electrodes Production and Optimization Practices. [Электронный ресурс] / <https://www.ukessays.com/essays/engineering/graphite-electrodes-production-and-optimization-practices.php>. (дата обращения 13.05.2021).

116. Турчак, Л. И. Основы численных методов : учебное пособие / Л. И. Турчак, П.В. Плотников. – М.: Физматлит, 2003. – 304 с. – ISBN 5-9221-0153-6.

117. Крайнов, А.Ю. Численные методы решения краевых задач для обыкновенных дифференциальных уравнений : учебное пособие / А.Ю. Крайнов, К.М. Моисеева. – Томск: СТУ, 2016. – 44 с.

118. Самарский, А.А. Численные методы : учебное пособие / А.А. Самарский, А.В. Гулин. – Москва: Изд-во Наука, 1989. – 428 с.

119. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614348 Российская Федерация. Тепловое состояние графитированного электрода при подаче охладителя в осевой канал : № 2019613134 : заявл. 27.03.2019 : опубл. 02.04.2019 / И. М. Ячиков, М. В. Быстров, И. В. Портнова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – EDN XCPGXP.

120. Никольский, Л.Е. Оборудование и проектирование электросталеплавильных цехов / Л.Е. Никольский, И.Ю. Зинуров. – М.: Металлургия, 1993. – 272с.

121. ГОСТ МЭК 60239–2014 Графитированные электроды для электродуговых печей. Размеры и обозначения. – М.: 2014. – 24 с.

122. Егоров, А.В. Электроплавильные печи черной металлургии : учебное пособие для вузов / А.В. Егоров – М.: Металлургия, 1985. – 280 с.

123. Чиркин, В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / В.С. Чиркин, Справочник. – М.: Атомиздат, 1968. – 484 с.

124. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик, Справочник. – М.: Наука, 1972. – 720 с.

125. Ячиков, И. М. Моделирование теплового состояния графитированного электрода при подаче газа в осевой канал / И. М. Ячиков, И. В. Портнова, М. В. Быстров // XV международный конгресс сталеплавильщиков : Сборник трудов, к 100-летию Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» и 380-летию российской металлургии, Тула, 15–19 октября 2018 года. Том 1. – Тула: ООО «РПК ПринтАП», 2018. – С. 180-186. – EDN TSMINA.

126. 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. – EDN HNTMMF.

127. 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 : Тезисы докладов 77-й международной

научно-технической конференции, Магнитогорск, 22–26 апреля 2019 года. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2019. – С. 347. – EDN WVLIKJ.

128. 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. – EDN BORTCI.

129. 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 Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallургия*. – 2022. – Т. 22, № 1. – С. 67-77. – DOI 10.14529/met220107. – EDN GFBXVU.

130. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017617959 Российская Федерация. Моделирование теплового состояния электрода ДСП : № 2017614784 : заявл. 22.05.2017 : опубл. 18.07.2017 / И. М. Ячиков, М. В. Быстров, И. В. Портнова, И. А. Якимов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – EDN WTCKUM.

131. Апалькова, Г.Д. Эксплуатация графитированных электродов на предприятиях металлургического комплекса России. Проблемы и пути их решения / Г.Д. Апалькова, И.И. Просвирина, В.Е. Рощин, В.С. Галян, С.Е. Вдовин // *Металлургия*. – 2002. – № 10. – С. 146-148.

132. Еланский, Г.Н. Неделя высоких металлургических технологий / Г.Н. Еланский // *Сталь*. – 2000. – № 2. – С. 27-30.

133. Кац, Я.Л. Проектные показатели дуговой сталеплавильной печи производительностью 220 тыс. т жидкой стали в год для мини-завода / Я.Л. Кац, Н.В. Пасечник // *Электрометаллургия*. – 2005. – № 1. – С. 2-6.

134. Сафонов, В.М. Современная электродуговая печь: основные параметры и концептуальные решения / В.М. Сафонов, А.Н. Смирнов // *Электromеталлургия*. – 2005. – № 6. – С. 2-13.

135. Сиддики, Ф. Дуговая сталеплавильная печь с системой «Данарк» и современная технология электроплавки / Ф. Сиддики, В.Н. Коломота, Р.Н. Пильчук // *Сталь*. – 2003. – № 11. – С. 43-45.

