

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»



На правах рукописи

МАРТЫНОВА **Елизавета Сергеевна**

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ
ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОДНЫХ ПЕЧЕЙ ПРИ
РЕГУЛИРОВАНИИ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (металлургия)

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:
доктор технических наук, доцент, проректор
по научно-инновационной деятельности
Бажин Владимир Юрьевич

Санкт-Петербург – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПРАКТИКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДУГОВЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ ДЛЯ ВЫПЛАВКИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СТАЛЕЙ.....	10
1.1 Динамика мирового производства стали	10
1.2 Классификация дуговых сталеплавильных печей.....	12
1.3 Характеристика оборудования для выплавки стали	13
1.4 Производственный процесс на сталеплавильном производстве	17
1.4.1 Основные химические реакции в процессе плавки стали.....	19
1.4.2 Энергия плавления в печи	21
1.4.3 Характеристики электрической дуги	23
1.5 Сырье для производства стали в ДСП.....	27
1.6 Огнеупорные материалы, используемые для футеровки ДСП.....	28
1.7 Анализ существующих систем автоматического управления процессом плавки в дуговых печах.....	32
1.7.1 Типовые замеры температуры в ДСП.....	38
1.7.2 Существующие автоматические регуляторы мощности дуги.....	39
1.7.3 Существующие средства автоматизации в России и за рубежом.....	42
1.7.4 Существующие способы контроля параметров дуговой печи	43
1.8 Выводы по Главе 1.....	45
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	47
2.1 Программа экспериментальных исследований	47
2.2 Выбор и обоснование метода лабораторных исследований	47
2.2.1 Методика определения зависимости изменения температуры футеровки и электродов от изменения температуры металла в течение плавки.....	55
2.3 Промышленные исследования современных печей ДСП	55
2.3.1 Оборудование, используемое для проведения промышленного эксперимента.....	56

2.3.2 Методика проведения промышленного эксперимента	58
2.4 Определение статистических зависимостей	59
2.5 Выводы по Главе 2.....	63
ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТАЛЛА НА ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ	64
3.1 Изучение влияния температуры металла на температуру футеровки и электродов во время плавки	64
3.2 Влияние изменения температуры металла во время плавки на футеровку печи ДСП-90.....	75
3.3 Выводы по Главе 3.....	79
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПЛАВКИ В ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ.....	81
4.1 Управление тепловым состоянием дуговой сталеплавильной печи	81
4.2 Разработка способа контроля параметров дуговой сталеплавильной печи ..	88
4.3 Моделирование процесса плавки металлолома в ДСП	95
4.4 Предложенная система управления дуговой сталеплавильной печью	105
4.5 Экономическая эффективность предлагаемого решения по автоматизации ДСП	113
4.5.1 Расчёт себестоимости продукции цеха по выплавке стали	113
4.5.2 Расчёт экономической эффективности проекта автоматизации ДСП... ..	115
4.5.3 Техничко-экономические показатели предлагаемого решения по автоматизации ДСП	116
4.6 Выводы по Главе 4.....	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	119
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	121
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	123

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

В настоящее время в России и за рубежом для производства высоколегированных сталей широкое распространение получили электродуговые сталеплавильные печи (ДСП) различного типа. Преимуществами электродугового способа являются высокая производительность и способность использовать в качестве сырья металлический лом. Для современных дуговых печей существует ряд недостатков и проблем устойчивой эксплуатации, связанных с низким уровнем контроля и управления технологическими параметрами процесса.

В области образования дуги выделяется большая мощность, и в следствие этого возникают проблемы равномерного нагрева для плавления шихтовых материалов, загруженных в печь. Существует необходимость поддержания заданного электрического режима работы печи с заданными значениями тока, напряжения и мощности при заданных значениях длины дуги. В процессе плавки в электродуговой печи длина электрической дуги постоянно меняется без заданного алгоритма управления, что непосредственно влияет на тепловое состояние ванны печи и ее элементов и конструкций при нагреве шихтовых материалов до расплава. В настоящее время контроль температуры в ДСП осуществляется вручную одноразовой термопарой в конце плавки для определения степени готовности металла. Существующие методы контроля дуговых печей и уровень автоматизации не соответствуют современным тенденциям развития техники и физико-химическим условиям плавильных процессов многокомпонентных сплавов, что приводит к преждевременному выходу из строя электродов и футеровки печей, а также большому количеству брака при низком выходе годной продукции.

Вопросами автоматизации дуговых сталеплавильных печей занимались отечественные и зарубежные организации: ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», ОАО «Научно-исследовательский институт металлургии», АО «Гипроцветмет», АО «Институт «ГИНЦВЕТМЕТ», Schenck Process Group, American Iron and Steel Institute (США), Danieli Automation SPA (Италия), ArcelorMittal (Люксембург),

Nippon Steel (Япония), HATCH (Канада), Outokumpu Technology (Финляндия), XiAn Typical Industries Co Ltd (Китай). Значительный вклад в изучение развития процессов в ДСП и других агрегатов для выплавки стали и повышения уровня контроля и автоматизации внесли известные российские ученые, такие как Д.А. Диомидовский, Я.Б. Данцис, В.А. Ершов, Г.М. Жилов, Л.Е. Никольский, А.А. Педро, П.В. Сергеев, А.Н. Морозов, Д.Я. Поволоцкий, Ю.А. Гудим, В.Д. Смоляренко, А.Н. Макаров, А.Н. Кузнецов и др. Большую известность получили результаты работ зарубежных авторов: А. Энгеля, М. Штенбека, В. Финкельнбурга. В работах этих авторов систематизированы многолетние исследования ученых ряда стран в области электродуговых печей и теплового состояния плавильных агрегатов.

Однако, изучение вопросов контроля теплового поля в шахте печи, состояния электродов и элементов кожуха для эффективного управления дуговой сталеплавильной печью в процессе плавки исходного металлургического сырья является нерешенной до настоящего времени в полном объеме проблемой и остается одной из актуальных задач в металлургической отрасли.

Цель работы – Повышение качества функционирования электродуговых печей на основе изучения влияния мощности электрической дуги на тепловое состояние процесса для прогнозирования технологического состояния и устойчивой работы при включении в систему управления и автоматизации дополнительных алгоритмов адаптации во время плавки многокомпонентных шихтовых материалов.

Основные задачи исследования:

- анализ состояния современных систем управления дуговыми сталеплавильными печами и температурным состоянием процесса, выполнение патентное исследование;
- определение зависимости между температурами расплава, электродов и футеровки печи с установлением значений передаточного теплового коэффициента расплава и элементов футеровки печи;

– расчет теплового баланса и трехмерное математическое моделирование тепловых потоков при изменении положения электродов и значения напряжения в дуговой печи;

– разработка алгоритма управления тепловым состоянием ванны печи и температурой расплава посредством изменения длины дуги при вводе дополнительных параметров контроля.

Методология и методы исследований

В диссертационной работе использовались данные, полученные в ходе лабораторных и промышленных исследований процесса плавки металлической шихты в дуговой печи. Обработка и анализ результатов, полученных в ходе лабораторных и полупромышленных испытаний, проводились стандартными методами статистики с использованием стандартных программных пакетов. Синтез регулятора и его настройки производились в программном пакете Matlab R2014b. Тестирование предложенной системы управления производилось по архивным данным процесса плавки в ДСП.

Научная новизна результатов диссертационного исследования заключается в следующем:

– определен передаточный тепловой коэффициент электродуговой печи на основе полученных зависимостей между температурами расплава и элементами футеровки, и электродов;

– методом трехмерного математического моделирования рассчитано распределение температурного поля в ванне, футеровке, кожухе и электродах печи при перемещении электродной свечи в ДСП;

– разработан и обоснован алгоритм управления тепловым состоянием ванны и конструктивных элементов печи и температурой расплава посредством изменения длины дуги;

– обоснованы дополнительные функции АСУ ТП с учетом показателей теплового режима печи на основе косвенного контроля температуры электродов и конструктивных элементов с применением алгоритмов адаптации параметров

регулятора для стабильного технологического процесса плавки многокомпонентной шихты.

Основные защищаемые положения:

1. Энергетический баланс плавки и температурный градиент дуговой сталеплавильной печи при изменении температуры расплава в 2.0-2.5 раза определяется скоростью изменения температуры элементов футеровки, которая в 3.0-3.5 раза выше скорости изменения температуры электродов.

2. Изменение величины дуги от 100 до 600 мм в соотношении с адаптивной величиной температуры футеровки и электродов через встроенные термопары зависит от результатов расчетной математической модели теплового поля дуговой сталеплавильной печи при расширении дополнительных функций управления АСУ ТП.

Теоретическая и практическая значимость работы:

– на основе практических данных современных отечественных агрегатов разработан алгоритм управления тепловым состоянием дуговой сталеплавильной печи, который позволяет контролировать измерения температуры в нескольких точках и более точно оценить длину дуги, что повышает уровень управления тепловым состоянием печи при дополнении к существующим SCADA-системам, а также дает возможность прогноза и оценки технологической ситуации для эффективности управления процессом плавки в ДСП на предприятии ООО «Ростовский электрометаллургический завод»;

– способ контроля параметров дуговых печей позволяет уменьшить энергозатраты на 10-15% и повысить качество готового расплава, снизить количество преждевременно выходящих из строя электродов и подовой и боковой футеровки за счет повышения достоверности данных теплового состояния печи;

– реализованы программные продукты для контроля технологических параметров ДСП и управления процессом плавки металлолома (патент на изобретение №2612340 и свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2018614175), апробированные в условиях действующего производства.

Достоверность результатов

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается большим объемом экспериментальных исследований, применением современных методов статистического анализа, сходимостью теоретических и экспериментальных результатов, тестированием системы управления на лабораторных и промышленных архивных данных о протекании технологического процесса плавки металлолома в ДСП.

Апробация работы

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований, представленные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались: на I Международной научно-практической интердисциплинарной конференции «Фундаментальные и академические прикладные исследования» (Москва, 15 мая 2017 год); Международной междисциплинарной конференции «Инновации в области науки, техники, бизнес-инженерии, образовании» (Екатеринбург, 30 апреля 2018 год); Международной научно-практической конференции «International Conference on Advancing Knowledge from Multidisciplinary Perspectives in Science, Engineering & Technology» (Красноярск, 4-6 апреля 2019 год); Международной конференции во Фрайбергской горной академии (Фрайберг, 6-7 июня 2019 год).

Личный вклад автора состоит в формулировке целей, постановке задач и разработке методики исследований; в проведении анализа научно-технической литературы и патентного поиска; выполнении лабораторных и промышленных исследований; разработке технических решений, адаптированных к условиям действующего сталеплавильного производства; научном обобщении полученных результатов и подготовке публикаций.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 8 печатных трудов, в том числе 4 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, 1 статья, входящая в международную базу цитирования Scopus; получены 1 патент на изобретение и 1 свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 132 страницах. Содержит 58 рисунков, 15 таблиц и список литературы из 104 наименований.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПРАКТИКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДУГОВЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ ДЛЯ ВЫПЛАВКИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СТАЛЕЙ

1.1 Динамика мирового производства стали

В настоящее время в мире для выплавки стали в основном используют кислородный конвертер и дуговую сталеплавильную печь (ДСП). Мартеновский способ производства стали в современных условиях неконкурентоспособен, что подтверждается практически полным выводом из эксплуатации мартеновских печей в России и за рубежом [54, 78, 80, 82]. Вопросами повышения эффективности дуговых печей занимались такие ученые, как Ю.А. Гудим, А.Н. Кузнецов, А.Н. Макаров, В.Д. Смоляренко, Д.Я. Поволоцкий, А.Н. Морозов, Л.Е. Никольский [37, 38, 46, 49].

Существенное количество из всей произведенной стали в ДСП выплавляют по так называемой одношлаковой технологии, то есть из железоуглеродистого окисленного полупродукта ДСП методами ковшовой обработки выплавляют сталь заданного химического состава и температуры [5, 8, 16, 17].

Доводка температуры и химического состава на установке печь-ковш (УКП) и вакуумирование являются наиболее распространенными методами внепечной обработки стали.

Основными задачами для производителей стали в ДСП являются:

- повышение производительности и снижение производственных затрат;
- обеспечение заданного качества продукции.

Производителям стали сложно обеспечить выполнение приведенных задач в связи с постоянно усиливающимся контролем в сфере охраны окружающей среды, требованиями по обеспечению безопасных условий труда и повышением стоимости энергетических и материальных ресурсов [88].

Производство стали в России и в мире в целом имеет положительную динамику, однако темпы роста российского производства стали значительно отличаются от мировых. Среднемировой темп роста за последние 10 лет составил 6%, в то время, как в РФ он равен 1% (рисунок 1.1).

По данным Всемирной ассоциации стали (World Steel Association, WSA) мировое производство стали в 2018 году выросло на 4,6% по сравнению с 2017 годом, составив 1,809 млрд. т. При этом производство стали увеличилось во всех регионах мира за исключением Евросоюза (рисунок 1.2).

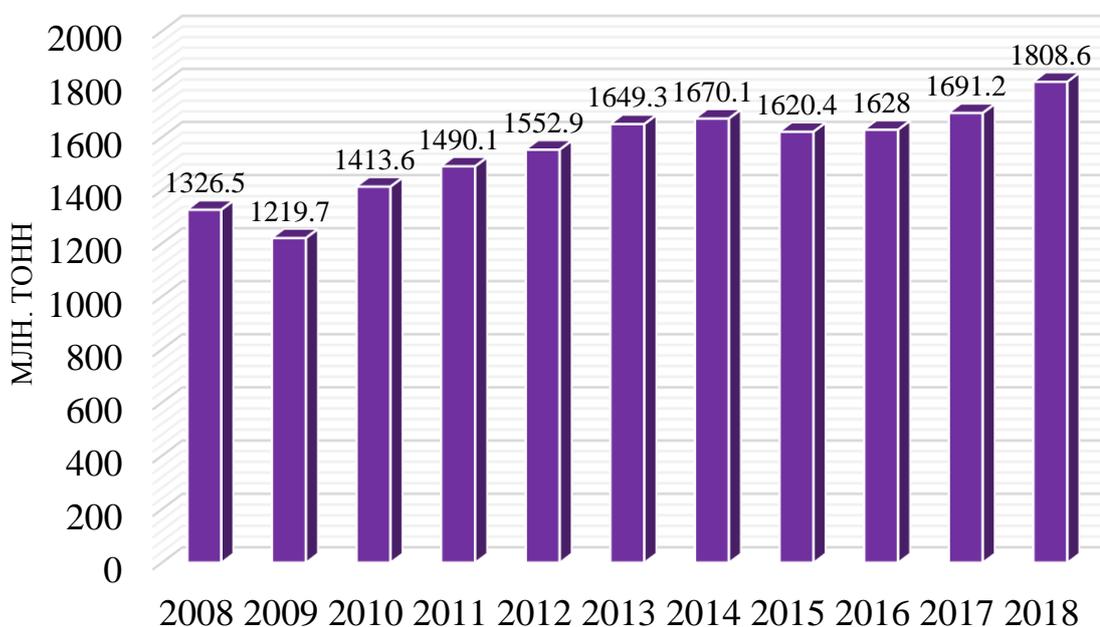


Рисунок 1.1 – Динамика производства стали в мире в 2008-2018 годах, млн. тонн

2018 год

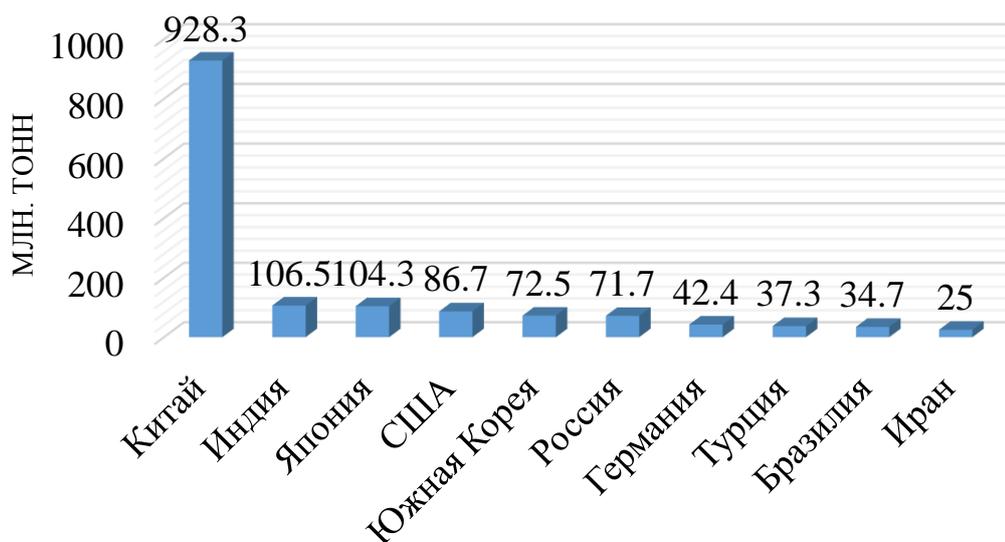


Рисунок 1.2 – Мировое производство стали за 2018 год

Значительная часть электростали в промышленно развитых и развивающихся странах обусловлена преимуществами ДСП, которые работают на

твердой шихте при высокой скорости расплавления. Это обеспечивает меньшие удельные капиталовложения и энергозатраты, более высокую производительность и меньшее количество выбросов вредных веществ в окружающую среду. Ассортимент сталей, выплавляемых в ДСП (от простой углеродистой и низколегированной до специальных высоколегированных сталей и сплавов), гораздо шире, чем в других агрегатах. Авторы работ [7, 10, 14] подчеркивают, что электроплавка более эффективна при использовании металлизированной шихты разного состава, отличается меньшими издержками производства, возможностью мобильного реагирования на изменения потребности рынка. С другой стороны, в работе [88] отмечено, что для выполнения заказов малого объема, в период сложной экономической конъюнктуры, электропечи очень удобны, так как могут работать периодически, что является значимым преимуществом в условиях рыночной экономики.

1.2 Классификация дуговых сталеплавильных печей

Данцис Я.Б. [18] приводит следующую классификацию существующих в настоящее время дуговых печей, которая и определяет уровень регулирования параметрами процесса и действия автоматизированных систем:

1. По роду используемого тока печи подразделяются на печи постоянного и переменного тока.

2. По емкости печи подразделяются на малой емкости (до 20 т), средней (от 21 до 75 т) и большой (более 75 т).

3. В зависимости от удельной мощности источника тока дуговые печи подразделяются на маломощные (менее 400 кВ·А/т), средней мощности (400-600 кВ·А/т), высокомощные (600-800 кВ·А/т) и сверхмощные (более 800 кВ·А/т).

4. В зависимости от вида огнеупоров, используемых для футеровки печи, бывают основные и кислые печи.

5. В зависимости от типа охлаждения печи делятся на водоохлаждаемые и с огнеупорной футеровкой.

6. По способу выпуска металла из печи различают печи с выпуском стали по желобу (сифонный или классический выпуск) и печи с донным выпуском сливом (центральный донный, эксцентричный и эркерный).

7. По типу конструкции бывают порталные и беспортальные.

8. По количеству ванн: с одной ванной и с двумя.

9. Существуют печи с устройствами подогрева шихты (например, системы Констилл, Брус, с шахтным подогревателем и другие) [1].

Начиная с 70-х годов XX века стали интенсивно эксплуатироваться дуговые печи постоянного тока. В процессе многолетней эксплуатации были выявлены их существенные недостатки: стоимость оборудования выше на 25-30 %, чем у печей переменного тока, подовый электрод является элементом повышенной опасности, в результате чего требуется повышенный контроль за его состоянием, что ограничивает технологические возможности печи, появляются дополнительные затраты на поддержание и ремонт источника постоянного тока.

Альтернативой печам постоянного тока являются печи переменного тока. Они также имеют ряд недостатков: значительный шум при работе дуги, особенно при расплавлении шихты, высокий расход электродов в зоне дуг. Несмотря на указанные недостатки, совершенствование конструкций печей переменного тока, появление технологии плавки на «болоте», а также применение альтернативных источников тепла привели к снижению негативное воздействие от указанных недостатков. В результате чего начиная с 2000 годов строительство новых печей постоянного тока прекратилось, за исключением особых условий эксплуатации [2].

1.3 Характеристика оборудования для выплавки стали

Современная дуговая сталеплавильная печь в промышленности начала широко использоваться в середине XX века. Принцип ее действия основан на плавлении металла с помощью электрической дуги.

Основными преимуществами дуговой сталеплавильной печи являются:

– возможность регулирования окислительно-восстановительных свойств среды по ходу плавки, а также обеспечения в печи восстановительной атмосферы

и безокислительных шлаков, что предопределяет малый угар легирующих элементов;

– быстрый нагрев металла, связанный с вводом тепловой мощности в самом металле. Это позволяет вводить в печь большие количества легирующих элементов;

– плавная и точная регулировка температуры стали;

– более полное, чем в других печах, раскисление металла, получение его с низким содержанием неметаллических включений;

– получение стали с низким содержанием серы.

Авторы работ [31, 33, 39] подчеркивают, что одним из недостатков дуговой печи является необходимость обеспечения высокого качества шихтовых материалов, из которых 75-100 % составляет стальной лом (скрап). В шихтовых материалах должно содержаться как можно меньше примесей цветных металлов, фосфора, ржавчины. Шихтовые материалы должны быть тяжеловесными для загрузки их в один приём, так как каждая загрузка лома значительно удлиняет время плавки. Другой недостаток дуговой печи в непроизводительном использовании мощностей печи при низком потреблении энергии (окислительный и восстановительный периоды).

В работе Я.Б. Данциса [18] приведены следующие основные узлы ДСП:

– Механическое оборудование (кожух печи с футеровкой и с водоохлаждаемыми панелями, водоохлаждаемый свод с газоотводящим патрубком, арка рабочего окна, эркерный выпуск с обслуживающей площадкой, механизмы наклона печи, опорные балки свода, подъёма и поворота свода, стойки электрододержателей, электрододержатели, газоотвод);

– Трансформатор;

– Высоковольтное оборудование, короткая сеть;

– Системы управления электродами, печью, гидравлическим оборудованием;

– Гидросистемы зажима и позиционирования электродов, наклона и фиксирования корпуса печи в горизонтальном положении;

– Электрооборудование.

Однако, на действующих сталеплавильных производствах в настоящее время добавлено следующее оборудование:

- Газокислородные горелки;
- Система водяного охлаждения.
- Система автоматического управления на базе КИПиА, АСУ ТП;
- Оборудование для отбора проб и измерения температуры жидкой стали в печи [26, 55, 56, 57].

Слабым местом в конструкции ДСП является центральная огнеупорная часть водоохлаждаемых сводов, так как она имеет низкую механическую прочность и подвержена высоким термическим нагрузкам. По мере износа огнеупорной части свода увеличиваются электродные зазоры, что приводит к значительному повышению количества неорганизованных пылегазовых выбросов из рабочего пространства.

Дуговая сталеплавильная печь ДСП-90 представлена на рисунке 1.3.



Рисунок 1.3 – Дуговая сталеплавильная печь

В таблице 1.1 приведены характеристики ДСП, работающих на разных заводах.

Таблица 1.1 – Сравнение характеристик ДСП

Наименование параметра	ООО «РЭМЗ» (Россия)	Молдавский металлургический завод	«Валлорек» (Франция)
Масса плавки, т	90	122	88.5
Жидкий остаток, т	10	12.2	нет данных
Диаметр рабочего пространства по кожуху, мм	6000	7200	5800
Система выпуска	эркер	эркер	нет данных
Количество газокислородных горелок, шт	4	6	6
Мощность газокислородных горелок, МВт	3.5	3	3,5
Природный газ, нм ³ /мин	10	7,2	3,3
Количество кислородных фурм, шт	3	1	2
Вдуваемый кислород, нм ³ /т	40	50	25
Количество фурм для ввода углеродсодержащего порошка, шт	3	нет данных	нет данных
Расход электродов, кг/т	2.5	2.1	2.1
Установленная мощность печного трансформатора, МВА	75+20 %	80	85
Диаметр электродов, мм	610	610	нет данных
Длительность плавки, мин	52	65	63

Анализ промышленной ситуации показал, что дуговая сталеплавильная печь ДСП-90, применяемая на российском металлургическом предприятии ООО «РЭМЗ» имеет наименьшую длительность плавки, при этом расход электродов значительно превышает аналогичные показатели на Молдавском металлургическом заводе и на «Валлорек» (Франция) при средней массе плавке 90 т. Производительность данной печи уступает по показателям аналогичным агрегатам на зарубежных предприятиях, что говорит о необходимости усовершенствования системы контроля и автоматизации печи на ООО «РЭМЗ».

1.4 Производственный процесс на сталеплавильном производстве

Технология производства стали из вторичных материалов (металлического скрапа), как правило, реализуется в 2 стадии – получение полупродукта в электропечи и рафинирование полупродукта в сталеразливочном ковше с получением готовой стали в агрегате внепечной обработке «печь-ковш». Эти стадии должны контролироваться особенно в отношении температурного режима.

В ДСП производится расплавление металлошихты, дефосфорация, обезуглероживание и нагрев металла с использованием электроэнергии и топлива (кислород, природный газ и углерод). Включение печи производится после завалки скрапа, одновременно вводятся в действие газокислородные горелки. Скрап подается двумя порциями (завалки и подвалки).

Эти технологические операции существенно влияют на состояние футеровки печи, так как большие элементы шихтовых материалов царапают ее, приводя к механическим повреждениям, таким как сколы, трещины.

После проплавления колодцев, нагрева скрапа и образования свободного пространства, включается подача кислорода и порошка кокса. После оседания скрапа продолжает подаваться кислород и порошок кокса, что обеспечивает дожигание монооксида углерода в объеме печи.

Однако, из-за наличия разнородных по плотности шихтовых материалов проплавление скрапа происходит неодновременно, что приводит к перегреву футеровки в верхней части ванны печи, а также механическому повреждению электродов.

Подача кислорода и вдувание углерода производится до конца расплавления и выключается по достижении требуемого содержания углерода и температуры расплава. Интенсивное вдувание газообразного кислорода обеспечивает ввод дополнительной энергии за счет реакции окисления углерода и примесей в металле, а также за счет дожигания оксида углерода.

Никольский Л.Е., Смоляренко В.Д., Кузнецов Л.Н. в работе «Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей» [49] пришли к выводу, что вдувание по-

рошка кокса с присадкой извести обеспечивает возможность работы с применением технологии «пенистого шлака», что даёт возможность работать на длинных дугах с погружением их в шлак и защитой от них футеровки нижней части стен печи.

Несмотря на использование технологии «пенистого шлака», на практике футеровка прогревается неравномерно, что приводит к появлению трещин и снижению сроков ее эксплуатации.

Длительность рафинирования металла сводится к минимуму за счет раннего начала периода дефосфорации и обезуглероживания.

Избыточный шлак спускается самотеком через порог рабочего окна в конечной стадии расплавления и по ходу рафинирования (слив шлака производится без применения шлаковых чаш) [14].

Корректирующие добавки шлакообразующих материалов производятся по ходу плавки через отверстие в своде печи. При этом происходит периодическое удаление тепла из зоны рабочего пространства печи, что также негативно сказывается на сроке службы футеровки.

По достижении требуемого содержания углерода и фосфора, а также температуры, металл сливается в сталеразливочный ковш, предварительно разогретый до температуры не менее 1000 °С, с отсечкой железистого шлака (максимальное количество сливаемого шлака в ковш на выпуске 3-5 кг/т).

В процессе выпуска металла в ковш подаются ферросплавы (на нижний предел заданного анализа по легирующим элементам), кокс (при необходимости науглероживания металла), шлакообразующие для наведения нового восстановительного шлака, а также производится продувка стали аргоном через пористую пробку в днище ковша. Во время продувки резко увеличивается температура, и оказывается воздействие на футеровку за счет протекания реакций шлакообразования при удалении неметаллических включений и снижения газовой пористости расплава.

По достижении требуемого содержания углерода и фосфора, а также температуры (1600-1640°С), металл выпускается в сталеразливочный ковш.

После выпуска стали сталеразливочный ковш мостовым краном подается на установку «печь-ковш» (УПК).

На УПК происходит рафинирование жидкого металла посредством внесения добавок и ферросплавов для получения требуемого заказом химического состава. Нагрев металла на УПК осуществляется так же, как и в дуговой сталеплавильной печи, посредством электрической дуги.

После внепечной обработки жидкой стали и доведения её химического состава до заданных параметров, сталеразливочный ковш с металлом подают на машину непрерывного литья заготовок [55, 56].

После выливки металла температура футеровки снижается до 700-800°C, что приводит к изменению теплового поля в некоторых частях печи. Подобные перепады температуры отрицательно сказываются на состоянии футеровки печи: возникают микротрещины, происходит изменение толщины швов, образуются сколы и изломы).

Таким образом, особенности эксплуатации ДСП влияют на теплофизические свойства самих элементов футеровки (металлизация и зашлакованность). Все это изменяет тепловой баланс агрегата. Возникает необходимость постоянной корректировки мощности дуги, так как КПД печи и величина потребляемой энергии напрямую зависят от потерь тепла через футеровку печи [6, 7].

1.4.1 Основные химические реакции в процессе плавки стали

Во время процесса электродуговой плавки, особенно при загрузке разнородной шихты, может происходить множество химических процессов. Журавлев А.А. в своей работе [23] приводит следующие основные химические реакции, описывающие процессы в дуговой электропечи.

Окисление происходит, например, когда кислород соединяется с углеродом, находящемся в железе:

кислород + углерод → окись углерода
(растворенные в железе/стали)

Химическая формула:



Другие примеры окисления:

- окисление фосфора до оксида фосфора P_2O_5 ;
- окисление кремния до оксида кремния SiO_2 ;
- окисления марганца до оксида марганца MnO ;
- окисление железа до оксида железа FeO .

Реакции окисления протекают с выделением большого количества теплоты на поверхности расплава. Мощность тепловыделения ограничена, так как определяется расходом кислорода [12, 71].

При плавке металлолома в ДСП происходит следующая реакция восстановления:



Жилов Г.М. в работе «Теоретические основы химической электротермии» [22] указывает на то, что реакция восстановления железа является эндотермической. Она протекает равномерно при температуре в диапазоне от 1130 до 1630 °С. Является необратимой и заканчивается при полном преобразовании Fe_2O_3 углеродом. Данная реакция протекает в восстановительный период плавки и должна контролироваться.

Основные химические реакции в процессе плавки стали представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Основные химические реакции в процессе плавки стали

Реакция	Где протекает	Формы	Транспорт продукта	Воздействие	Контролируется
Оксид A + оксид B Образуется оксид AB	В шлаке	Шлак	Остается вверху шлака	Точка плавления Содержание кислорода	–
Металл + кислород	В стальной ванне	Шлак	Всплывает и соединя- ется вверху шлака	Содержание кислорода	–

Продолжение таблицы 1.2

Реакция	Где протекает	Формы	Транспорт продукта	Воздействие	Контролируется
Неметалл + кислород	В стальной ванне	Шлак или газ	Всплывает и соединяется вверху шлака или остается в шлаке	Содержание кислорода	–
Металл растворяется	В стальной ванне	Сплав	Остается в стальной ванне	Изменение содержания кислорода	+
Неметалл растворяется	В стальной ванне	Суспензия	Остается в стальной ванне	Содержание кислорода Свойства стали	–

1.4.2 Энергия плавления в печи

В цепях переменного и постоянного тока действуют напряжение и ток. Сергеев П.В. в работе [75] следующим образом описывают электрофизические процессы в ванне руднотермических печей.

Движущей силой в электрической цепи является напряжение (E), которое называется разностью потенциалов. Поток электронов, который движется по цепи, создает ток (I).

Для цепей постоянного тока это отношение называется сопротивлением (R).

В цепях переменного тока которое относят называется импедансом (Z), который складывается из сопротивления и реактивности (X):

$$Z = \sqrt{(R^2 + X^2)} \quad (1.3)$$

Именно импеданс печи может дать нам четкую характеристику напряжения и тока в короткой цепи, а также длину дуги. Исходя из значения длины дуги можно оценить тепловое состояние ванны печи. Импеданс является векторной (двумерной) величиной, состоящей из двух независимых скалярных (одномерных) – сопротивления и реактивности.

Сопротивление действует как в случае переменного (AC), так и в случае постоянного (DC) тока.

Реактивность, обозначаемая X , – мера той степени, с которой электронный компонент, цепь или система сохраняют или освобождают энергию, когда ток и напряжение изменяются в каждом цикле плавки.

Поскольку реактивность состоит из двух компонент: индуктивного сопротивления (X_L) и емкостного сопротивления (X_C), то в случае, когда переменный ток проходит через компоненту, которая содержит реактивность, то энергия может сохраняться и высвобождаться в форме магнитного поля, и в этом случае реактивность индуктивная (обозначаемая $+jX_L$); если энергия хранится и высвобождается в виде электрического поля, то в таком случае реактивность – емкостная (обозначается $-jX_C$). Все эти факторы приводят к локальным перегревам на границе «электрод-дуга-расплав» особенно на начальных стадиях процесса, когда происходят резкие изменения дуги.

Таким образом, обе силы противодействуют изменению тока, но различным путем, и для нашего случая можно провести адекватную оценку и получить искомые зависимости.

Индуктивная реактивность напрямую противодействует изменению напряжения. Если напряжение и ток изменяются в цепи, содержащей индуктивную реактивность, то ток будет не в фазе с напряжением. Максимальная величина тока будет достигнута в точке, на 90° отстающей от точки максимума напряжения, т.е. ток запаздывает относительно напряжения на 90° .

В отличие от этого, когда ток проходит через емкостную реактивность, он запаздывает относительно напряжения на 90° и компенсирует воздействие реактивной индуктивности. В некоторых работах отмечено, что ток генерирует реактивное и емкостное индуктивное напряжения [18, 19, 20, 21, 28, 55, 62, 64].

Импеданс, рассчитанный для вторичного контра печного трансформатора на основе изменений фазных напряжений и токов, в настоящее время является наиболее распространенным параметром регулирования. При использовании данного параметра обеспечивается процесс регулирования с таким образом, что вли-

яние одной фазы на другую сводится к минимуму. Это позволяет стабилизировать режим работы ДСП на стадии расплавления шихтовых материалов.

1.4.3 Характеристики электрической дуги

В работах Ю.М. Миронова, А.Н. Мироновой, П.В. Сергеева [46, 75, 76] приведены сведения о том, что дуга имеет низкую плотность, так как температура в столбе дуги приблизительно 7000 °С. Вследствие этого дуга легко смещается с высокой скоростью магнитными полями, особенно местными полями, создаваемыми токами, протекающими в кусках скрапа [66, 67].

В. Финкельнбург подчеркивает, что другим следствием низкой массы дуги является то, что тепловая емкость ее также низкая [90]. Когда ток выключается, столб ионизированной плазмы исчезает с постоянной времени, равной около миллисекунды. Таким образом, когда ток переменный (как в печи переменного тока), дуга имеет тенденцию охлаждаться каждый раз, когда ток падает до нуля [50, 81, 84].

Восстановлению дуги, когда заканчивается первый полупериод, в значительной степени содействует присутствие в цепи реактивности, поэтому чем больше реактивность, тем выше напряжение при нулевом токе, и тем более гладко происходит смена полярности тока. С этим тесно связан и коэффициент мощности, как отмечается в исследованиях [46, 90].

А. Энгелем и М Штенбеком доказано, что в начале плавки, когда дуга проходит между еще холодным графитовым электродом и холодными кусками стали, нестабильность напряжения дуги максимальна. В ходе плавки с повышением температуры форма напряжения дуги становится более гладкой. Дальнейшее улучшение формы происходит, когда конец дуги коснется расплава. В последней фазе, когда дуга погружена в пенящийся шлак, форма напряжения оказывается приближена к синусоидальной [90].

Фактическое значение коэффициента мощности $\cos \varphi$ дает принцип обеспечения стабильности дуги. $\cos \varphi$ – угловое смещение между напряжением и током, которое относится к полной цепи переменного тока, включая реактор (если он

есть), трансформатор и печь. Если $\cos \varphi = 1$, то напряжение и ток действуют параллельно без всякого смещения. В этом случае не будет никакого напряжения, необходимого для повторного зажигания электрической дуги, когда ток будет проходить через ноль каждую половину цикла. Электрическая дуга будет гаснуть каждые полцикла и не зажигаться вновь, пока напряжение между электродом и расплавленным металлом вновь не восстановится.

Анализ всех перечисленных работ показал, что нестабильная дуга приводит к ее обрыву. При этом теряется огромное количество времени на подъем и опускание электродов., что приводит к остыванию металла, то есть потере большого количества тепловой энергии.

Автор в работе [70] пришел к выводу, что для того чтобы получить стабильную дугу, между напряжением и током должно быть смещение, так чтобы напряжение опережало ток и обеспечивало величину, достаточную для повторного зажигания дуги в тот момент, когда ток дуги будет подходить к значениям близким к нулю. Отмечается, что только в этом случае получают непрерываемую стабильную дугу и высокое среднее значение потребляемой мощности. Опыт показывает, что для работы ДСП идеальным является значение коэффициента мощности $\cos\varphi=0,78-82$.

С другой стороны Педро А.А. в исследовании [61] подчеркивает необходимость регулирования дуги и согласование ее с амперной нагрузкой.

Во время плавления скрапа длина печной дуги изменяется быстро и хаотично, создавая падение напряжения в линии подачи электропитания к печи. Эти условия нестабильности называются «миганиями».

Величина миганий дуги зависит от отношения между мощностью короткого замыкания (S_f) ДСП и мощностью короткого замыкания электрической сети (S_{sc}) в общей точке нескольких подсоединений (РСС):

$$P_{st} = \frac{K_{st} \cdot S_f}{S_{sc}}, \quad (1.4)$$

где P_{st} – краткосрочное возмущение;

K_{st} – показатель воздействия неблагоприятных условий на печь;

S_{sc} – мощность короткого замыкания в точке РСС;

S_f – мощность короткого замыкания дуговой печи.

Значения K_{st} зависят от нескольких факторов:

- качества скрапа;
- регулирования электродов;
- механической и гидравлической системы печи;
- рабочей точки;
- стабильности дуги.

Анализ работы [63] по эксплуатации типовой дуговой сталеплавильной печи показал, что его значение находится в диапазоне 48-85. Типичное значение – 70.

Максимальная мощность достигается в полной цепи, когда сопротивление дуги равно сопротивлению реактора и $\cos \varphi = 0,707$. Максимальная мощность дуги оказывается в том случае, когда ее импеданс равен импедансу остальной части цепи. В литературе принято, что дуга считается полностью резистивной без какой-либо реактивной компоненты. Поэтому, если импеданс дуги равен импедансу всей цепи, то сопротивление дуги должно быть больше, чем реактивность остальной цепи. Это противоречит условию максимальной мощности цепи [75, 76, 77], что может сказаться на стабильности горения дуги.

Авторы работ [77, 82] пишут, что стабильность дуги, а, следовательно, и постоянство температурного поля, могут быть достигнуты только в том случае, если имеется достаточная реактивность в цепи. Это позволяет дуге вновь зажигаться в каждом полупериоде и обеспечивать стабильную работу.

С другой стороны Педро А.А. и его соавторы в своих работах [61-64] делают вывод, что на стабильность дуги воздействуют и другие факторы, даже если реактивность в цепи недостаточна для стабильной работы. Вспенивание шлака и весь объем расплава в печи обеспечивают наиболее стабильные условия. Кроме того, на стабильность дуги и время расплавления влияет также и тип скрапа, подлежащего плавлению.

Таким образом, принимаем что дуга, образованная между графитовым электродом и стальным скрапом, будет напрямую плавить скрап. Это является только частью процесса передачи тепла. Скрап, находящийся в непосредственной близости к дуге, подвергается интенсивному тепловому воздействию, излучаемому дугой. Это тепловой потенциал экзотермии скрапу, который может измеряться на основе первичной мощности за вычетом потерь в цепи. Другое соотношение учитывает переменный коэффициент теплопередачи (C_a) и определяет взаимоотношение между мощностью дуги и энергией, передаваемой ванне [67]:

$$P_u = P_o \cdot C_a, \quad (1.5)$$

где P_u – полезная мощность и P_o – мощность дуги.

На ранних этапах своего использования ДСП работали с относительно большой длиной дуги в течение почти всего цикла плавки. На основных стадиях плавления это было обосновано тем, что скрап поглощает тепло, излучаемое дугой. На более поздних стадиях тепло дуги поглощается стенками печи, и эта энергия теряется. Это приводит к повреждению огнеупорной облицовки и охлаждаемых водой панелей. Когда поверхность расплава плоская, нужна более короткая дуга.

В последнее время практика получения вспененного шлака позволила использовать технологию работы с длинной дугой, поскольку даже в условиях ровной поверхности расплава дуга погружена во вспененный шлак, который поглощает излучаемое тепло и улучшает передачу тепла расплаву. Вспененный шлак должен иметь постоянную высоту, чтобы гарантировать, что длинная дуга будет погружена все время, иначе эффективность использования подводимой мощности будет снижаться, а огнеупорная облицовка может эродировать [18, 29, 34, 36, 37].

Таким образом, можно заключить, что в настоящее время, несмотря на значительные достижения в области автоматизации управления электрической дугой в ДСП, остается нерешенной проблема максимального использования подводимой мощности при сохранении срока службы футеровочных материалов.

1.5 Сырье для производства стали в ДСП

Электродуговые печи независимо от их производительности и практически используемого способа плавления загружаются стальным скрапом или другими железосодержащими материалами, которые содержат не менее 80% железа. Это, например, губчатое железо (получаемое способом прямого восстановления – DRI), в виде окатышей или железа горячего брикетирования, а также чугуна после домен или альтернативных процессов (например, Corex), которые могут быть использованы как в жидкой (расплавленный металл), так и в твердой форме (чушки, гранулы, настыль или бракованные слитки). Кроме того, в случае производства легированной стали печная шихта может содержать также и ферросплавы (если отсутствует соответствующий скрап или по данным анализа стали недостаточно восстановленных из скрапа легирующих элементов) [73]. Все эти данные о сырье надо сохранять в базе данных для выбора эффективного режима плавления при начальных стадиях процесса.

Кроме черных металлов, загружаются и вводятся углерод и материалы, образующие шлак (известняк, известь, доломитовая известь и другие).

Основное сырье для производства стали в ДСП – это стальной скрап. Скрап – это энергоемкий и ценный товар, который поступает главным образом из трех источников:

- утилизируемый скрап (также известный как амортизационный лом), который получается из старых автомобилей, разрушенных зданий, выброшенных механизмов и бытовых предметов;

- промышленный скрап (также известный как «срочный скрап»), который создается промышленностью, использующей сталь в своих производственных процессах;

- возвратный скрап (также известный как цеховой скрап), который создается в ходе процессов производства стали и формовки (например, обрезки после операций прокатки, отходы металла в виде шлака и т.д.) [56].

Решение о составлении смесей скрапа, которые должны использоваться в определенной операции, зависит от нескольких факторов – таких, как наличие, стоимость скрапа, расходы на плавление, выход и воздействие на операции (на основе плотности скрапа, содержания масел и смазок и т.д.).

На практике большинство производителей приобретают различные виды скрапа и смешивают их для обеспечения наиболее желательного их воздействия на работу ЭДП (электродуговых печей).

Шихтовые материалы имеют совершенно различные размеры, содержание железа и химический состав, и поэтому в печь должна загружаться вполне определенная смесь скрапа, если желательно получить сталь с определенным химическим составом. Наличие негабаритных элементов приводит к повышенным затратам тепла.

Неметаллические добавки также загружаются в печь, и они должны добавляться в шихту в нужный момент, поэтому их эффективность будет снижена [17, 22, 23, 55, 56, 57].

Таким образом, от качества скрапа напрямую зависит количество необходимой энергии для его расплавления. Из-за неправильно смешанного скрапа часто на футеровке образуются механические повреждения (сколы, царапины, трещины), а также перегрев футеровочных материалов. Этот этап процесса необходимо контролировать по созданной специальной шкале и вносить в базу данных плавки Big Data на первый уровень SCADA-системы.

1.6 Огнеупорные материалы, используемые для футеровки ДСП

В начале применения ДСП все печи облицовывалась огнеупорным материалом, и никакие панели с водяным охлаждением не использовались.

Сегодня в ДСП применяется большое количество водоохлаждаемых панелей, и общее потребление огнеупора сильно снизилось из-за улучшения его свойств и качества. Однако подовая часть и нижние стенки облицовываются огнеупором, который должен быть ударостойким и выдерживать высокие температуры [25, 55].

Применение кислорода и более высокая производительность предъявляют дополнительные требования к огнеупорам, применяемым в современных ДСП типа UHP (Ultra High Power – сверхмощные дуговые печи).

Огнеупорный материал обладает стойкостью к размягчению или расплавлению при высоких температурах. Материал называется огнеупорным, если он сохраняет свои характеристики и свойства до температуры 1500°C. В настоящее время огнеупоры должны сохранять свои свойства вплоть до 1800°C.

Огнеупоры должны быть стойкими к химическому воздействию и эрозии. Шлаки, образующиеся во время плавки стали, могут быть весьма агрессивными, и поэтому от огнеупорных материалов требуется устойчивость к действию самых различных химических веществ [56].

Из-за значительных колебаний температур в типичном цикле плавки в ДСП огнеупоры должны обладать также и высокой стойкостью к тепловым ударам.

Необходимым требованием к огнеупорным материалам является механическая стабильность, то есть они должны иметь стабильный объем и не подвергаться чрезмерному расширению во время нагревания и сжатию при охлаждении, так как в процессе плавки происходит нормальное тепловое расширение. Также другие виды расширений (например, за счет фазовых переходов и т.д.) являются нежелательными

От теплопроводности огнеупорного материала зависит тепловой баланс ДСП, следовательно, она является важным свойством огнеупорных материалов и требует учета при выборе материала. Огнеупоры не должны обладать чрезмерной теплопроводностью, чтобы отбирать тепло у расплавленной ванны, поскольку температуры облицовки печи будут слишком высокими и прочность стальных плит, использованных в конструкции печи, будет снижена. Электропроводимость огнеупорного материала изменяется с изменением температуры, и при повышенных рабочих температурах эти воздействия не следует игнорировать [47, 55].

Обычно используются различные огнеупоры, поскольку условия в ДСП разные в зависимости от рабочей зоны огнеупора. Не каждый огнеупор обладает

всеми желаемыми свойствами, поэтому в каждой зоне ДСП используется определенный тип огнеупорного материала [57].

В таблице 1.3 показаны типичный огнеупорный материал из MgO и его физические свойства.

Огнеупорные материалы, предназначенные для применения в электродуговых печах, обычно используются в двух формах: в виде кирпичей и монолитного материала. Огнеупорные материалы состоят из трех различных зон:

- зерен или агрегата;
- связующего вещества;
- пор.

Это необходимо учитывать при выборе места встраивания термопар для измерения температуры футеровки различных зон печи. Для встраивания термопар наиболее удачным местом будет зона связующего вещества.

Таблица 1.3 – Типичный огнеупорный материал из MgO и его физические свойства

Углеродистый кирпич из окиси магния и смол	
Химический состав	
<i>MgO</i>	97%
<i>Al₂O₃</i>	0.4%
<i>Fe₂O₃</i>	0.6%
<i>CaO</i>	1.4%
<i>SiO₂</i>	0.7%
Остаточный углерод после обжига	10%
Физические свойства	
Объемная плотность	3.04 г/см ³
Видимая пористость (после обжига)	12%
Прочность на раздавливание при 20°C (после обжига)	25 Н/мм ²
Линейное тепловое расширение при 1400°C	1.65%
Теплопроводность при 1400°C	7.5 Вт/м °C

Существует три вида огнеупорных материалов – кислый (кремнезем или огнеупорная глина), нейтральный (боксит, глинозем, циркон или углерод) и основной (доломит, магнезит, окись магния с хромом или форстерит). В настоящее

время большинство печей ДСП облицовываются основными материалами, за исключением некоторых нейтральных основанных на глиноземе трамбовочных смесей. Это объясняется тем, что основные огнеупоры совместимы с основными шлаками (богатыми известью), которые используются сегодня при выплавке стали.

На предприятии ООО «Ростовский электрометаллургический завод» используется магнезитовый периклазовый огнеупорный материал для кладки арматурного слоя днища и стен.

Практика применения огнеупора в ДСП

Принцип работы часто оказывает значительное воздействие на поведение огнеупора. Если основным принципом является максимальная производительность, то решения будут направлены на обеспечение этой производительности, и в результате обслуживание огнеупора окажется не оптимальным. Максимальная производительность обычно требует более высококачественной начальной огнеупорной облицовки, которая, как ожидается, будет работать длительное время без значительного обслуживания.

Существует точка пересечения, где недостаток обслуживания фактически снижает производительность, так что принцип максимальной производительности часто требует точного баланса конструкции огнеупорной облицовки и ее обслуживания. Облицовка минимальной стоимости обычно имеет небольшую площадь и часто использует одни и те же сорт и толщину по всей печи. Этот принцип может быть эффективным при работе с небольшой интенсивностью.

Прогнозируемый период работы футеровки печи

Этот принцип обычно требует определенного периода между сменой облицовки или установкой заплат. При этом оператор электрической печи планируют все производство на двух-трехнедельный период, зная, что облицовка прослужит это время. Затем планируется установка заплат или смена облицовки, и начинается следующий прогнозируемый период работы. Этот принцип требует тесной координации и оптимизации облицовки с цеховыми операторами.

Минимальное время простоя

Этот принцип подобен принципу максимальной производительности, но без относительно к общей производительности. Огнеупорная облицовка должна обеспечить предсказуемую работу с очень небольшим обслуживанием, поскольку обычно требуется высококачественная исходная облицовка. На простой или обслуживании нет много времени – допустим будет простой только в течение смены или суточный простой. Допустимо прогнозируемое обслуживание, но оно должно проводиться на регулярной плановой основе.

Требования к огнеупорам электрических печей за последние несколько лет существенно изменились в связи с еще большими изменениями в технологии электрического плавления и прогрессе в ведении процесса. Растущее использование заменителей скрапа – железа прямого восстановления (DRI) и железа горячего брикетирования (HBI) – требует модифицированной печной облицовки. Последующее сжигание окиси углерода и растущее применение кислородно-топливных горелок предъявляет новые требования к характеристикам печной облицовки. Потребуется все большее применение водяного охлаждения в зоне дверных стоек и отверстий для горелок. Усилится требование снижения расхода веществ с содержанием хрома для огнеупоров и возвращения в оборот огнеупоров из всех процессов производства стали [55, 57].

1.7 Анализ существующих систем автоматического управления процессом плавки в дуговых печах

В разные периоды плавки требуется различная мощность для обеспечения процесса необходимым количеством тепла. Глинков Г.М. и его соавторы в работе [15] утверждают, что система управления дуговой сталеплавильной печью должна удовлетворять следующим требованиям.

Первое – гибкость управления. Например, при расплавлении скрапа мощность должна быть максимальной, а в период доводки металла – варьироваться в зависимости от введения легирующих материалов.

Вторым требованием является регулирование длины дуги на всех этапах плавки. Данное требование весьма важно, так как градиент столба дуги меняется на протяжении плавки, в период окисления и рафинирования длина дуги становится во много раз больше и интенсивно излучает тепло на футеровку стен как раз в тот момент, когда они находятся в тяжелых условиях из-за высокой температуры.

Третье требование заключается в поддержании в печи восстановительной атмосферы. В дуговых печах это условие легко выполнить. Свободный кислород отсутствует в печи благодаря сгоранию электродов, а доступ извне блокируется, если поддерживать электродные отверстия печи в нормальном состоянии [48, 55, 56, 57].

Обычно стандартное САУ ДСП обеспечивает:

- Управление мощностью дуги на определенном оператором уровне;
- Контроль тока и напряжения дуги в каждом из электродов свечи;
- Возможность ручного управления подъемом и опусканием электродов с панели оператора;
- Возможность аварийной остановки процесса по команде оператора;
- Невозможность запуска системы при срабатывании одного из конечных выключателей на электроде или наличие сигнала блокировки от систем защиты [55, 65].

Использование интегрированной автоматизированной системы управления (ИАСУ) позволяет достичь следующих целей управления:

- создание единого информационного пространства в рамках предприятия, что позволяет все процессы производства и управления сделать прозрачными и максимально эффективными;
- обеспечение заданной производительности за счет оптимального ведения технологических процессов и эффективного использования ресурсов;
- осуществление сквозного контроля качества продукции, хода производственных и бизнесовых процессов;

- снижение себестоимости продукции за счет уменьшения удельных расходов энергоносителей;

- снижение операционных затрат на снабжение и оптимизацию цепочек поставок и сбыта продукции;

- повышение качества оперативного управления производством за счет своевременного обеспечения персонала цехов и завода объективной и полной информацией о ходе технологических процессов, качестве исходного сырья и готовой продукции, состоянии оборудования и уровня запасов сырья и материалов, финансово-экономической деятельности [68, 55, 56].

Интегрированная АСУ структурно предусматривает 3 уровня (рисунок 1.5):

I уровень (нижний) – базовая автоматика и АСУТП основных технологических процессов, газоочисток и центральной вытяжной станции;

II уровень (средний) – автоматизированная система оперативного планирования и управления производством (MES-система, Manufacturing Execution System);

III уровень(верхний) – АСУ административно – производственной и финансово-коммерческой деятельностью предприятия (ERP-система, Enterprise Resource Planning общезаводской уровень управления).

Анализ действующего производства показал, что информационный обмен между системами различных уровней управления, а также внутри уровней и систем осуществляется посредством корпоративной компьютерной сети завода. Данная сеть является составной частью структурированной кабельной системы (СКС) предприятия [55]. Ввод дополнительной информации на 1 уровень повысит эффективность работы АСУ ТП.

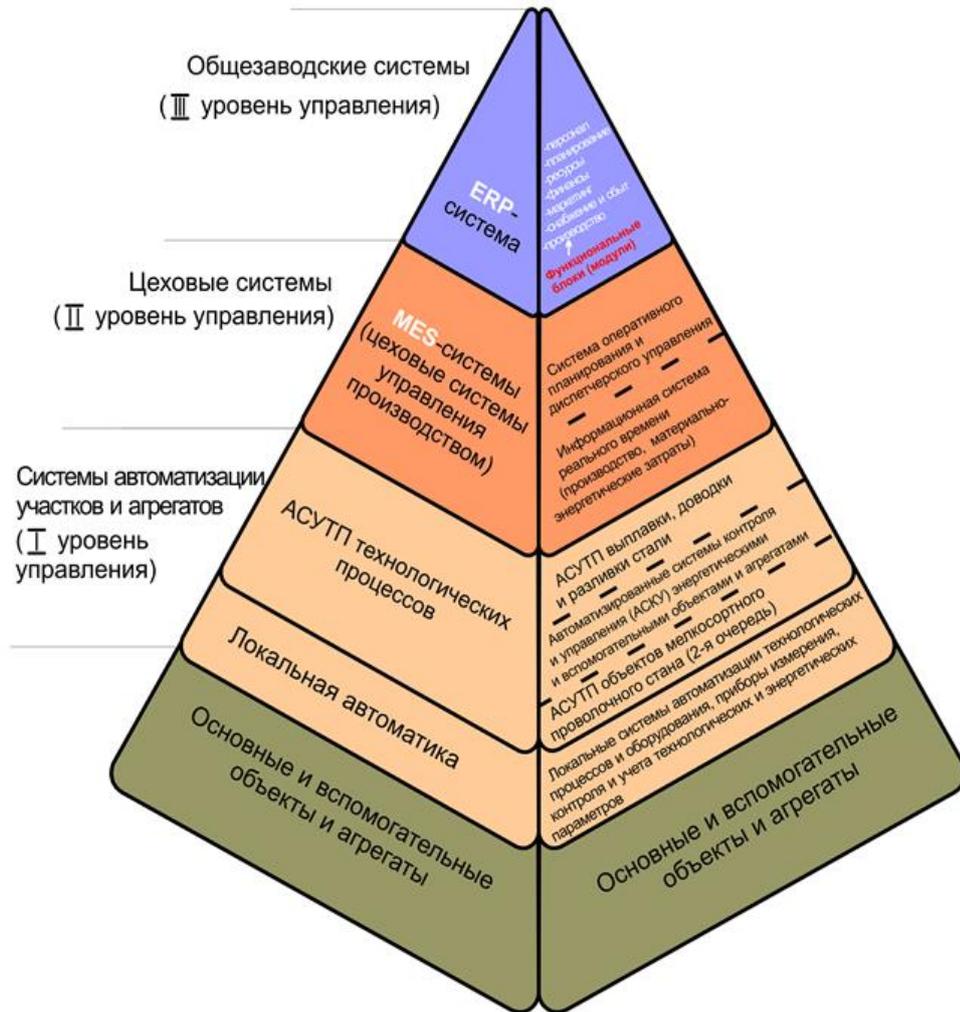


Рисунок 1.5 – Структурная схема интегрированной АСУ завода

Информационное обеспечение интегрированной автоматизированной системы управления предприятием

Интегрированная автоматизированная система управления состоит из подсистем, выполняющих различные функции. Поэтому для объективной и оперативной оценки текущей ситуации на производстве создано единое информационное пространство завода на основе интегрированных между собой инструментальных средств.

Созданием единого информационного пространства завода решаются следующие задачи:

- обеспечение информационного взаимодействия между существующими автономными подсистемами технологического уровня;
- передача технологических данных на уровень ERP-систем.

Программные продукты, обеспечивающие создание и функционирование единого информационного пространства завода, можно разделить на группы: системы управления, сбора, обработки, передачи и отображения информации (SCADA-системы – Supervisory Control And Data Acquisition), базы данных, системы управления и оптимизации производства (MES-системы – Manufacturing Execution Systems), системы комплексного управления основными фондами предприятия (EAM-системы – Enterprise Asset Management), web-решения, системы управления предприятием верхнего уровня (ERP-системы – Enterprise Resource Planning).

Таким образом, программное обеспечение интеграционного слоя позволяет:

- собирать и хранить данные Big Data, отражающие оперативную информацию о состоянии технологического процесса;
- визуализировать производственный процесс с предоставлением количественных и качественных характеристик во всех контрольных точках технологического процесса;
- дистанционно контролировать и управлять технологическим процессом;
- осуществлять мониторинг текущего состояния основных фондов производства;
- использовать Internet-решения для обмена информацией между системами нижнего и верхнего уровней [57].

Системы визуализации

В качестве системы визуализации используются SCADA-системы, которые позволяют создавать графический интерфейс для визуализации технологических процессов и обеспечивают обмен данными как с отдельными технологическими подсистемами, так и с системами верхнего уровня.

Например, на Ростовском электрометаллургическом заводе (РЭМЗ) в качестве системы визуализации используется SCADA-система SIMATIC WinCC фирмы Siemens.

WinCC является модульной системой и формирует большой набор опций для решения различных технологических задач.

WinCC предназначена для работы в клиент-серверной архитектуре под управлением операционных систем Windows 2000 SP3/SP4 или Windows XP и Windows XP SP1 (для WinCC сервера - Windows 2000 Server/Advanced Server SP3/SP4 или Windows 2003 Server). Выбор протокола передачи данных влияет на гибкость и на последующее усовершенствование системы. Предпочтительнее использовать промышленные сетевые спецификации, которые позволяют создавать общую шину и работают на высокой скорости (например, PROFIBUS) [55, 56].

В настоящее время реализована шестая версия WinCC, которая поддерживает до 12 WinCC-серверов в одном проекте и позволяет обслуживать до 32 мульти-клиентов WinCC. В WinCC 6.0 обеспечена высокая отказоустойчивость системы благодаря возможности организации параллельной работы двух односторонних систем WinCC, двух WinCC серверов производственных данных или двух WinCC серверов исторических архивов с поддержкой функций взаимного мониторинга (опция Redundancy). При отказе одного из серверов WinCC-клиенты переключаются на другой работающий сервер [65, 66, 67].

Архивация и хранение информации осуществляется в реляционной базе данных Sybase, в которой поддерживаются практически все открытые стандарты. В коммуникационных драйверах ориентация сделана, прежде всего, на оборудование Siemens SIMATIC. Предлагается средство для разработки своих драйверов.

Системы управления производством (MES-системы) отвечают за:

- управление производственными и людскими ресурсами в рамках технологического процесса,
- прогнозирующая модель технологического процесса,
- управление качеством продукции,
- хранение исходных материалов и произведенной продукции по технологическим подразделениям,
- техническое обслуживание производственного оборудования,
- связь систем ERP и SCADA.

Основой MES-систем обычно являются базы данных Microsoft SQL Server или Oracle.

В настоящее время рядом компаний реализованы MES-решения на базе распространенных SCADA-систем [56].

1.7.1 Типовые замеры температуры в ДСП

Как правило, температура стали измеряется при погружении в ванну датчика - термопары. ЭДС термопары преобразуется в температуру и выдается оператору. Точность датчика - $\pm 3^{\circ}\text{C}$, а точность измерительного прибора $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Датчики обычно типа платина/платина-10%родий и пригоден для измерения температур до 1760°C . Для измерения более высоких температур (до 1820°C) должны применяться термопары типа платина-10%родий/платина-13%родий.

Оборудование измерения температуры (датчик, кабели, прибор) регулярно проверяются с помощью эмулятора температур, который присоединяется к измерительному прибору вместо датчика.

Выбранный для решения задач эмулятор температур обеспечивает постоянную ЭДС, что приводит к фиксированным и известным показаниям температуры на приборе (например, 1650°C), если все будет работать правильно. Как показывает практика неисправности могут оказаться в основном в проводах и контактах датчика, но редко в самом приборе. Для уменьшения ошибок измерения следует учитывать инерцию измерения температуры термопарой и погрешность термопары.

Температуру измеряют только тогда, когда достигнуты условия плоской ванны или не будет подведена определенная энергия для расплавления.

Необходимо отметить, что когда температуры измеряются вручную, оператор должен быть внимательным, поскольку иногда скрап задерживается на стенках печи и с запозданием падает в печь. Для соблюдения техники безопасности изготовлен передвижной стальной экран, рассчитанный на тяжелый режим работы, который устанавливается перед шлаковой дверцей, когда измеряется температура или отбирается проба [55, 57, 58, 83].

1.7.2 Существующие автоматические регуляторы мощности дуги

Автоматический регулятор мощности должен обеспечивать:

- Автоматически контролируемое зажигание и поддержание дуги;
- Автоматическое поддержание тока дуги, заданного оператором, на определённой ступени трансформатора;
- Автоматическую ликвидацию обрывов дуг и технологических коротких замыканий;
- Исключение контактов металла электродами в период доводки металла за счет обеспечения устойчивого горения дуги.

Для регулирования мощности электродуговой печи обычно используют изменение сопротивления цепи. Изменять сопротивление цепи с электрической дугой возможно при заданном изменении длины дуги. Для этого применяют механизмы изменения положения электрода.

В качестве электрического привода обычно используют электродвигатели постоянного тока [52, 53].

В механизмах с гибкой связью привод соединен с подвижным узлом канатом. Преимущество такой связи – надежная защита электрода от поломки в процессе опускания, недостаток – низкий срок службы канатов. Жесткая связь электропривода с подвижным узлом осуществляется обычно посредством реечной передачи. Чтобы избежать поломки электродов при упоре их в твердые компоненты шихты, в схеме привода устанавливают специальную защитную аппаратуру.

В период расплавления дуга неустойчива, и плавка часто сопровождается обрывами дуги. В период набора ванны, когда основная масса металла расплавлена, волнение расплава также приводит к частому изменению токовой нагрузки на фазе.

При завалке (загрузке) очередной порции шихты, она, попадая под электрод, резко увеличивает ток на фазе. Таким образом, чтобы избежать перегрева и разбрызгивания расплава требуется немедленный подъем электрода, а затем мед-

ленный спуск. Всё это делает процесс поддержания нужной длины дуги ручным способом затруднительным [57, 63, 65].

Анализ работ [52, 53] показал, что для того, чтобы подъем и спуск электрода приводил к поддержанию постоянного значения мощности дуги печи, печи оснащаются автоматическими регуляторами положения электродов.

Из работ [52, 87, 93, 101] следует, что по принципу действия регуляторы классифицируются следующим образом:

1) Регуляторы на постоянную силу тока.

Регуляторы этого типа обеспечивают достаточную чувствительность регулировки, но, во-первых, в чистом своем виде они не обеспечивают полной автоматичности во всех случаях, встречающихся при работе регулятора, а, во-вторых, в некоторых случаях не могут обеспечить одинакового электрического режима каждой дуги, как, например, в однофазной двухэлектродной печи, в которой дуги соединены последовательно. Поэтому в чистом виде эти регуляторы не применяются и всегда имеют реле напряжения, т.е. прибор, реагирующий на изменения напряжения дуги.

2) Регуляторы на постоянное напряжение дуги.

Недостатком является то, что регуляторы данного типа не применяются, так как их чувствительность значительно ниже регуляторов на постоянную силу тока. Этот их недостаток объясняется тем, что колебания напряжения в сети по отношению к среднему значению напряжения значительно меньше, чем тот же показатель колебаний тока.

3) Регуляторы на постоянную ваттную мощность дуги (формула 1.5) [52].

Данный тип регулятора никогда не применяется, так как его работа невозможна из-за вида кривой функции мощности от тока. Это видно по диаграмме Рикке печной установки. Одному и тому же значению мощности соответствуют две точки на кривой, соответствующие разным значениям тока (рисунок 1.4) [52].

4) Регуляторы, поддерживающие постоянную силу тока и постоянное напряжение (дифференциальные регуляторы).

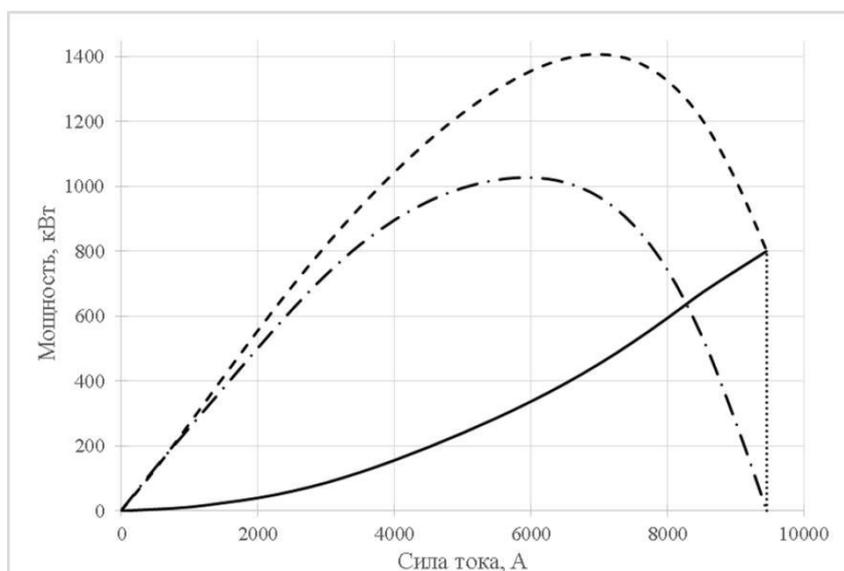


Рисунок 1.4 – Диаграмма Рике. Штриховая линия – общая ваттная мощность печи; штрихпунктирная линия – полезная ваттная мощность, выделяющаяся на дуге; сплошная линия – ваттная мощность потерь; вертикальная линия – ток короткого замыкания [52].

Принцип работы дифференциального регулятора состоит в поддержании постоянным соотношения напряжения к силе тока, т.е. сопротивления фазы [52, 53]. В нашем случае этот принцип можно объяснить на примере аналогового исполнения регулятора. В аналоговом исполнении дифференциальный регулятор представляет собой дифференциальное реле, на обмотке одной катушки которой протекает ток, пропорциональный току фазы, в которую включено реле, а на обмотке другой катушки протекает ток, пропорциональный напряжению между фазой печи и ее подиной. В зависимости от того на какой катушке оказывается сильнее втягивающее усилие сердечника, то реле вырабатывает сигнал либо на подъем, либо на опускание электрода.

5) Регуляторы на постоянную длину дуги.

Принцип работы регулятора заключается в том, что на его вход подаются три сигнала: сигнал, пропорциональный напряжению дуги; сигнал, пропорциональный току и постоянный по величине и знаку; сигнал, играющий роль постоянной. Далее на основе выражения (1.3) вырабатывается сигнал управления регулятора [52].

Напряжение, сила тока и длина электрической дуги связаны следующим выражением:

$$U = a + bLI + \frac{c + dL}{I}, \quad (1.6)$$

где a, b, c, d – некоторые постоянные [27].

1.7.3 Существующие средства автоматизации в России и за рубежом

Авторы работ [4, 35, 55] говорят о том, что в настоящее время наиболее широкое распространение на российских металлургических заводах получили системы управления положением электродов ARCOS и HIREG, использующиеся в электросталеплавильных цехах в г. Магнитогорске (Россия) на ОАО «ММК» и г. Искендерун (Турция) на ЗАО «ММК Metalurji». Альтернативой данным системам можно считать SIMETAL Simelt, MeltNet Ferrotron, E.M.P.E.R.E. Сравнение параметров регулирования для систем управления положением электродов различных производителей представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Сравнение параметров регулирования для систем управления положением электродов различных производителей

Система управления	Производитель	Параметр регулирования
HIGER	Daniele Automation, Италия	Адмиттанс вторичного контура ДСП, $Y_{2\phi}$
ARCOS, ArCOS Light	Siemens VAI, Германия	Импеданс вторичного контура ДСП $Z_{2\phi}$, на поздних стадиях плавки – активное сопротивление электрической дуги R_{arc} ; в некоторых случаях – напряжение дуги U_{arc}
SIMETAL Simelt		Сопротивление электрической дуги; в некоторых случаях – напряжение дуги
DECTEQ TM MeltNet	Ferrotron, Германия	Импеданс вторичного контура ДСП
E.M.P.E.R.E	Amec Spie, Франция	Импеданс вторичного контура ДСП

Анализ параметров регулирования для систем управления положением электродов от различных производителей показал, что самым распространенным

параметром регулирования является импеданс вторичного контура ДСП (суммарное сопротивление короткой цепи, электродов, активного сопротивления расплава и электрической дуги). Данная система не обеспечивает быстродействия, необходимого для компенсации динамических изменений токов дуг, что является ее существенным недостатком. Еще одним недостатком систем, использующих импеданс вторичного контура ДСП $Z_{2\phi}$ является отсутствие контроля длины электрической дуги. При сильных отклонениях напряжения в питающей сети это приводит к неоптимальным режимам работы ДСП. Системы управления ДСП, в которых в качестве управляемого параметра используется адмиттанс $Y_{2\phi}$ (полная проводимость фаз), являются аналогичными по динамическим показателям.

1.7.4 Существующие способы контроля параметров дуговой печи

В настоящее время существует способ управления электродуговым режимом плавки руднотермической печи при получении фосфора (патент РФ № 2516360, опубликован 20.05.2014). Способ включает загрузку и расплавление шихты в печи, измерение в процессе плавки тока и напряжения электродов, потребляемой мощности, величины постоянной составляющей фазного напряжения электродов и печи и регулирование рабочей мощности печи переключением ступеней печного трансформатора, перемещением электродов и/или корректировкой состава загружаемой шихты. В процессе плавки дополнительно определяют значение доли тока дуги в токе электрода, причем рабочую мощность печи регулируют в зависимости от величины рассогласования с заданным значением доли тока дуги в токе электродов, равным 5-10% [97].

Данный способ имеет существенные недостатки: при его реализации не учитывается распределение температуры в пространстве печи и не фиксируется положение торца электрода.

Также известен способ определения параметров разогрева руднотермической печи после простоя (патент РФ №94039440, опубликован 27.06.1996). В соответствии с этим способом измеряют термо-ЭДС в цепи «электрод – земля» в

момент отключения печи и контролируют ее изменение в период простоя, причем по характеру изменения определяют тепловое состояние ванны и электрода [98].

Недостатком данного способа является косвенное определение температуры, что является недостаточно надежным и точным способом контроля теплового состояния печи.

Авторы патента РФ №2305242, опубликованного 27.08.2007, предлагают способ определения параметров разогрева рудно-термической печи после простоя. В соответствии с этим способом контролируют тепловое состояние ванны печи, измеряют номинальный ток электрода, термоЭДС в цепи электрод-земля, определяют начальный ток разогрева и дальнейшее изменение электрических параметров по заданной программе. При этом измеряют температуру внутренней стенки ванны печи, температуру рабочей поверхности электрода при номинальном токе, а начальный ток разогрева определяют по математическому выражению.

Недостатком указанного способа является дискретность измерения температуры, так как измеряются только температура внутренней стенки ванны печи и температура рабочей поверхности электрода при номинальном токе, в остальное время температура не контролируется.

Еще одним изобретением в области автоматизации печей является способ и система управления процессом плавления и рафинирования металла (патент РФ № 2571971, опубликован 27.12.2015). Данный способ включает в себя этапы, на которых определяют массу расплавленного металла и массу твердого металла в заданный момент времени. Вычисление основано на исходных значениях масс расплавленного и твердого металла, мощности дуги, подводимой к электродуговой печи, и температурах расплавленного и твердого металла. Мощность перемешивания определяется на основании вычисленных/определенных масс. Определенная мощность перемешивания подводится к электромагнитной мешалке [97, 98].

Недостатками способа являются низкая точность измерения массы шихты и расплава, данный способ невозможно применить к печам, не имеющим магнитодинамическое перемешивание.

Васильев В.В. в своей диссертации [11] предлагает метод определения текущих значений неконтролируемых электрических и технологических параметров (степень развития дуги, активное сопротивление и уровень расплава) по гармоническому составу тока и напряжения, что обеспечивает возможность диагностирования отклонений в ходе технологического процесса на начальной стадии.

Данный способ целесообразно применять для руднотермических печей, так как они работают на смешанных режимах. В то же время в ДСП используется открытая дуга, что делает невозможным использование данного способа для плавки металлолома.

В результате анализа существующих способов контроля и автоматизации параметров дуговой печи, необходимо отметить, что данные способы не обеспечивают решение следующих задач: снижение энергозатрат и повышение качества готового расплава, снижение количества преждевременно выходящих из строя электродов и подовой и боковой футеровки за счет повышения достоверности оценки теплового состояния печи.

1.8 Выводы по Главе 1:

В главе 1 приведены классификация дуговых сталеплавильных печей и характеристика оборудования для выплавки стали. Представлено описание производственного процесса на сталеплавильном производстве, а также обзор огнеупорных материалов, используемых для футеровки ДСП. Проведен анализ существующих систем автоматического управления процессом плавки в дуговых печах на действующих предприятиях в России и за рубежом. Охарактеризованы способы контроля температуры в ДСП. Выполнен обзор автоматических регуляторов мощности дуги.

На основании проведенного анализа выявлены основные проблемы автоматизации дуговых сталеплавильных печей:

–на действующих предприятиях контроль температуры в ДСП осуществляется вручную одноразовой термопарой в конце плавки для определения степени готовности металла.

– существующие методы контроля дуговых печей и уровень автоматизации не соответствует современным тенденциям развития техники и физико-химическим условиям плавильных процессов многокомпонентных сплавов, что приводит к преждевременному выходу из строя электродов и футеровки печей, а также большому количеству брака при низком выходе годной продукции;

– работа на длинных дугах приводит к повышенным тепловым потерям, так как дуга характеризуется пониженным значением градиента потенциала в столбе дуги. Для получения в дуге требуемой мощности необходимо увеличить ее длину до 0,8 -1,0 м. После расплавления шихты это приводит к увеличению потоков излучения на стены и свод печи, а также увеличению тепловых потерь.

Таким образом, контроль теплового состояния во время плавки и эффективное управление дуговой сталеплавильной печью в процессе плавки исходного металлургического сырья является актуальной задачей в настоящее время.

В связи с этим целью диссертационной работы является повышение качества функционирования электродуговых печей на основе изучения влияния мощности электрической дуги на тепловое состояние процесса для прогнозирования состояния объекта и обеспечения его устойчивой работы при включении в систему управления и автоматизации алгоритмов адаптации при плавке многокомпонентных шихтовых материалов.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для решения поставленных в диссертации задач разработана программа проведения теоретических и лабораторных исследований, промышленных исследований, а также план разработки новых технических решений для контроля и управления тепловым состоянием дуговой сталеплавильной печи и симуляции процессов плавки в лабораторных условиях при сравнении с промышленным экспериментом.

2.1 Программа экспериментальных исследований

Программа комплексных исследований состоит из решения нескольких задач:

- разработка лабораторной установки для моделирования дуговой сталеплавильной печи:
- анализ влияния температуры металла (шихты) на температуру футеровки и электродов;
- выявление зависимости температуры футеровки от температуры металла;
- изучение зависимости температуры электродов от температуры металла;
- определение передаточного теплового коэффициента между металлом и футеровкой печи по экспериментальным данным;
- анализ влияния изменения напряжения дуги на коэффициент огнеупорности;
- получение зависимости коэффициента огнеупорности от тока дуги.

2.2 Выбор и обоснование метода лабораторных исследований

Для определения зависимости изменения температуры футеровки и электродов от изменения температуры металла в течение плавки был разработан план проведения экспериментальных исследований.

В лаборатории центра переработки минерального сырья Санкт-Петербургского горного университета была проведена серия лабораторных исследований.

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2.1.

Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке, представленной на рисунке 2.2.

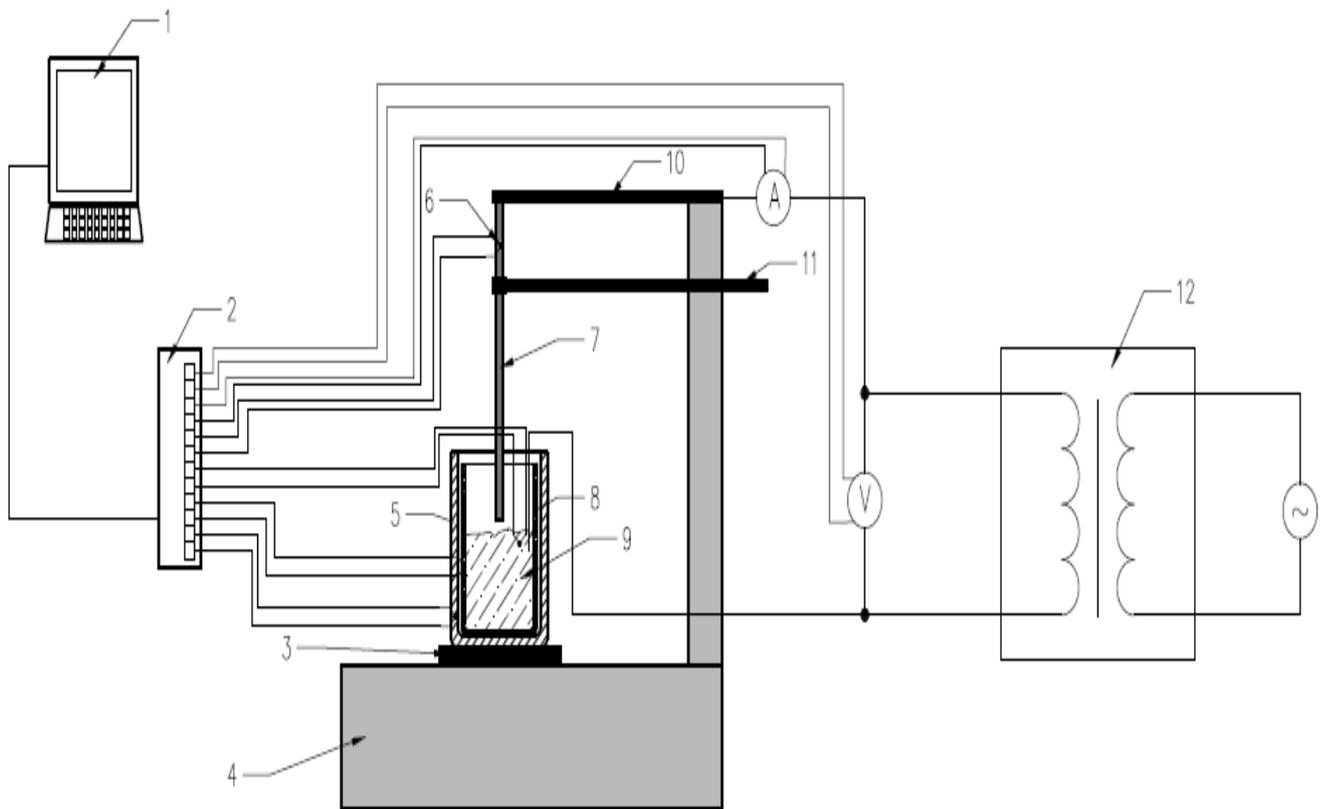


Рисунок 2.1 – Схема экспериментальной установки:

1 – персональный компьютер; 2 – аналого-цифровой преобразователь; 3 – подставка; 4 – штатив; 5 – тигель из шамота; 6 – термопара; 7 – графитовый электрод; 8 – графитовый тигель; 9 – расплав (металл); 10 – токоподвод; 11 – электродержатель; 12 – сварочный трансформатор

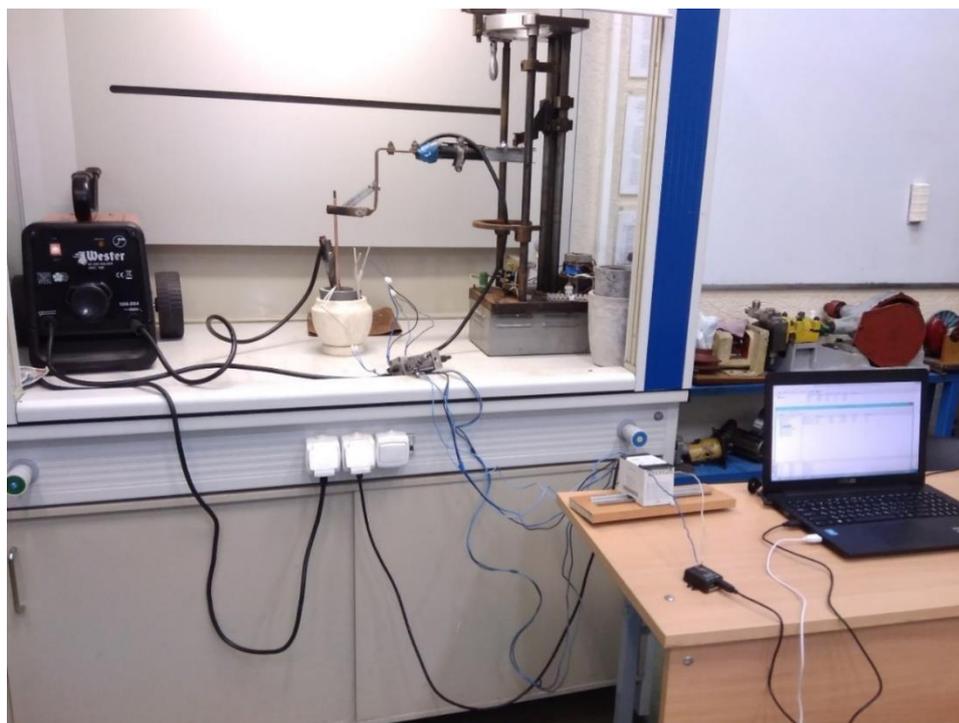


Рисунок 2.2 – Общий вид лабораторной установки

Экспериментальная установка использовалась для моделирования электродуговой печи [41, 42, 97, 98] и имитации процесса плавки.

Экспериментальная установка состоит из следующих составных частей:

1. Сварочный трансформатор переменного тока промышленной частоты ($f = 50$ Гц). Основные его характеристики приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Технические характеристики сварочного трансформатора

Номинальное входное напряжения, В	230
Частота, Гц	50
Напряжение без нагрузки, В	48
Потребляемая мощность при нагрузке	35% – 2.7кВт max – 3кВт
Диапазон сварочного тока, А	55-160
Коэффициент нагрузки, А-%	160А – 10% 80А – 35%
Класс защиты IP	IP21S
Степень изоляции	Н
Диаметр электрода, мм	2-4
Вес комплекта, кг	18
Габариты, см	46×27.5×32.5
Напряжение без нагрузки (U_0)	Выходное напряжение цепи источника питания в разомкнутом состоянии

2. Штатив. Использовался для фиксации электрододержателя, как имитатор подъемного механизма.

3. Электрододержатель. Расположен на каретке, позволяет закрепить электроды различного диаметра. Для удобства опускания и поднятия электрода имеется ручной позиционер положения верхнего электрода. Он имеет устойчивый корпус с утяжелением внизу. Позиционер представляет собой каретку на червячной передаче. При повороте расположенной наверху позиционера ручки каретка перемещается либо вверх, либо вниз, в зависимости от направления вращения ручки, после чего верхний электрод закрепляется на каретке.

4. Токоподвод. Переменный ток подается на токоподвод, закрепленный на электрододержателе.

5. Омеднённый угольный электрод. Основные характеристики электрода представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Основные характеристики электрода

Диаметр, мм	6
Ток, А	300-350
Удаление металла, г/см	18
Масса, г	16

6. Графитовый тигель. Использовался в качестве ванны для металла.

7. Шамотный тигель с подставкой. Использовался для имитаций футеровки печи.

8. Хромель-алюмелевая термопара (ТХА): Рабочий элемент изготовлен из хромеля и алюмеля – сплавов на основе никеля. Хромель – сплав, состоящий из следующих элементов: хром – 8,7-10 %; никель – 89-91 %; кремний, медь, марганец, кобальт – примеси. Алюмель – сплав, состоящий из следующих элементов: Ni (93-96 %); Al (1,8-2,5 %); Mn (1,8-2,2 %); Si (0,8-1,2 %). Основные характеристики термопары представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Основные характеристики термопары ТХА

Измеряемые среды	Газообразные, твердые и жидкие нейтральные и окислительные среды, воздух, инертные газы, не взаимодействующие с материалом термо-электродов и не разрушающие материал защитной арматуры.
Диапазон измерения	от минус 40 до плюс 1200 °С
Пределы допускаемых отклонений термо-ЭДС от НСХ датчиков с ЧЭ по МЭК 60584-1 (ГОСТ Р 8.585-2001) в температурном эквиваленте, °С	– в диапазоне от минус 40 до плюс 375 °С: ± 1.5 ; – в диапазоне свыше плюс 375 до плюс 1100 °С: $\pm 0,004t$, где t – значение измеряемой температуры, °С

Для защиты термопары, фиксирующей температуру металла, от агрессивного воздействия среды применялась защитная гильза серии 2001 (Сертификат промышленной безопасности № С-ТС.001.ТУ.0043). Характеристики штуцерной защитной гильзы представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Характеристики штуцерной защитной гильзы

Обозначение защитной гильзы	Материал	D, мм	h, мм	d, мм	d1xs, мм	Внутренний диаметр штуцера	Монтажная длина L, мм	Условное давление, МПа
2001-01	12X18Н10Т	M20x1.5	28	G1/2	10x0.8	8.1	80	4

9. Шихта. В качестве шихты использовалась стальная стружка (железный лом категории 16А – углеродистый стальной лом, представляющий собой зигзагообразную стружку).

10. Программируемый логический контроллер Modicon M340 Schneider Electric. Использовался для сбора данных. Основные технические характеристики данного контроллера представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Основные технические характеристики программируемого логического контроллера Modicon M340 Schneider Electric

ПЛК Modicon M340 с поддержкой инструментальной среды Unity Pro		Стандартный процессорный модуль BMX 34 10
Шасси	Количество шасси	12 слотов
	Максимальное количество слотов (без учета модуля питания)	24
Ввод/Вывод	Дискретный ввод/вывод ПЛК	512 каналов (модули с 8, 16, 32 или 64 каналами)
	Аналоговый ввод/вывод ПЛК	128 каналов (модули с 2, 4, 6 или 8 каналами)
	Распределенный ввод/вывод	В зависимости от типа сети: по Ethernet TCP/IP через сетевой модуль (63 устройства с сервисом опроса входов/выходов (I/O Scanning), по Modbus (32 устройства))
Специализированные каналы ПЛК	Максимальное количество каналов (счетчик и последовательная линия)	20
	Счетчик	BMX ENC 0200, 60 кГц, 2канальные или BMX ENC 0800; 10 кГц, 8канальные модули
	Управление движением	BMX MSP 0200, 200 кГц, 2канальные с выводным РТО модулем (Pulse Train Output) для сервоприводов
	Управление непрерывным процессом, ПИД-регуляторы	Библиотека EFB для управления непрерывным процессом
Встроенные коммуникационные порты	Последовательный порт	1 в режиме «ведущий/ведомый» (Master/Slave) по RTU/ASCII Modbus или в символьном режиме (по неизолированному RS232/RS485 со скоростью 0,3...38,2 Кбит/с)
	Порт USB	1 порт для программирования (ПК разъем)
Коммуникационные модули	Макс. количество сетевых модулей	1 (сетевой модуль BMX NOE 0110/0110)

Продолжение таблицы 2.5

	Ethernet Modbus/TCP	1 x 10BASET/100BASETX (Modbus TCP/IP, BOOTP/DHCP, FDR, служба «Глобальные данные», сервис опроса входов/выходов, web-сервер (стандартный класса В30 или конфигурируемый класса С30))
Объем внутренней памяти	Внутренняя RAM, выделенная пользователю	2048 Кб
	Для программ, констант и символов	1792 Кб
	Для локализованных/нелокализованных переменных	128 Кб
Структура приложения	Главная задача	1
	Быстрые задачи	1
	Задачи обработки событий	32
Кол-во К инструкций, выполняемых за 1 мс	100% логических	5.4 К инструкций за мс
	65% логических + 35% фиксированных арифметических	4.2 К инструкций за мс
Питание ПЛК		24 V DC (изолир.), 24-48 V DC (изолир.) или 100-240 М АС (от модуля питания)

Для передачи и обработки сигналов с термопар использовался модуль аналогового ввода BMX ART 0814. Технические характеристики данного модуля представлены в таблице 2.6.

Передача данных в программный пакет Matlab 14a производилась с помощью программного обеспечения (ПО) для оперативного управления процессами OPC Factory Server TLXCDSUOFS36 OFS V3.60. В качестве сервера был использован ПК ASUS X553M.

Таблица 2.6 – Технические характеристики аналогового ввода BMX ART 0814

Тип входов/выходов	Изолированные входы низкого уровня, резисторы, термопары и датчики температуры
Диапазон напряжения	± 40 мВ, ± 80 мВ, ± 160 мВ, ± 320 мВ, ± 640 мВ и $\pm 1,28$ В
Термопара	Термопары типа В, Е, J, К, L, N, R, S, Т, U
Датчик температуры	Датчики температуры типа Pt 100, Pt 1000, Ni 100, Ni 1000 и Cu 10, 2 или 4проводные
Резистор	Резисторы 2,3 или 4проводные, 400 или 4000 Ом
Модульность	8 каналов
Частота опроса	400 мс для всех 8 каналов
Разрешение	16 бит
Изоляция	Между каналами: 750 В. Между каналами и шиной: 2000 В. Между каналами и землей: 750 В
Присоединение	Через два 40контактных разъёма Непосредственно к модулю

11. Вольтметр переменного напряжения использовался для измерения выходного напряжения измерительного трансформатора тока.

12. Измерительный трансформатор TALEMA AC1200.

Входной ток 0-200 А соответствует выходному току трансформатора 0-200 мА. На выходе трансформатора установлен резистор номиналом 51 Ом. Параллельно резистору подключен вольтметр. Измеряемое напряжение имеет диапазон 0-10.2 В. Для того, чтобы на основе измеренного напряжения получить исходное значение тока в проводника, необходимо выполнить обратное преобразование:

$$I = \frac{U_{изм}}{R} \times K_{преобразователя} = \frac{U_{изм}}{51} \times 1000. \quad (2.1)$$

Измерительный трансформатор применялся для контроля переменного тока в проводнике.

2.2.1 Методика определения зависимости изменения температуры футеровки и электродов от изменения температуры металла в течение плавки

В данном исследовании моделировалась плавка в дуговой сталеплавильной печи.

Использовались два тигля для имитации ванны печи: внутренний выполнен из шамота – имитировал футеровку, внешний – графитированный. В качестве электрододержателя использовался штатив, на котором был закреплён электрод. Электрододержатель имеет автоматический привод, токоподвод и устройство, определяющее расстояние перемещения электрода, что позволяет контролировать длину дуги. В качестве источника переменного тока использовался сварочный трансформатор.

В эксперименте использовались три термопары: для определения температуры металла – Т1 (термопара в защитной гильзе), для определения температуры футеровки (термопара была установлена между графитовым и шамотным тиглями) – Т2, для определения температуры электрода (термопара была установлена непосредственно на электроде) – Т3.

Данные измерения температуры поступают на аналого-цифровой преобразователь, после этого обрабатываются по разработанному в процессе выполнения работы алгоритму на персональном компьютере.

Продолжительность эксперимента – 1000 с. В течение заданного периода подавали ток от 80 до 100 А при рабочем напряжении 35-40 В. Значения температуры фиксировались каждые 0.5 с [43].

2.3 Промышленные исследования современных печей ДСП

Целью экспериментальных исследований являлось определение влияния длины дуги на температурное поле футеровки печи, а также определение передаточного теплового коэффициента между металлом и конструктивными элементами печи.

Была выполнена серия промышленных исследований на дуговой сталеплавильной печи ДСП-90 [41].

2.3.1 Оборудование, используемое для проведения промышленного эксперимента

Для экспериментальных исследований использовалось следующее оборудование (таблица 2.7).

Таблица 2.7 – Оборудование для промышленного эксперимента

Печной трансформатор	75 МВА Первичное напряжение: 35.0 кВ Вторичное напряжение: 18 ступеней (551-996 В)
ДСП	Переменного тока, диаметр печи – 6 м Максимальная загрузка – 90 т
Диаметр распада электрода	1250 мм
Расстояние от дуги до огнеупоров	600x2400 электроды ЭГСП-1 Средний удельный расход: 1.6 кг/т

Дуговая сталеплавильная печь ДСП-90 представлена на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Дуговая сталеплавильная печь ДСП-90

При плавке любого шихтового материала наблюдаются большие потери тепла. На рисунке 2.3 видно, что во время выплавки стали в ДСП-90 производится подвалка шихтовых материалов. Для поднимается электродная свеча, и открывается крышка печи. В этот момент отключается подача тока на электрод, вследствие чего гаснет дуга. При этом происходят огромные потери тепла через открытую крышку печи. После подвалки очередной порции металла еще некоторое количество тепла уходит на нагрев добавленных шихтовых материалов.

Измерительное оборудование, которое применяется в данном эксперименте, разработано компанией «GrafTech» и предназначено специально для измерения параметров ДСП. Оборудование дает возможность записывать значения активной и реактивной мощности через трансформаторы тока, которые подключены к первичной обмотке трансформатора печи. Это позволяет производить замер и вывод значений параллельно с электроизмерительными приборами пульта оператора ДСП. Электрическая схема подключения прибора подставлена на рисунке 2.4.

Для проведения экспериментальных измерений выполнены следующие соединения:

- 3х первичное напряжение с коэффициентом трансформации 35000/100 В (понижающий трансформатор);
- 3х первичный ток с коэффициентом трансформации 1500/5А (измерительный трансформатор тока).

Температура днища печи измерялась термометрами сопротивления ДТС 105-РТ-100.В3.160.6 1\2. Температура воды в контуре охлаждения измерялась термометрами сопротивления ДТС 105-РТ-100.В3.160.6 1\2 (количество – 50 шт.).

В эксперименте в качестве системы визуализации использовалась SCADA-система SIMATIC WinCC фирмы Siemens [55].

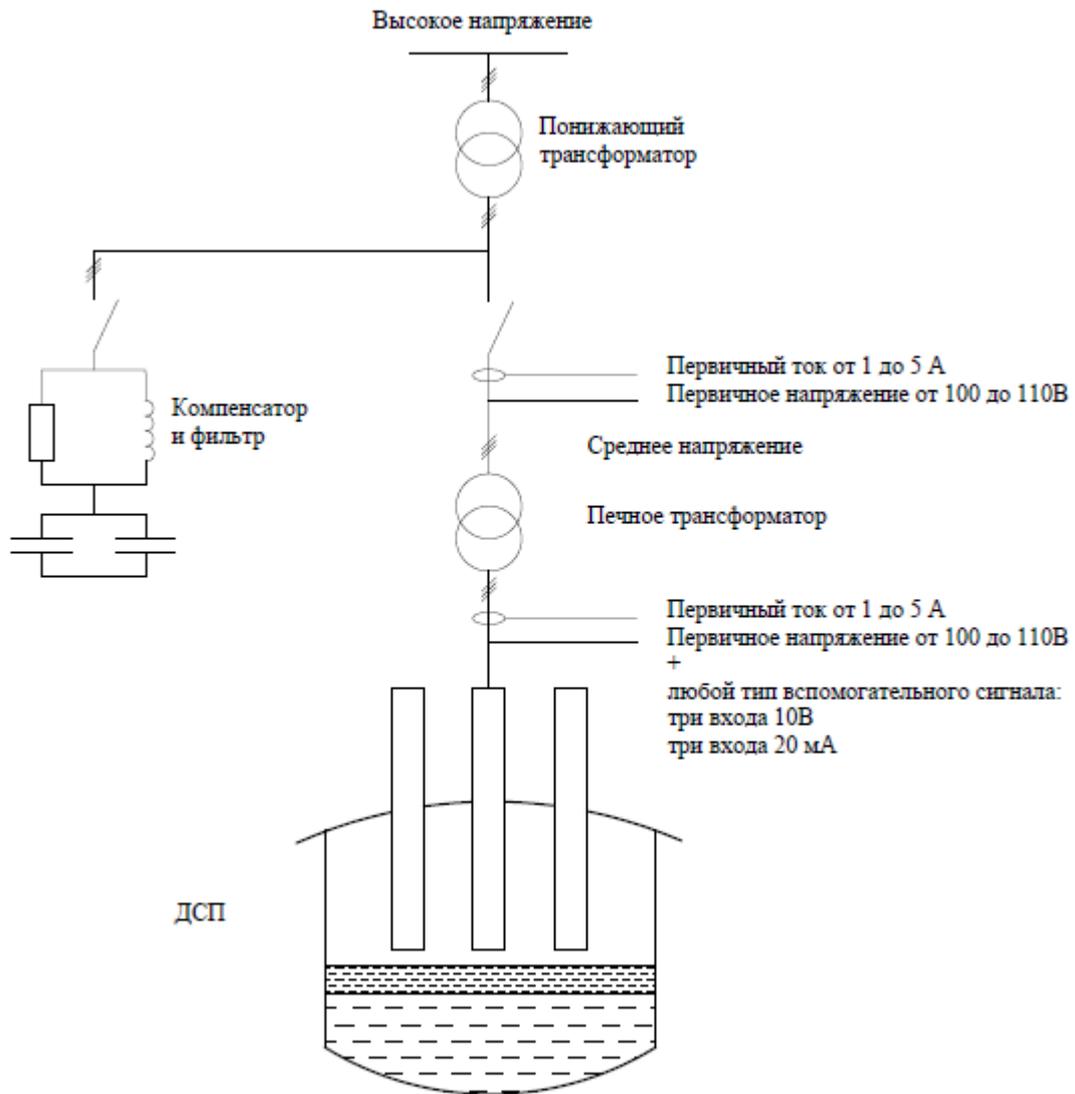


Рисунок 2.4 – Электрическая схема подключения прибора

2.3.2 Методика проведения промышленного эксперимента

Серия экспериментов проводилась на дуговой сталеплавильной печи ДСП-90. Замеры параметров производились во время плавки № 111356 – 111370.

Зафиксированные температуры воды охлаждения и днища ДСП были получены из SCADA-системы.

В ходе эксперимента проверяли адекватность полученных зависимостей температуры футеровки от температуры металла, температуры электродов от температуры металла. Измеряли температуру металла и футеровки печи для определения передаточного теплового коэффициента между металлом и футеровкой печи.

Анализ экспериментальных данных позволил установить влияния изменение напряжения дуги на общий коэффициент огнеупорности, а также получение зависимости коэффициента огнеупорности от тока дуги.

Коэффициент огнеупорности

Для оценки степени влияния напряжения дуги на футеровку печи использовался коэффициент огнеупорности.

Коэффициент огнеупорности в нашем случае определяет влияние дуги на огнеупоры. Коэффициент огнеупорности определяется по следующей формуле:

$$K_o = \frac{U_{arc}^2 \cdot I}{d^2}, \frac{kB \cdot Bm}{cm^2}, \quad (2.2)$$

где U_{arc} – напряжение дуги, В;

I – ток, подводимый к электроду, кА;

d – расстояние от дуги до огнеупоров (216.5 см).

Для определения потерь тепла через футеровку использовался коэффициент теплопроводности.

2.4 Определение статистических зависимостей

Экспериментальные исследования проводились для решения задачи определения зависимостей температуры футеровки от температуры металла, температуры электродов от температуры металла, которые устанавливают соотношение между переменными, описывающими объект в статическом режиме.

На практике для решения подобных задач используют следующие методы обработки экспериментальных данных:

- метод наименьших квадратов;
- регрессионный анализ;
- корреляционный анализ [51, 85].

Аппроксимация экспериментальных данных методом наименьших квадратов

В экспериментах по определению зависимости одной физической величины Y (температура футеровки, температура электрода другие) от другой X (температура металла) можно допустить вероятность появления погрешности измерения.

То есть по экспериментальным данным необходимо подобрать такую аналитическую функцию, которая проходит так близко к экспериментальным точкам, как это возможно.

Сущность метода наименьших квадратов заключается в том, что из множества возможных эмпирических зависимостей, тип которых уже определен $y = f(x)$, выбирается та, для которой сумма квадратов отклонений, замеряемых по оси y является наименьшей.

$$\sum_{i=1}^N [y_i - \varphi(x_i)]^2 = \min, \quad (2.3)$$

где y_i и x_i – экспериментальные значения переменных в i -м опыте;

N – число опытов;

$\varphi(x)$ – искомая зависимость y от x .

Задача включает в себя два этапа:

1. Определить внешний вид зависимости по результатам эксперимента.
2. Подобрать коэффициенты зависимости $y = f(x)$.

При обработке экспериментальных данных предполагается, что зависимости температуры футеровки от температуры металла, температуры электрода от температуры металла носят линейный характер. В данном случае зависимости описаны следующим уравнением:

$$Y = a_1 + a_2 \cdot x. \quad (2.4)$$

Для определения параметров линейной функции $Y = a_1 + a_2 \cdot x$ запишем функцию для линейной зависимости:

$$S(a_1, a_2) = \sum_{i=1}^N [y_i - a_1 - a_2 \cdot x_i]^2 \rightarrow \min. \quad (2.5)$$

Коэффициенты a_1 и a_2 определяем решением следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} a_1 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} - a_2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \\ a_2 = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^N y_i \cdot x_i - \sum_{i=1}^N y_i \cdot \sum_{i=1}^N x_i}{N \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2} \end{cases} \quad (2.6)$$

Регрессионный анализ и коэффициент корреляции

Для решения поставленных задач необходим метод наименьших квадратов, который используется для определения параметров аппроксимирующей зависимости, он становится регрессионным анализом при расчете статистических оценок: оценки дисперсии воспроизводимости, оценки адекватности и оценки значимости коэффициентов [85].

Коэффициенты линии регрессии Y на x , которую описывает уравнение вида $Y = a_1 + a_2 \cdot x$, a_1 и a_2 определяются по формулам (2.6).

Таким образом, чем меньше величина $S(a_1, a_2) = \sum_{i=1}^N [y_i - a_1 - a_2 \cdot x_i]^2$, тем более обоснованно наше предположение, что экспериментальные данные описываются линейной функцией. Коэффициент корреляции, характеризующий тесноту линейной связи между x и y , рассчитывается по формуле:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - M_x) \cdot (y_i - M_y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - M_x)^2 \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - M_y)^2}}, \quad (2.7)$$

$$M_x = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad M_y = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N}. \quad (2.8)$$

Значение коэффициента корреляции входит в диапазон $-1 \leq r \leq 1$.

В нашем случае экспериментальные точки располагаются тем ближе к линии регрессии, чем меньше отличается абсолютная величина r от единицы. Когда $|r|=1$, все экспериментальные точки находятся на линии регрессии. Если коэффициент корреляции приближается к нулю, то это означает, что между x и y не су-

существует линейной связи, но между ними существует зависимость, которая отличается от линейной.

Для проверки значимости коэффициентов регрессии в данной работе применялся критерий Стьюдента. Значение критерия Стьюдента определялось по формуле:

$$t = r \cdot \sqrt{\frac{N-2}{1-r^2}} \quad (2.9)$$

Значение t , которое было рассчитано по формуле (2.9), сравнивалось со значением, взятым из таблицы распределения Стьюдента [3, 51, 85] в соответствии с уровнем значимости p (стандартное значение $p = 0.95$) и числом степеней свободы $k = N-2$. Если полученная по формуле (2.9) величина t больше табличного значения, то коэффициент корреляции значимо отличен от нуля.

Погрешность опыта, то есть оценка дисперсии воспроизводимости, определена на основании данных параллельных опытов. Исходя из методики проведения экспериментов и конструкции экспериментальной установки было определено количество параллельных опытов $m=3$. Эта величина характеризует равнозначность измерений во всех опытах.

Оценка адекватности аппроксимирующей зависимости (зависимостей температуры футеровки от температуры металла, температуры электродов от температуры металла) исследуемому объекту была выполнена с помощью критерия Фишера F (равен отношению дисперсии адекватности D_{ya} к дисперсии опыта D_{yo}). По методу наименьших квадратов вычислено количество параметров аппроксимирующей зависимости (равно 2), следовательно, для определения критерия Фишера используется следующая формула:

$$F = \frac{D_{ya}}{D_{yo}} \quad (2.10)$$

Полученное в соответствии с формулой 2.10 расчетное значение критерия Фишера F , сравнивалось с табличным значением F_T . Если условие $F < F_T$ выполнялось, то подтверждалась гипотеза об адекватности зависимости $Y=f(X)$ исследуемому объекту.

2.5 Выводы по Главе 2:

В Главе 2 диссертационной работы разработана программа экспериментальных исследований, включающая в себя: разработку лабораторной установки для моделирования дуговой сталеплавильной печи, анализ влияния температуры металла (шихты) на температуру футеровки и электродов, выявление зависимости температуры футеровки от температуры металла, выявление зависимости температуры электродов от температуры металла, определение передаточного теплового коэффициента между металлом и футеровкой печи, анализ влияния изменения напряжения дуги на коэффициент огнеупорности, получение зависимости коэффициента огнеупорности от тока дуги.

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТАЛЛА НА ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

3.1 Изучение влияния температуры металла на температуру футеровки и электродов во время плавки

Плавку стали в ДСП обычно характеризуют тремя режимами: электрическим, температурным и технологическим. Электрический режим плавки представляет изменения подводимой к печи мощности во времени. В нашем случае под температурным режимом понимают изменение по ходу плавки температуры металла, шлака и футеровки [5, 15, 17]. Технологический режим плавки включает в себя изменение химического состава металла и все технологические операции, которые выполняют во времени (скачивание шлака, присадка легирующих и др.).

Все режимы, безусловно, связаны между собой, но для лучшего понимания описания систем автоматизации их принято рассматривать отдельно [15].

Несмотря на то, что типов датчиков температуры жидкого металла разработано достаточно много, измерение температуры металла в ДСП является сложной задачей. В первую очередь это связано с большим градиентом температуры по поверхности и глубине ванны. Следовательно, необходимо обеспечить правильный выбор точки ввода датчика – представительной точки, которая характеризуется тем, что измеренная в ней температура равна средней температуре футеровки печи и примерно температуре стали в ковше после выпуска из печи [15].

В настоящее время известно несколько методов измерения температуры футеровки ДСП. Например, широкое распространение получили шомпольные термомониторы [18]. При использовании данного способа измерения измеряется не фактическая температура футеровки, а усредненный тепловой поток, падающий на чувствительный элемент футеровки от дуг, стен, шлака, свода, электродов и включающий конвективную теплоотдачу от газов в рабочем пространстве печи. В данном случае невозможно измерить толщину футеровки и корректировать положение чувствительного элемента по отношению к внутренней поверхности футе-

ровки при уменьшении ее толщины вследствие износа. Это является существенным недостатком данного способа измерения температуры в ДСП [15].

При измерении температуры футеровки термопарой удается устранить данные недостатки. При использовании данного способа измерения в кожухе печи делают отверстие, в которое вставляют металлическую трубу для термопары. Когда в процессе плавки шихта опускается ниже данного отверстия, термопару с графитовым блоком и защитным наконечником вставляют в трубу и снаружи уплотняют огнеупорным материалом для изоляции от воздуха. Перед выпуском металла термопару, как правило, извлекают из печи [15, 17].

Дуговая сталеплавильная печь работает в нестационарном режиме, то есть температурный режим существенно изменяется по периодам плавки. После выпуска металла предыдущей плавки возникает повышенный теплоперенос, так как тепло от футеровки отдается газам. При этом скорость изменения температурного градиента стен печи между плавками примерно 20 °С/мин. При использовании водоохлаждаемых элементов скорость увеличивается до 30-40 °С/мин. Футеровка отдает большую часть аккумулируемого тепла шихтовым материалам после завалки. Температура внутренней поверхности стен ДСП изменяется со скоростью

$$V_t = \frac{P_{yd}}{250} \cdot G, \quad (3.1)$$

где V_t – скорость подъема температуры внутренней поверхности стен ДСП при работе на максимальной ступени напряжения трансформатора, °С/мин; P_{yd} – удельная установленная мощность печного трансформатора, кВА/т; 250 – эмпирический коэффициент, $\frac{кВА \cdot мин}{°C}$; G – вместимость печи, т [15, 17].

Существенное влияние на количество выделяемой теплоты, которая попадает на единицу поверхности футеровки, оказывают конструкция рабочего пространства печи и его размеры. Если считать дугу точечным источником излучения, то интенсивность облучения единицы поверхности футеровки q ($\frac{кВт}{м^2}$) в соответствии с формулой для точечного источника излучения равна:

$$q = \frac{K_{\text{Э}} \cdot P_{\text{Д}} \cdot \cos \alpha}{4 \cdot \pi \cdot R^2}, \quad (3.2)$$

где $P_{\text{Д}}$ – мощность дуги, кВт; R – расстояние от источника излучения до центра облучаемой площади, м; α – угол между направлениями луча и нормалью к облучаемой площади, градус; $K_{\text{Э}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий разное излучение дуги в различных направлениях [17].

И.И. Игнатовым [37] был разработан численный метод расчета теплообмена в дуговых сталеплавильных печах трехфазного тока, который основывался на общих дифференциальных уравнениях теплообмена. Для двухмерного приближения система уравнений имеет следующий вид

$$\begin{aligned} c_M \cdot \rho_M \cdot \frac{\partial T_M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \cdot (\lambda_L^z \cdot \frac{\partial T_M}{\partial z}) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot (\lambda_M^R r \cdot \frac{\partial T_M}{\partial r}) + q_L - q_{m_2} + \\ + c_z \cdot \rho_z \cdot \left(\frac{\partial T_z}{\partial t} + w_z \cdot \frac{\partial T_z}{\partial z} + w_R \cdot \frac{\partial T_z}{\partial r} \right) = q_{m_2} + q_{zв} \end{aligned}, \quad (3.3)$$

где c_M – теплоемкость металла, $\rho_M = \rho_M \cdot (1 - m)$; ρ, T_M, λ_M – плотность, температура и теплоемкость металла соответственно; $c_z, \rho_z = \rho_z m$ – теплоемкость и плотность газа, проходящего через металл (шихту); m – пористость среды; T_z – температура газа; q_L, q_{m_2} – объемная плотность потока излучения и потока между фазами металл-газ; $q_{mв}, q_{zв}$ – объемная плотность внутренних источников тепла в металле и газе соответственно; w – скорость газа; ρ – давление; m – внешние силы [37].

Коэффициент теплопроводности для теплоизоляционных огнеупоров изменяется в зависимости от температуры в среднем прямолинейно и приблизительно подсчитывается по формуле [37]:

$$\lambda_t = \lambda_0 + a \cdot t, \quad (3.4)$$

где λ_t – коэффициент теплопроводности при 0 °С, t – температура °С, a – постоянный коэффициент, зависящий от природы материала [86].

Таким образом, коэффициент теплопроводности может выполнять роль передаточной функции, для задачи управления тепловым состоянием ДСП.

Экспериментальные исследования влияния изменения температуры металла на изменение температуры футеровки и электродов

Используя в качестве модели электродуговой печи установку, описанную в п. 2.2, была проведена серия экспериментов, показывающая изменение температуры металла, футеровки, электродов в течение плавки.

На рисунках 3.1 и 3.2 представлены фотографии эксперимента.

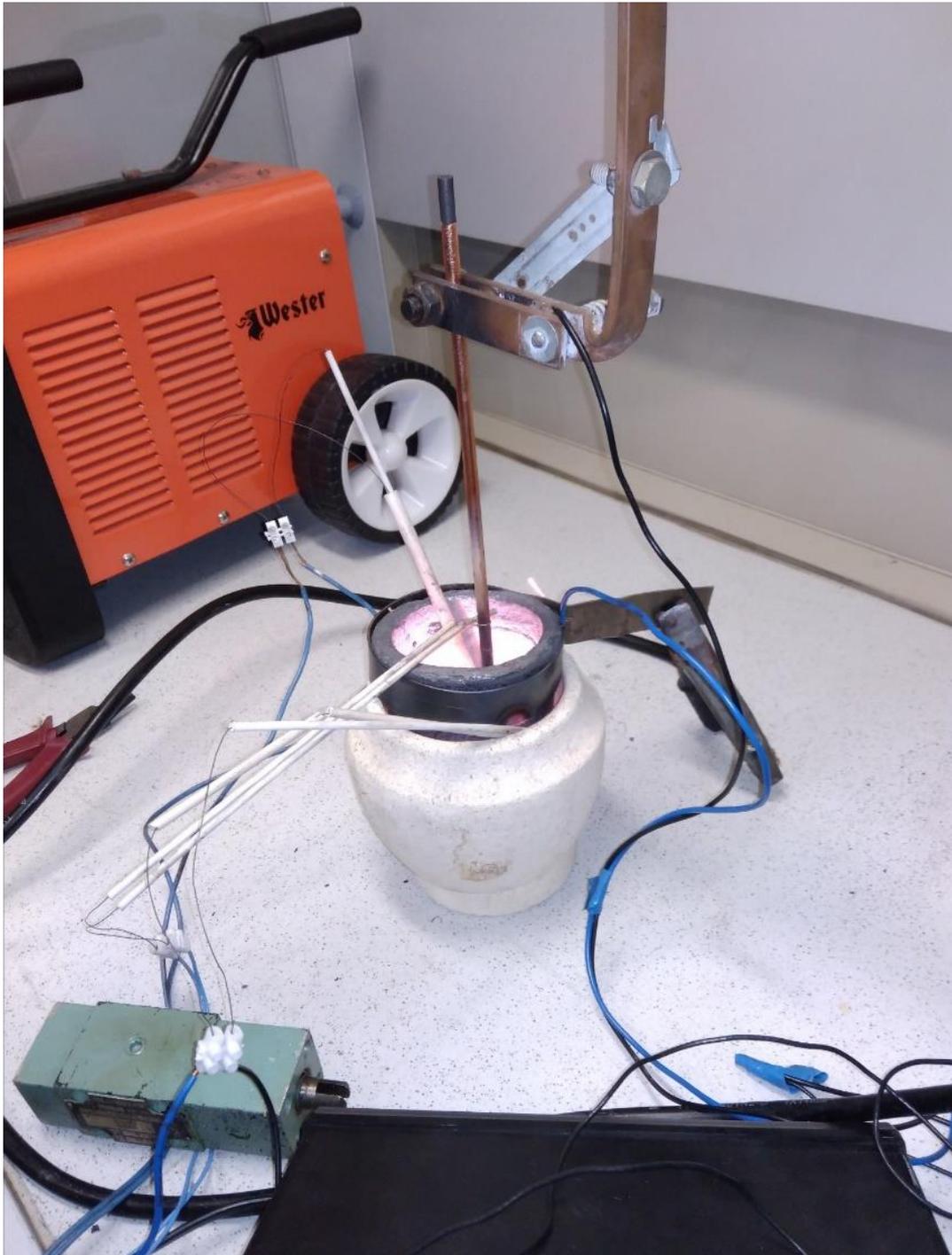


Рисунок 3.1 – Эксперимент (начало плавки металла)

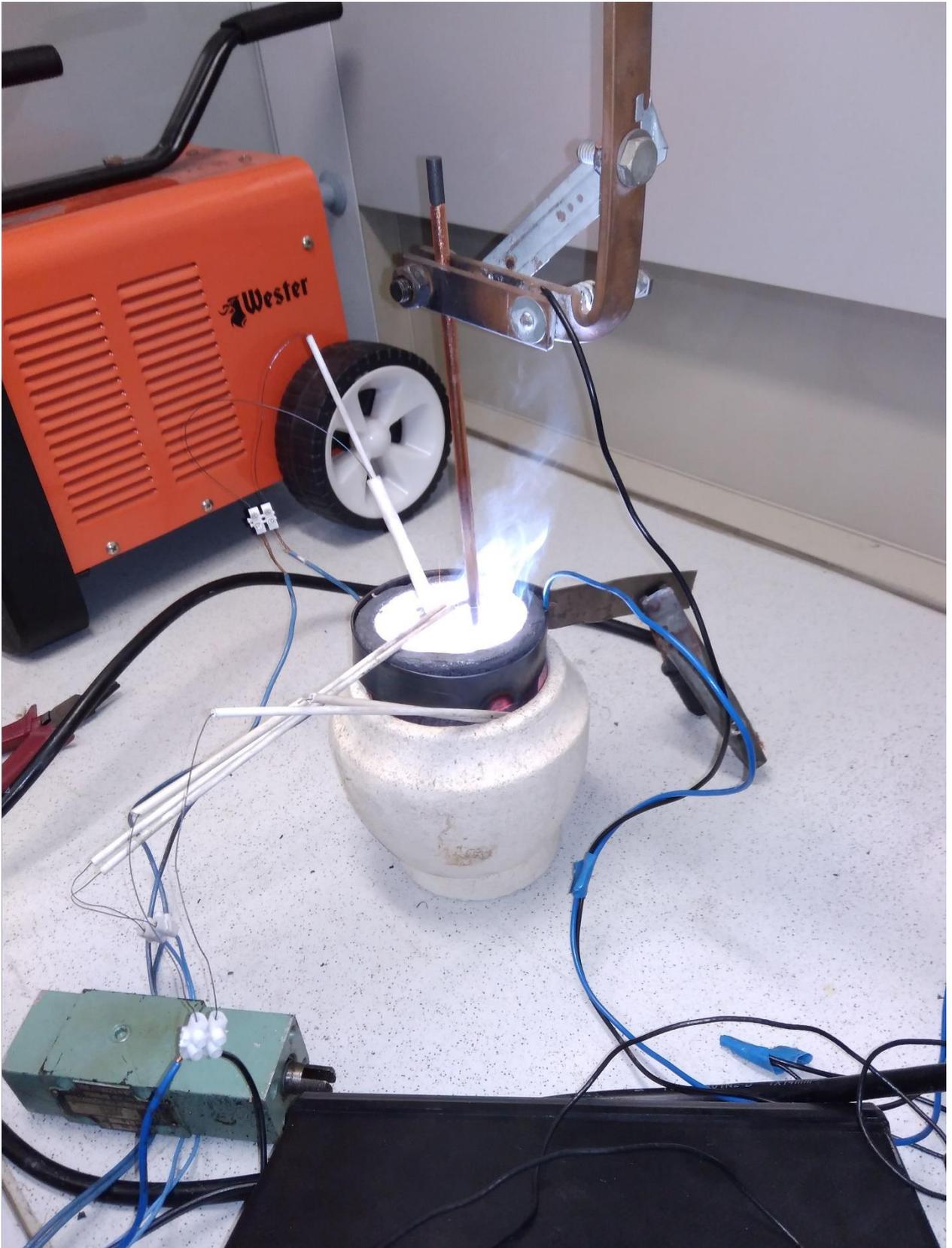


Рисунок 3.2 – Эксперимент (расплавленный металл)

Для обработки результатов эксперимента в программном обеспечении Matlab R2014b в графической среде имитационного моделирования Simulink была

написана программа, позволяющая оценить скорости изменения температурных параметров печи (рисунке 3.3).

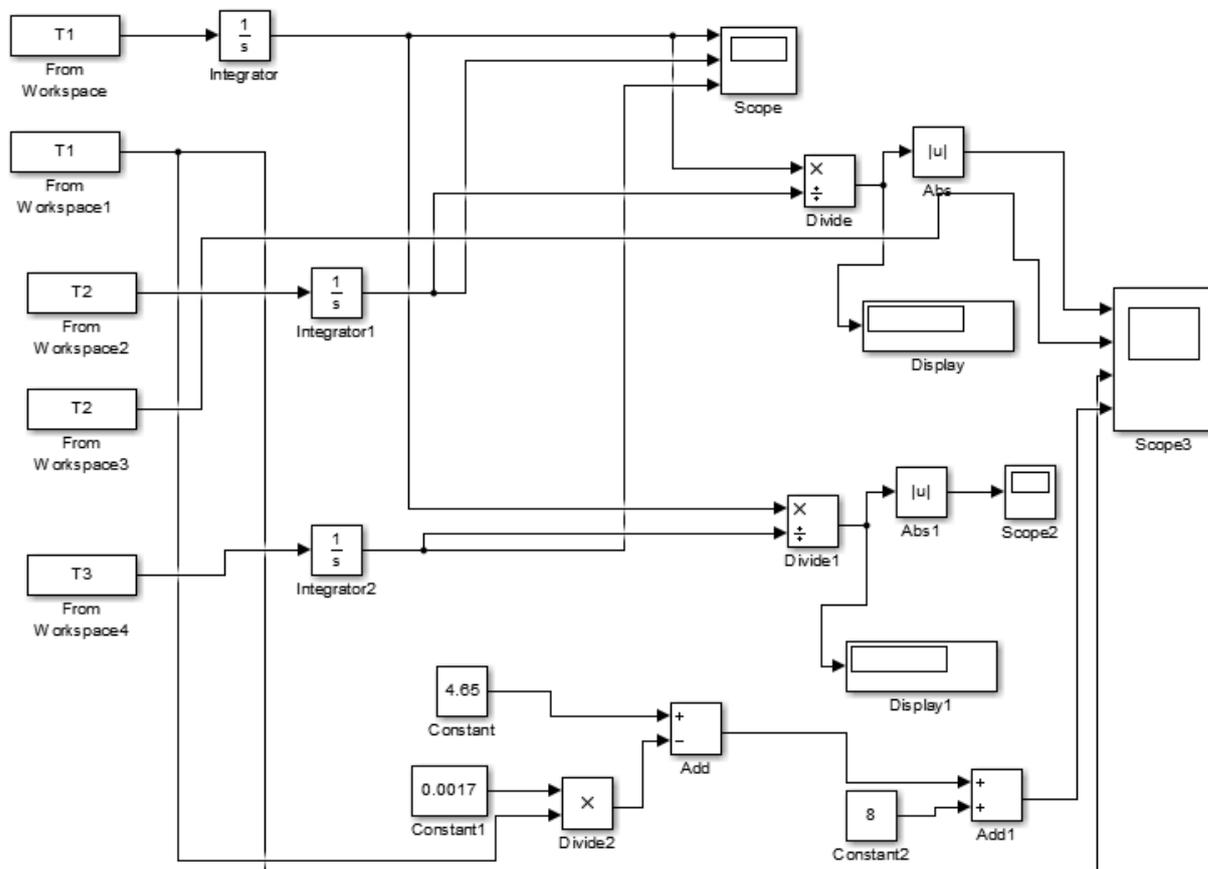


Рисунок 3.3 – Графический код программы для оценки скорости изменения температуры металла, футеровки и электродов

На рисунке 3.4 представлены графики изменения температуры металла, футеровки и электродов в течение 1000 с. Условно можно принять этот период как период расплавления металла («болото»). Из анализа графиков (рисунок 3.4) следует вывод, что при нагревании и расплавлении металла температура футеровки изменяется с запозданием (по сравнению с температурой металла). Температура электрода также изменяется с запозданием, но запаздывание носит более выраженный характер, чем в случае температуры футеровки. Это связано с влиянием расположения конструктивных элементов от максимума нагрева. Видно, что футеровка прогревается в 4 раза быстрее, чем электроды. Изменение положения электродов вследствие их попеременного движения вниз или вверх при регулировании дуги приводит к неравномерному прогреву данных элементов и скачкам

температуры. Опыты показали, что на практике стабильным местом для установки термопары на электроде является верхняя часть электрода в зоне контакта с токоподводящими элементами [40].

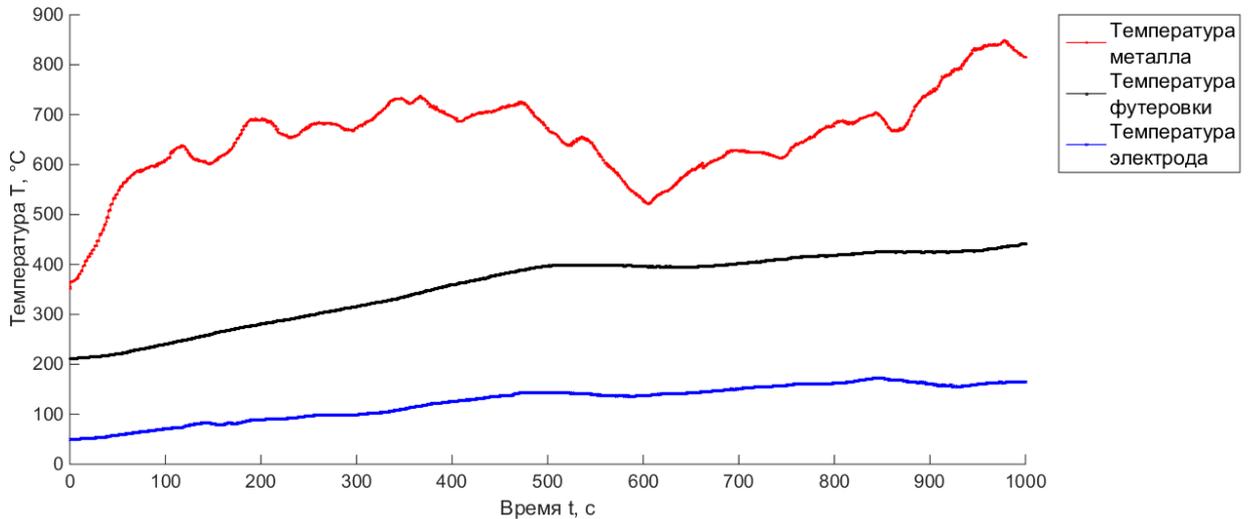


Рисунок 3.4 – Изменение температуры в течение плавки

Для наглядной и более точной оценки скорости изменения температур были получены графики скорости их изменения (рисунок 3.5).

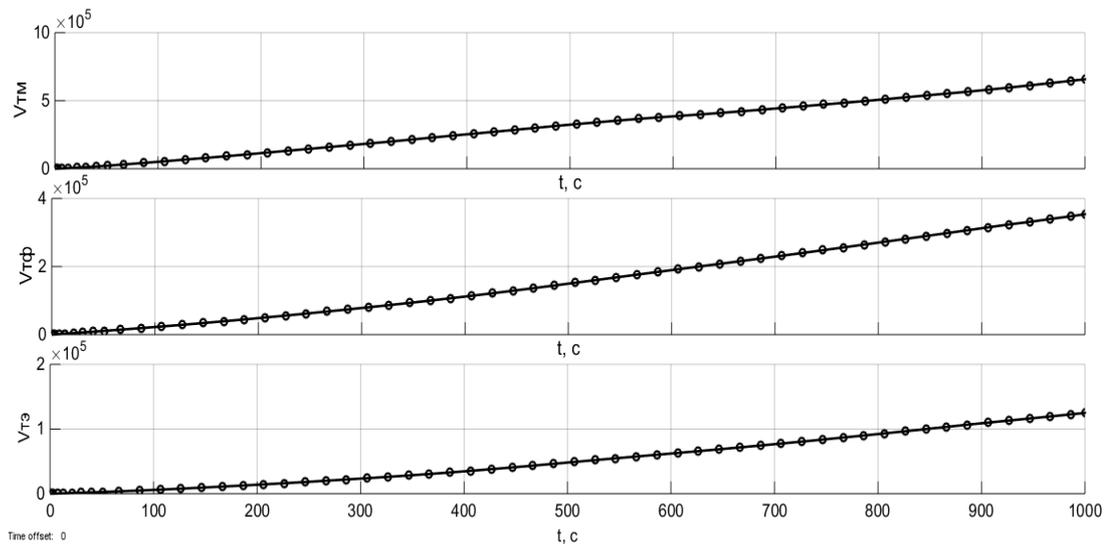


Рисунок 3.5 – Скорости изменения температур металла, футеровки и электродов ($V_{тэ}$ – скорость изменения температуры электрода; $V_{тф}$ – скорость изменения температуры футеровки; $V_{тм}$ – скорость изменения температуры металла)

Из графиков (рисунок 3.5) видно, что скорости изменения температур металла, футеровки и электродов имеют один порядок, но скорость изменения тем-

пературы металла в 2.5 раза превышает скорость изменения температуры футеровки и примерно в 3.5 раза превышает скорости изменения температуры электродов. Передаточный коэффициент для металла и футеровки – $K_{мф} = 2.5$, для металла и электродов $K_{мэ} = 3.5$.

Для определения характера влияния изменения температуры металла на температуру футеровки был введен коэффициент запаздывания (рисунок 3.6). Коэффициент теплопроводности шамотного кирпича рассчитывался по формуле:

$$\lambda = 4.65 - 0.0017 \cdot t, \quad (3.5)$$

где t – температура металла, °С.

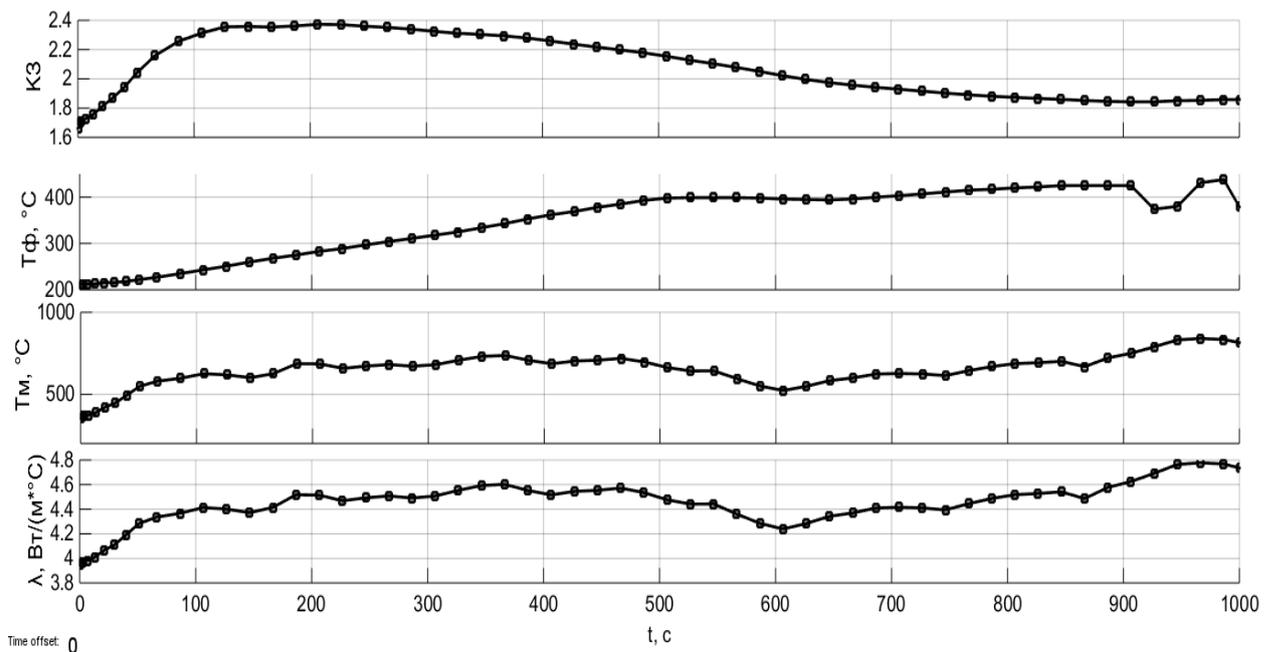


Рисунок 3.6 – Изменение коэффициента запаздывания в течение периода расплавления

Из полученных зависимостей (рисунок 3.6) следует, что в начале плавки с момента времени 100 секунд до 700 секунд идет прогрев футеровки, поэтому коэффициент запаздывания носит четко выраженный нелинейный характер и зависит от материала футеровки и от разницы температур. После 700 с коэффициент запаздывания линейно зависит от разности температур металла и футеровочных материалов.

Для описания теплопередачи от металла к футеровке и рассмотрения процесса прогрева футеровки условно примем футеровку как многослойную стенку, состоящую из двух слоев. Пусть толщины слоев δ_1 и δ_2 , коэффициенты теплопроводности λ_1 и λ_2 . С одной стороны находится горячая среда с температурой t_M (расплавленный металл или нагреваемая шихта), с другой – холодная (контур водяного охлаждения футеровки) t_ϕ . Значение общего коэффициента теплоотдачи со стороны расплавленного металла или нагреваемой шихты – α_1 , со стороны контура водяного охлаждения футеровки – α_2 . Тогда значение плотности теплового потока для данного случая:

$$q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot (t_M - t_\phi) = k \cdot (t_M - t_\phi), \quad (3.6)$$

Из уравнения плотности теплового потока (3.6) определим значение коэффициента теплопередачи для футеровки ДСП [36, 37, 38, 47]:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (3.7)$$

Распределение температур через футеровку ДСП представлено на рисунке 3.7.

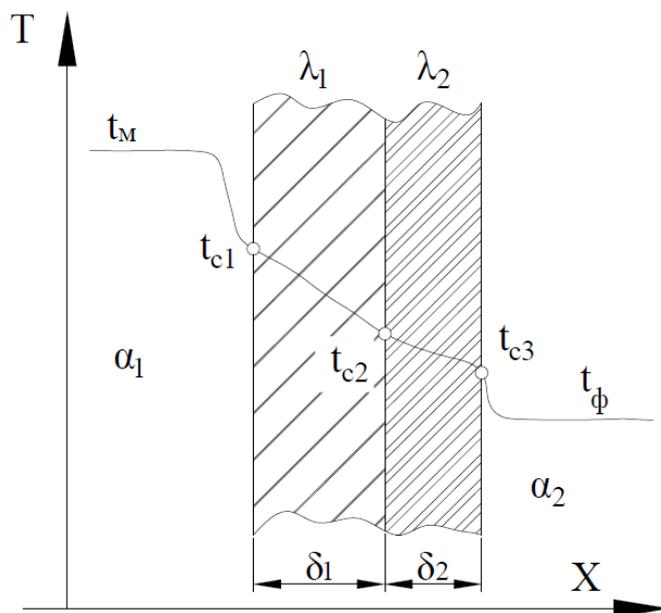


Рисунок 3.7 – Теплопередача через футеровку ДСП

Используя метод наименьших квадратов, описанный в п. 2.2, была выполнена аппроксимация экспериментальных данных, в результате чего получены следующие зависимости: зависимость температуры металла от времени и зависимость температуры футеровки от времени (рисунок 3.8); зависимость температуры металла от времени и зависимость температуры электродов от времени (рисунок 3.9); зависимость температуры футеровки от температуры металла (рисунок 3.10); зависимость температуры электродов от температуры металла (рисунок 3.11).

При обработке экспериментальных данных выдвинута гипотеза, что зависимости температуры футеровки от температуры металла, температуры электрода от температуры металла носят линейный характер. Впоследствии данная гипотеза подтвердилась.

Оценка адекватности аппроксимирующих зависимостей (зависимостей температуры футеровки от температуры металла, температуры электродов от температуры металла) исследуемому объекту производилась с помощью критерия Фишера. В результате оценки было выявлено, что полученные зависимости адекватны объекту исследования.

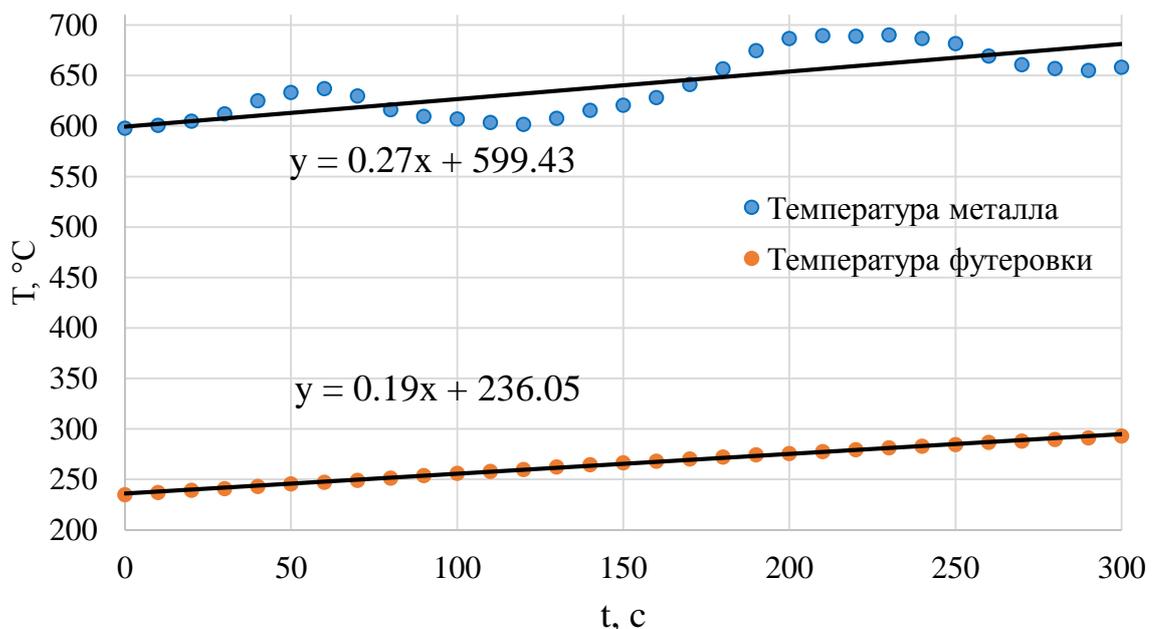


Рисунок 3.8 – Влияние изменения температуры металла на изменение температуры футеровки

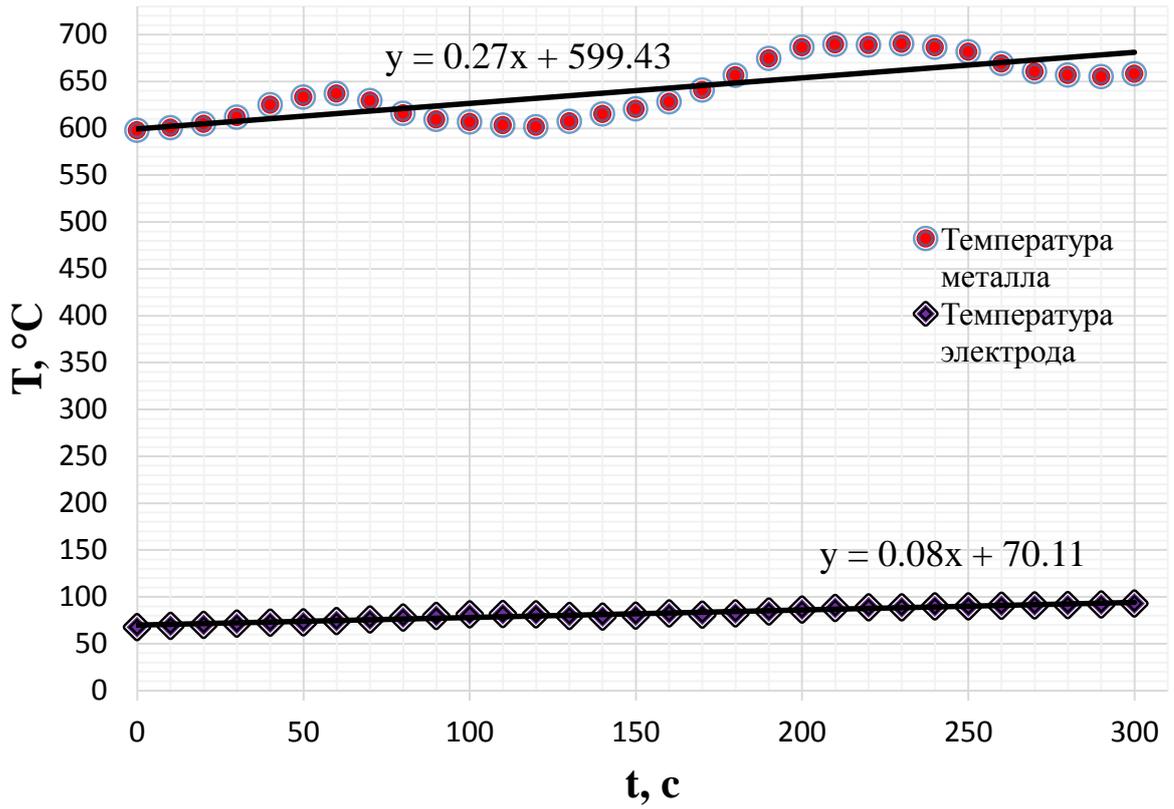


Рисунок 3.9 – Влияние изменения температуры металла на изменение температуры электрода

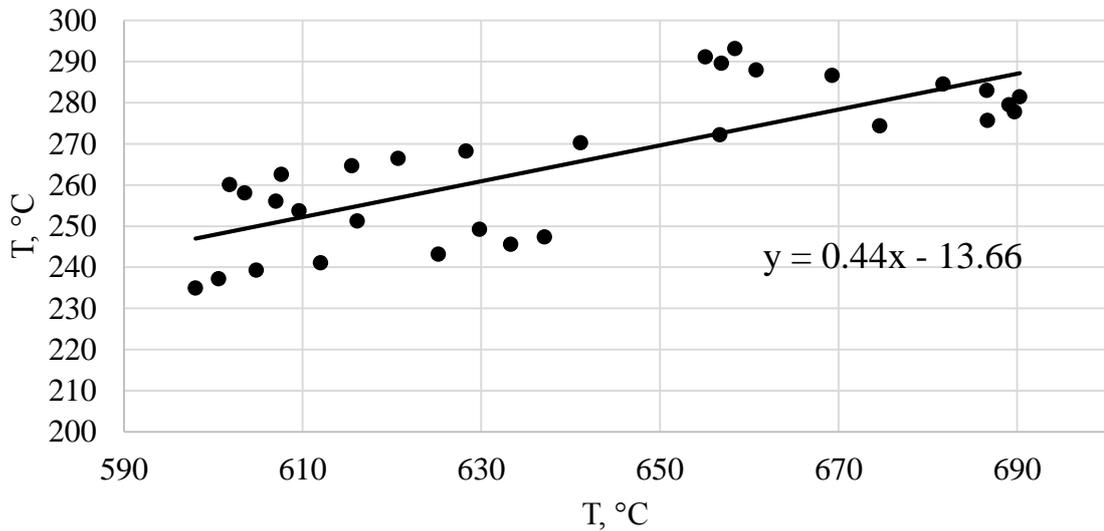


Рисунок 3.10 – Зависимость температуры футеровки от температуры металла

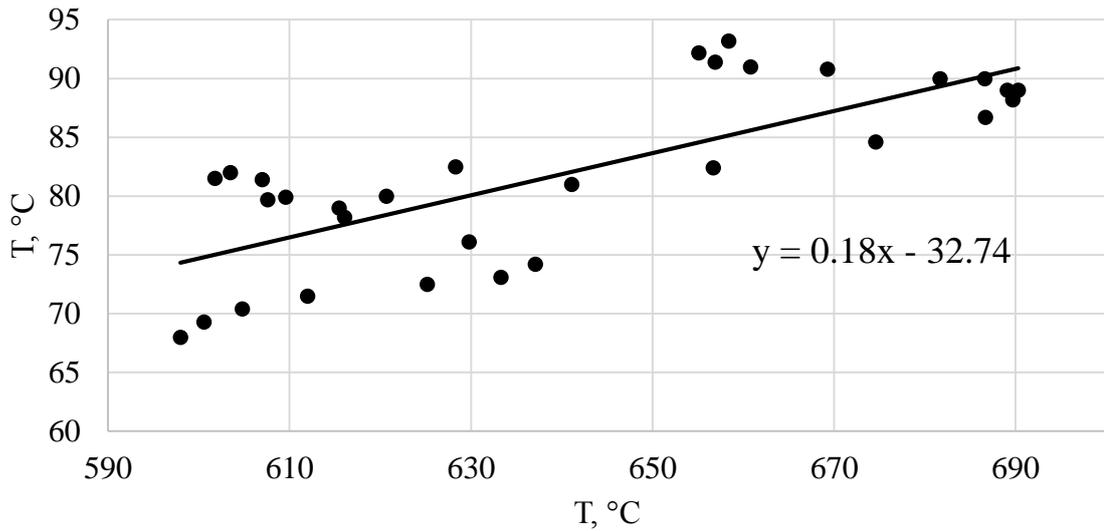


Рисунок 3.11 – Зависимость температуры электрода от температуры металла

Видно, что существует определенная инерционность значений между показаниями температуры расплава и температур футеровки и электрода. Это связано с запаздыванием теплораспределения в слоях футеровочных материалов и составных частях электрода относительно расплава.

3.2 Влияние изменения температуры металла во время плавки на футеровку печи ДСП-90

Коэффициент огнеупорности футеровки

В результате обработки данных, полученных при проведении промышленного эксперимента, методика которого описана в п. 2.3.2, был определен коэффициент огнеупорности для футеровки печи ДСП-90. Расчет производился по формуле 2.2.

$$K_o = \frac{350.0^2 \cdot 56.2}{216.5^2} = 146.9, \frac{kB \cdot Bm}{cm^2}.$$

График влияния изменения напряжения дуги на коэффициент огнеупорности футеровки представлен на рисунке 3.12. График влияния изменения напряжения и переключения ступеней трансформатора на коэффициент огнеупорности футеровки представлен на рисунке 3.13.

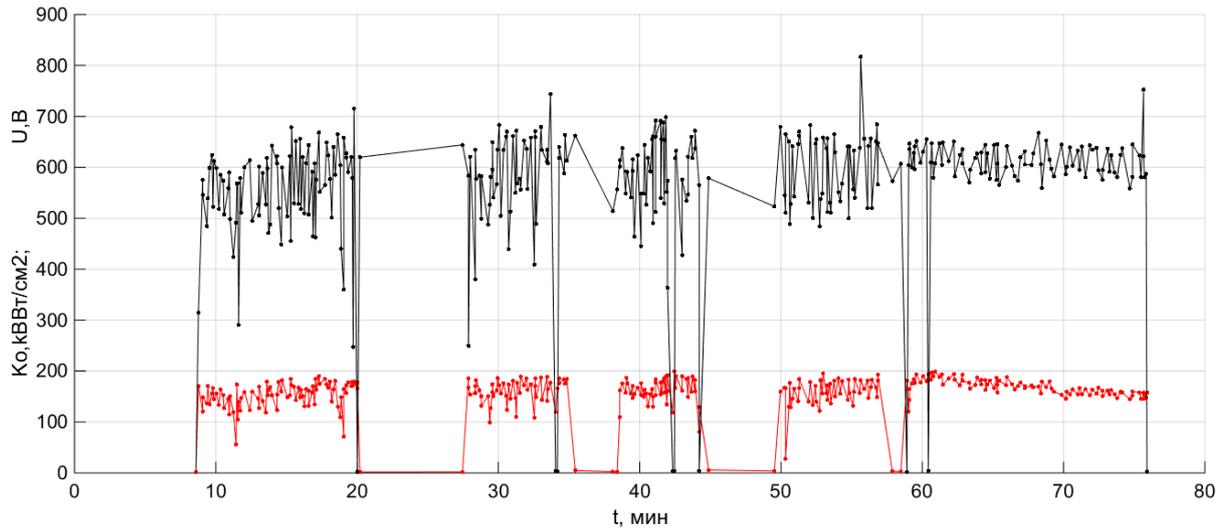


Рисунок 3.12 – Влияние изменения напряжения дуги на коэффициент огнеупорности футеровки

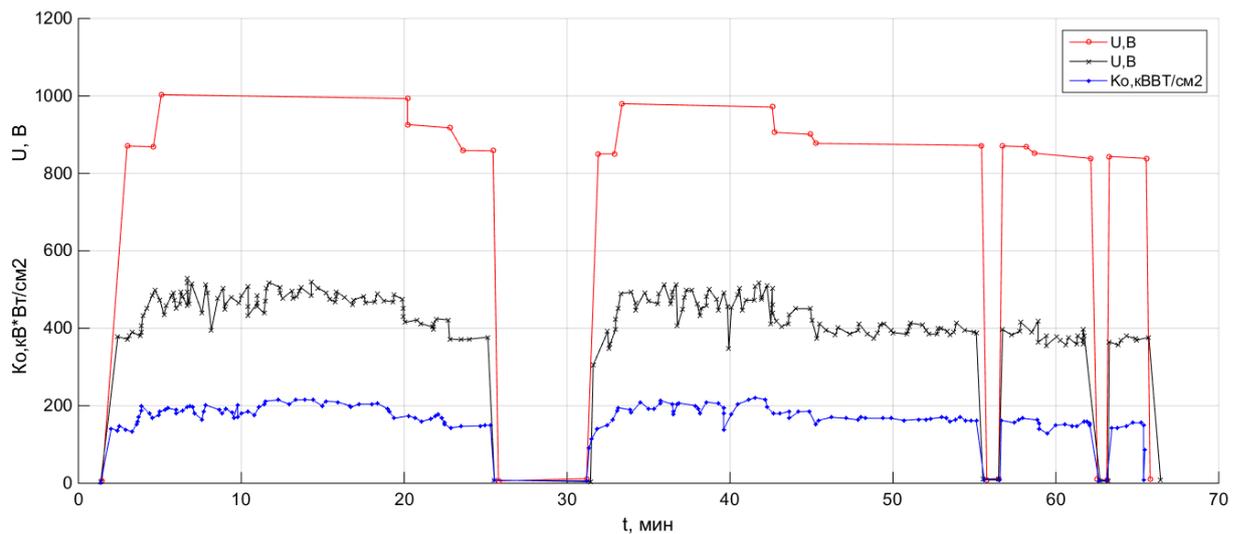


Рисунок 3.13 – Влияние изменения напряжения и переключения ступеней трансформатора на коэффициент огнеупорности футеровки

Анализируя графики изменения напряжения дуги (3.12 и 3.13) в период доводки металла, можно увидеть, что среднее напряжение дуги равно примерно 350 В. Длина дуги при этом примерно равна 350 мм. Исходя из этого, уровень шлака должен быть не менее 400 мм, чтобы полностью погрузить дугу в шлак, тем самым уменьшить степень ее влияния на футеровку. Следовательно, среднее

значение коэффициента огнеупорности за плавку равно $146.9 \frac{kB \cdot Bm}{cm^2}$, при максимально допустимом значении коэффициента для ДСП – не более $120.0 \frac{kB \cdot Bm}{cm^2}$.

График зависимости коэффициента огнеупорности от тока дуги представлен на рисунок 3.14.

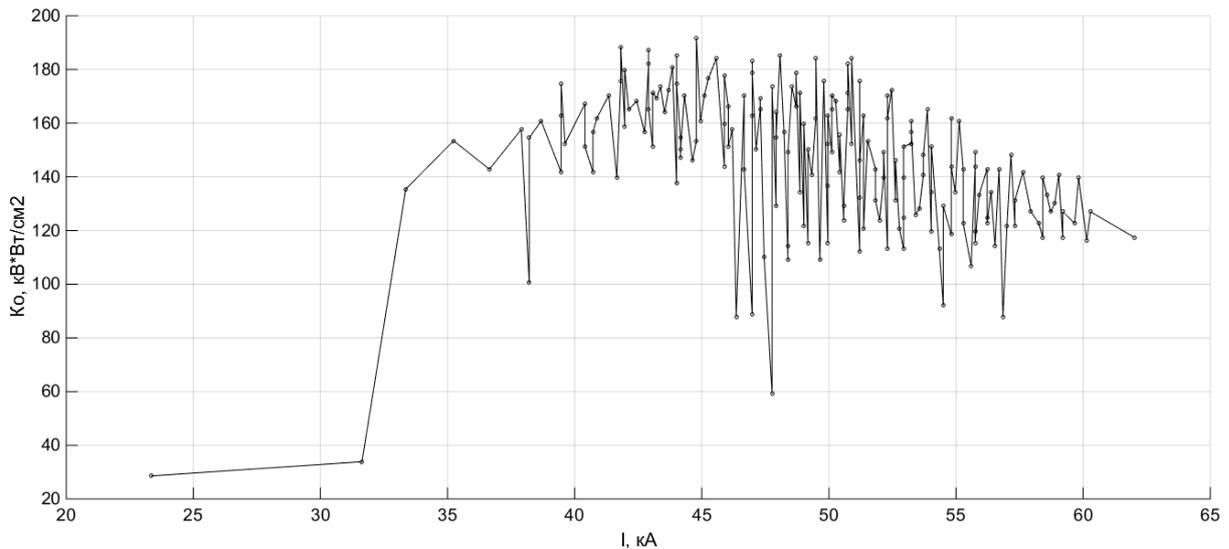


Рисунок 3.14 – Зависимость коэффициента огнеупорности от тока дуги

Из данного графика можно сделать вывод, что коэффициент огнеупорности зависит непосредственно от тока дуги прямо пропорционально, что также подтверждается формулой 2.2.

Графики температуры воды охлаждения и днища ДСП, полученные из SCADA-системы, приведены на рисунке 3.15.

В течение всего периода работы печи и в конце плавления, а также в период выливки металла, необходимо контролировать фактические значения температуры воды, выходящей из водоохлаждаемых панелей. Это, в частности, применяется к нижнему ряду медных панелей для охлаждения печи (рисунок 3.7 значение t_{ϕ}).

При работе с ответвлениями при плавлении и при перегреве значения показателя износа огнеупора находятся на пределе, так что для обеспечения безопасной работы должны выполняться два условия:

- Полное покрытие водоохлаждаемых панелей печи скрапом при его плавлении.

– Наличие во время очистки сильно вспененного шлака.

Следовательно, если эти условия не выполняются, подводимая энергия должна быть немедленно снижена, иначе большое количество тепловой энергии будет направлено на футеровку, что повлечет за собой ее перегрев.

В ситуации, когда повышается температура воды на выходе из термопанелей, также необходимо уменьшить подводимую энергию для предотвращения перегрева футеровки и конструктивных элементов печи [41].



Рисунок 3.15 – Графики температуры воды охлаждения и днища ДСП, полученные из SCADA-системы

Видно, что температура воды первого контура охлаждения ДСП-90 составляет 28.50 °С, второго – 27.00 °С. Следовательно, во время проведения эксперимента агрегат работал в штатном режиме (без отклонения от нормативов), что позволило получить достоверные значения температуры расплава при измерении термопарой.

3.3 Выводы по Главе 3:

В третьей главе диссертационной работы представлены результаты обработки экспериментальных данных, полученных на лабораторной установке при проведении эксперимента по определению зависимости температуры футеровки и электродов от температуры металла в ходе плавки металлолома в ДСП, а также промышленных экспериментов по определению коэффициента огнеупорности печи ДСП-90, сделаны следующие выводы:

1. Установлено, что при нагревании и расплавлении металла температура футеровки изменяется с запаздыванием (по сравнению с температурой металла). Температура электрода также изменяется с запаздыванием, но запаздывание носит более выраженный характер, чем в случае температуры футеровки, что является следствием влияния близкого расположения конструктивных элементов от максимума нагрева;

2. Доказано, что скорости изменения температур металла, футеровки и электродов имеют один порядок, но скорость изменения температуры металла примерно в 2.5 раза выше скорости изменения температуры футеровки и примерно в 3.5 раза выше скорости изменения температуры электродов;

3. Выявлено, что в начале плавки с момента времени 100 секунд до 700 секунд идет прогрев футеровки, поэтому коэффициент запаздывания носит четко выраженный нелинейный характер и зависит от материала футеровки и от разницы температур;

4. Получено среднее значение коэффициента огнеупорности за плавку равное $146.9 \frac{kB \cdot Bm}{cm^2}$.

5. Получены зависимости температуры футеровки от температуры металла $y = 0.44x - 13.66$ и температуры электродов от температуры металла $y = 0.18x - 32.74$. Оценка адекватности аппроксимирующих зависимостей (зависимостей температуры футеровки от температуры металла, температуры электродов от температуры металла) исследуемому объекту производилась с помощью критерия

Фишера. В результате оценки было выявлено, что полученные зависимости адекватны объекту исследования.

В результате анализа обработанных данных сформулировано следующее научное положение:

Энергетический баланс плавки и температурный градиент дуговой сталеплавильной печи при изменении температуры расплава в 2.0-2.5 раза определяется скоростью изменения температуры элементов футеровки, которая в 3.0-3.5 раза выше скорости изменения температуры электродов.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПЛАВКИ В ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ

4.1 Управление тепловым состоянием дуговой сталеплавильной печи

В настоящее время техническое состояние футеровки на работающих промышленных печах определяют и фиксируют в основном визуальным осмотром наружной поверхности, при этом не используются данные математического моделирования теплового поля при изменении мощности дуги [2]. При этом существующие методы контроля ДСП и уровень автоматизации не соответствует современным тенденциям развития техники и физико-химическим условиям плавильных процессов многокомпонентных сплавов, что приводит к преждевременному выходу из строя электродов и футеровки печей, а также большому количеству брака при низком выходе годной продукции.

Целостность футеровки напрямую зависит от эффективного управления основным источником тепла в дуговой сталеплавильной печи – электрической дугой. Контроль температуры в печи настоящее время производится один раз в конце плавки для определения степени готовности металла. Управление электрической дугой осуществляется по методу импеданса, что не позволяет учитывать температуру в печи [3].

Таким образом, контроль теплового состояния печи во время плавки и эффективное управление дуговой сталеплавильной печью в процессе плавки исходного металлургического сырья является одной из актуальных задач в металлургической отрасли, так как в настоящее время в полном объеме данная проблема не решена.

Для моделирования теплового состояния дуговой сталеплавильной печи использовали метод конечных разностей. Применим основную идею метода для решения задачи теплопроводности при прогреве футеровки ДСП. Так как ванна печи ДСП-90 имеет цилиндрическую форму, рассматриваем простой прогрев цилиндрического изделия без внутренних источников тепловыделения и изменения

концентрации. Такие допущения позволят получить более простые уравнения, удобные для ручного счета, которые помогают более четко представить основные идеи сеточных методов, лежащих в основе существующих пакетов для решения систем дифференциальных уравнений.

Процесс прогрева футеровки ДСП описывается дифференциальным уравнением следующего вида:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (4.1)$$

Начальные и граничные условия для данной задачи:

$$T(0, r) = T_n(r); \quad \frac{\partial T(t, 0)}{\partial r} = 0; \quad -\lambda \cdot \frac{\partial T(t, R)}{\partial r} = \alpha(T(t, R) - T_{00}) \quad (4.2)$$

Начальное условие выражает распределение температуры в футеровке печи в начальный момент времени. 1-е граничное условие описывает симметрическое распределение температуры по радиусу прогрева ДСП, 2-е граничное условие – равенство теплового потока из окружающей среды (электрической дуги и металла) тепловому потоку внутрь футеровки (согласно свойству теплопроводности).

В данном случае $0 \leq r \leq R$ – радиальная координата, R – радиус печи, m ; a – коэффициент температуропроводности прогреваемого материала, m^2/c ; α – коэффициент теплоотдачи из окружающей среды, $Вт/(m^2 \cdot K)$; λ – коэффициент теплопроводности прогреваемого материала, $Вт/(m \cdot K)$. В данном случае используется коэффициент температуропроводности прогреваемого материала с целью учета скорости выравнивания температуры жидкой стали. Коэффициент теплопроводности прогреваемого материала позволяет учесть плотность теплового потока при единичной разности температур между поверхностями слоя расплава единичной толщины.

Для удобства анализа введем в уравнение безразмерный радиус:

$$\rho = \frac{r}{R}; \quad r = \rho \cdot R; \quad dr = R \cdot d\rho; \quad dr^2 = R^2 \cdot d\rho^2 \quad (4.3)$$

Подставив значения радиальной координаты и ее производных из уравнения (4.3) в уравнения (4.1) и (4.2), получим следующие уравнения:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{a}{R^2} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial T}{\partial \rho} \right) \quad (4.4)$$

$$T(0, \rho) = T_H(\rho); \quad \frac{\partial T(t, 0)}{\partial \rho} = 0; \quad -\lambda \cdot \frac{\partial T(t, 1)}{\partial \rho} = \alpha(T(t, 1) - T_{oo}) \quad (4.5)$$

Непрерывное пространство в координатах $T(\rho, t)$, представляющее собой плоскость, заменим на совокупность дискретных точек с координатами $T(i, j)$ (рисунок 4.1).

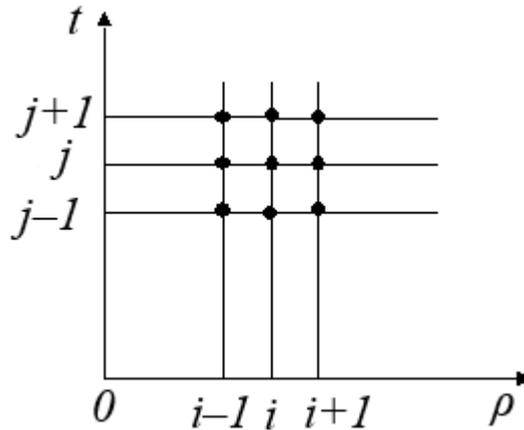


Рисунок 4.1 – Схема разбиения непрерывных координат на дискретные точки для задачи теплопроводности футеровки ДСП

Непрерывные производные для точки с координатами (i, j) представим их конечно-разностными эквивалентами, выраженными через значения функций в точках $(i-1, i, i+1)$ по пространственной координате и $(j-1, j, j+1)$ по временной координате.

Расстояние между точками по пространственной и временной переменным обозначим следующим образом:

$$\Delta \rho = \frac{1}{N}; \quad \rho = i \cdot \Delta \rho; \quad \text{и } t = j \cdot \Delta t, \quad (4.6)$$

Так как время на верхней границе не ограничено, зададим Δt из соображений точности.

Представим значения производных через разности:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial T}{\partial \rho} \right|_i &\cong \frac{T_i^{(j-1)} - T_{i-1}^{(j-1)}}{\Delta \rho}; \quad \left. \frac{\partial c}{\partial \rho} \right|_{i+1} \cong \frac{T_{i+1}^{(j-1)} - T_i^{(j-1)}}{\Delta \rho}; \\ \frac{\partial^2 T}{\partial T^2} &\cong \frac{\frac{T_{i+1}^{(j-1)} - T_i^{(j-1)}}{\Delta \rho} - \frac{T_i^{(j-1)} - T_{i-1}^{(j-1)}}{\Delta \rho}}{\Delta \rho} = \frac{T_{i+1}^{(j-1)} - 2 \cdot T_i^{(j-1)} + T_{i-1}^{(j-1)}}{\Delta \rho^2}; \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} \cong \frac{T_i^{(j)} - T_i^{(j-1)}}{\Delta t}$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial T}{\partial \rho} \right|_i &\cong \frac{T_i^{(j-1)} - T_{i-1}^{(j-1)}}{\Delta \rho}; \quad \left. \frac{\partial c}{\partial \rho} \right|_{i+1} \cong \frac{T_{i+1}^{(j-1)} - T_i^{(j-1)}}{\Delta \rho}; \\ \frac{\partial^2 T}{\partial T^2} &\cong \frac{\frac{T_{i+1}^{(j-1)} - T_i^{(j-1)}}{\Delta \rho} - \frac{T_i^{(j-1)} - T_{i-1}^{(j-1)}}{\Delta \rho}}{\Delta \rho} = \frac{T_{i+1}^{(j-1)} - 2 \cdot T_i^{(j-1)} + T_{i-1}^{(j-1)}}{\Delta \rho^2}; \\ \frac{\partial T}{\partial t} &\cong \frac{T_i^{(j)} - T_i^{(j-1)}}{\Delta t} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Подставив разностные значения производных в исходное уравнение (4.4) и в уравнения граничных условий (4.5), получим:

$$\begin{aligned} \frac{T_i^{(j)} - T_i^{(j-1)}}{\Delta t} &= \frac{a}{R^2} \cdot \left(\frac{T_{i+1}^{(j-1)} - 2 \cdot T_i^{(j-1)} + T_{i-1}^{(j-1)}}{\Delta \rho^2} + \frac{1}{i \cdot \Delta \rho} \cdot \frac{T_i^{(j-1)} - T_{i-1}^{(j-1)}}{\Delta \rho} \right); \\ T_i^{(j)} &= T_i^{(j-1)} + B \cdot (T_{i+1}^{(j-1)} - 2 \cdot T_i^{(j-1)} + T_{i-1}^{(j-1)}) + \frac{B}{i} (T_i^{(j-1)} - T_{i-1}^{(j-1)}) \\ B &= \frac{a \cdot \Delta t}{R^2 \cdot \Delta \rho^2} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Рекуррентное соотношение (4.9) позволяет определить все точки от $i=1$ до $i = N-1$ по пространственной переменной на j -м временном слое. Значение 0-й точки и N -й точек при этом вычисляются из граничных условий.

$$T_0^{(j)} = T_1^{(j)} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} - \cdot \frac{\lambda}{R} \frac{T_N^{(j)} - T_{N-1}^{(j)}}{\Delta \rho} &= \alpha (T_N^{(j)} - T_{oc}); \\ T_N^{(j)} (1 + \frac{\alpha \cdot R \cdot \Delta \rho}{\lambda}) &= T_{N-1}^{(j)} + \frac{\alpha \cdot R \cdot \Delta \rho}{\lambda} \cdot T_{oc} \\ T_N^{(j)} &= \frac{T_{N-1}^{(j)} + \frac{\alpha \cdot R \cdot \Delta \rho}{\lambda} \cdot T_{oc}}{(1 + \frac{\alpha \cdot R \cdot \Delta \rho}{\lambda})} \end{aligned} \quad (4.11)$$

Следовательно, в ходе расчетов были получены соотношения (4.9-4.11) для определения всех значений температур по пространственной и временной координатам. В данном случае используется следующий порядок расчетов. Из начальных условий записываются все значения температуры в выбранных точках 0-го временного слоя в соответствии с выбранным количеством точек для $i = 0, 1, \dots, N$. Далее по уравнению (4.9) вычисляются значения температур во всех точках от $i = 1$ до $i = N-1$ на 1-м временном слое $j = 1$. После этого по уравнению (4.10) вычисляется значение температуры в центре печи (для $i = 0$), а по уравнению (4.11) вычисляется температура на наружной поверхности футеровки. Таким образом, весь первый временной слой оказывается заполненным. Далее выполняются все вычисления для 2-го временного слоя $j = 2$, и так далее, до выхода на установившейся профиль температур. Данная процедура лежит в основе методов численного решения дифференциальных уравнений в частных производных, являющихся математическими моделями технологических процессов с распределенными параметрами [47, 59, 60, 61, 69, 86, 87, 91].

На основе данного метода была разработана программа для имитационного моделирования и управления тепловым состоянием дуговой сталеплавильной печи [60, 74].

Программа для ЭВМ написана на основе разработанного программного алгоритма управления тепловым состоянием ДСП, при котором контролируется температурный режим по всему объему металлургического агрегата.

В программе учитываются: начальные значения температуры ванны печи, температура в стенке печи, температура под электродами, температура металла (расплава).

Программа «Управление тепловым состоянием дуговой сталеплавильной печи» обеспечивает выполнение следующих функций: контроль температурного режима по всему объему металлургического агрегата; расчет температуры верхнего слоя шлака; расчет температурного поля металла под электродом; расчет теплового поля всего металла; расчет температуры стенки [74].

Код программы представлен на рисунках 4.2-4.5.

```

Untitled.m  ×  +
1 - a=[1601:-0.01:1600];
2 - b=[1.01:-0.0001:1];% задание начальных условий для ванны
3 - m=a'*b;
4 - d=[1:1:101];% размерность матрицы d^e
5 - e=[1:1:101];
6 - R=3; % радиус
7 - L=2; % высота
8 - a1=1.1720e-05; % коэффициент теплопроводности стали
9 - a2=1e-07; % коэффициент теплопроводности шлака
10 - a3=1.2e-07; % коэффициент теплопроводности шамота
11 - T1=450; % температура в стенке
12 - T2=1800; % температура под электродом
13 - t=2;
14 - m(1,1)=T2;

```

Рисунок 4.2 – Начальные условия для расчета теплового состояния печи

```

15 - while t<102; % расчёт первой строчки
16 -     m(1,t)=(T2-(T2*0.02)+m(1,t-1))/2;
17 -     t=t+1;
18 - end

```

Рисунок 4.3 – Расчет температуры верхнего слоя шлака

```

19 - tt=2;
20 - while tt<102;% расчёт первого столбца
21 -     m(tt,1)=(T2-(T2*0.03)+m(tt-1,1))/2;
22 -     tt=tt+1;
23 - end

```

Рисунок 4.4 – Расчет температуры металла под электродом

```

24 - t1=2;
25
26 - while t1<102; % расчёт металла
27 -     t2=2;
28 -     while t2<102;
29 -         m(t1,t2)=(m(t1,t2-1) - (m(t1,t2-1)*0.001) + m(t1-1,t2))/2;
30 -         t2=t2+1;
31 -     end
32 -     t1=t1+1;
33 - end

```

Рисунок 4.5 – Расчет температурного поля всего металла

В результате выполнения программы были получены профили и эюры температур по радиусу в процессе прогрева футеровки печи ДСП (рисунок 4.6).

Для наглядного представления теплораспределения в печи ДСП и влияния изменения температуры металла на состояние футеровки в программном комплексе ThermEx было выполнено 3D моделирование прогрева футеровки на примере печи ДСП-90 (рисунок 4.7). Видно, что температура футеровки в верхней части печи выше, чем в нижней. Это объясняется тем, что излучение от дуги попадает непосредственно в верхнюю часть футеровки.

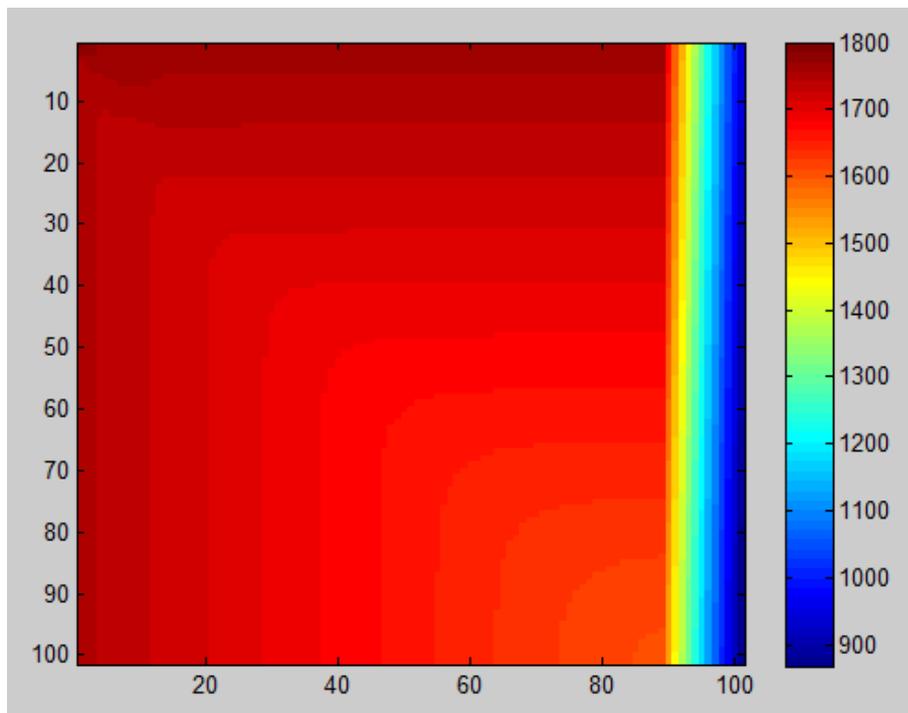


Рисунок 4.6 – Профили температур по радиусу в различные моменты времени в процессе прогрева футеровки печи

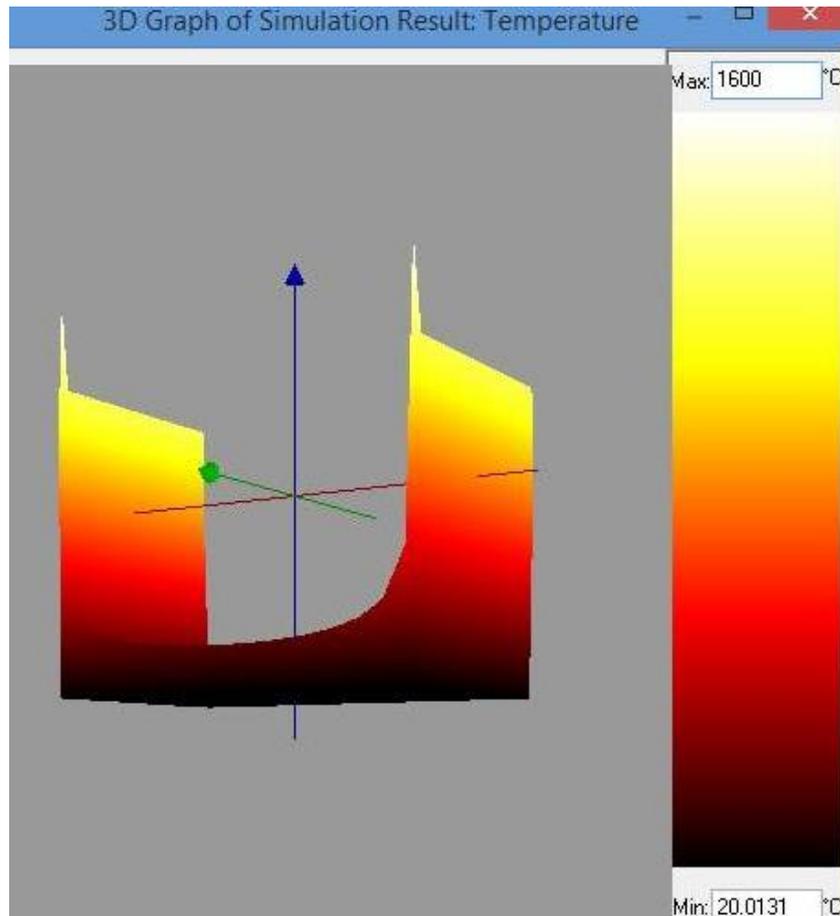


Рисунок 4.7 – Профили температур футеровки ДСП

Исходя из вышеизложенного, можно сделать техническое предложение: термопары для контроля температуры футеровки следует расположить как по периметру агрегата, так и на разной высоте печи для более точного определения разницы температур по всему объему печи, что подтверждается ранее выполненными исследованиями [89, 