136. 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 : сборник докладов II Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Заслуженного деятеля науки и техники РФ Юрия Гавриловича Ярошенко, Екатеринбург, 18–21 сентября 2017 года / Министерство образования и науки Российской Федерации; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Институт новых материалов и технологий, Кафедра «Теплофизика и информатика в металлургии»*. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2018. – С. 203-208. – EDN YVNTOT.

137. Mokhov V.A., Yachikov I.M. Simulation of the thermal state of graphitized electrodes in an arc furnace with allowance for evaporation cooling. *Russian metallurgy (Metally)*. 2013;2013(6):465–470. DOI: 10.1134/S0036029513060116

138. Филиппов, В.В. Новые технические решения и этапы реконструкции металлургического оборудования РУП «Белорусский металлургический завод» / В.В. Филиппов, В.А. Маточкин, В.А. Тищенко, М.П. Гуляев // *Литье и металлургия*. – 2002. – №1. – С. 80-83.

139. Ячиков, И. М. Компьютерное моделирование угара графитированного электрода при его испарительном охлаждении в дуговых печах / И. М. Ячиков, И. В. Портнова, М. В. Быстров // *Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве : сборник докладов VIII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2019) с международным участием, Екатеринбург, 16–17 мая 2019 года / Министерство*

науки и высшего образования и Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Институт новых материалов и технологий, Кафедра «Теплофизика и информатика в металлургии». – Екатеринбург: ООО АМК «День РА», 2019. – С. 192-196. – EDN APQFAY.

140. 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 XVII Международной конференции: в 2 частях, Старый Оскол, 03–06 октября 2017 года. Том Часть 2. – Старый Оскол: Издательский центр ЮУрГУ, 2017. – С. 191-198. – EDN YWCOAQ.

141. Mokhov, V. A. Simulation of the thermal state of graphitized electrodes in an arc furnace with allowance for evaporation cooling / V. A. Mokhov, I. M. Yachikov // Russian Metallurgy (Metally). – 2013. – Vol. 2013, No. 6. – P. 465-470. – DOI 10.1134/S0036029513060116. – EDN SKVRGR.

142. 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 Conference Series: Materials Science and Engineering : 15, Nizhny Tagil, 18–19 июня 2020 года. – Nizhny Tagil, 2020. – P. 012019. – DOI 10.1088/1757-899X/966/1/012019. – EDN QVIJQE.

143. Богданов, С.П. Расчет дуговых сталеплавильных печей: методические указания / С.П. Богданов // – СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2006. – 44с.

144. 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: Материалы II национальной научной конференции, Курган, 21 апреля 2022 года / Отв. редактор Е.Н. Полякова. – Курган: Курганский государственный университет, 2022. – С. 333-339. – EDN RLOBQO.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(Обязательное)

Акты внедрения результатов диссертационного исследования

УТВЕРЖДАЮ



Генеральный директор
 ПАО «Сиблитмаш»
 А.К. Масалов

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата
 технических наук Быстрова Михаила Викторовича

Комиссия в составе:

1. Вергай В.Ф. технического директора ПАО «Сиблитмаш»
2. Щенникова А.В. директора по производству ПАО «Сиблитмаш»
3. Пахомова Ю.В. главного металлурга ПАО «Сиблитмаш»

составили настоящий акт о том, что на основе результатов диссертационной работы Быстрова М.В. было разработано и изготовлено экспериментальное устройство для испарительного охлаждения графитированных электродов ДППТ-6 ПАО «Сиблитмаш», используемой для выплавки различных марок сталей и чугунов, включающее в себя: кольцо испарительного охлаждения с системой отверстий, смонтированное вокруг электрода, гибкие шланги для подачи воды к кольцу, система управления подачей воды и воздуха.

С помощью разработанного устройства были осуществлено 5 экспериментальных плавок, показавшие, что:

1. Разработанное устройство для испарительного охлаждения графитированного электрода позволяет снизить угар на 10–15 % при расходе охлаждающей воды 0,1-0,15 м³/ч.

2. Созданное диссертантом программное обеспечение для определения теплового состояния графитированных электродов в дуговых печах, работающих на постоянном или трехфазном переменном токе показало практическую ценность. С использованием компьютерного моделирования было проведено исследование угара графитированного электрода в условиях шеститонной дуговой сталеплавильной печи постоянного тока и найден рациональный расход воды на испарительное охлаждение.

Комиссия считает, что предложенные Быстрым М.В. в рамках диссертационного исследования по использованию испарительного охлаждения графитированных электродов и программное обеспечение может быть встроено в систему автоматизированного регулирования и прогнозирования угара графитированных электродов при наличии системы испарительного охлаждения.

Согласовано:

Технический директор ПАО «Сиблитмаш»
 Директор по производству ПАО «Сиблитмаш»
 Главный металлург ПАО «Сиблитмаш»

Вергай В.Ф.
 Щенников А.В.
 Пахомов Ю.В.



ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«КОРПОРАЦИЯ ВСПМО-АВИСМА»

УТВЕРЖДАЮ:

И.о. директора по НИТ АВИСМА

 А.Б. Танкеев

«22» 01/2021 г

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук **Быстрова Михаила Викторовича**

Комиссия в составе:

1. Главного технолога по производству титана – Власова Сергея Александровича;
2. Зам. начальника цеха № 37 по технологии – Демидова Александра Александровича

составила настоящий акт о том, что на основе использования результатов диссертационной работы Быстрова М.В. и изучения существующего опыта испарительного охлаждения электродов на российских металлургических предприятиях (ПАО «ММК» г. Магнитогорск и АО «ОЭМК» г. Оскол) было принято решение о необходимости разработки и изготовления экспериментального устройства для испарительного охлаждения графитированных электродов дуговой рудно-термической печи цеха № 37 АВИСМА, используемой для производства титанового шлака и попутного металла (Fe).

Автором диссертации Быстровым М.В.:

1. Разработано программное обеспечение (Моделирование теплового состояния электрода ДСП, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. №2017617959.) для определения теплового состояния и термического угара графитированных электродов в дуговых печах.

2. Предложена конструкция экспериментального устройства испарительного охлаждения, включающего в себя: кольцо с отверстиями, смонтированное вокруг электрода, трубопроводы для подачи воды и воздуха, а также системы управления подачей воды и воздуха.
3. На основании исходных данных выданных специалистами АВИСМА филиал ПАО «Корпорация ВСППО-АВИСМА» с использованием компьютерного моделирования было проведено исследование угара графитированного электрода в условиях работы стотонной дуговой рудно-термической печи. Найден оптимальный расход воды на испарительное охлаждение, составляющий около 1–1,5 м³/ч и время включения испарительного охлаждения через 10 минут после ввода холодного электрода в печь.

На основании проведенного анализа расчётных данных и с учётом того, что практика охлаждения электродов рудно-термической печи при производстве титанового шлака на территории стран СНГ отсутствует можно считать, что разработанное устройство для испарительного охлаждения графитированного электрода позволит снизить его угар минимум на 10 % при расходе охлаждающей воды на один электрод 1 - 1,5 м³/ч.

Для сравнительного анализа расхода охлаждаемых и не охлаждаемых электродов устройство испарительного охлаждения планируется смонтировать на одном из трёх электродов рудно-термической печи цеха № 37 АВИСМА в 2022 году.

Комиссия считает, что предложенные Быстровым М.В. использование испарительного охлаждения графитированных электродов и программное обеспечение может быть встроено в систему автоматизированного регулирования технологического процесса производства титанового шлака на АВИСМА.

Главный технолог по производству титана



Власов С.А.

Зам. начальника цеха № 37 по технологии



Демидов А.А.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(Обязательное)

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017617959

Моделирование теплового состояния электрода ДСП

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (RU)*

Авторы: *Ячиков Игорь Михайлович (RU), Быстров Михаил Викторович (RU), Портнова Ирина Васильевна (RU), Якимов Иван Александрович (RU)*

Заявка № 2017614784

Дата поступления 22 мая 2017 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 18 июля 2017 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019614348

**Тепловое состояние графитированного электрода при подаче
охлаждителя в осевой канал**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет
им. Г.И. Носова» (RU)*

Авторы: *Ячиков Игорь Михайлович (RU), Быстров Михаил
Викторович (RU), Портнова Ирина Васильевна (RU)*

Заявка № 2019613134

Дата поступления 27 марта 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 02 апреля 2019 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев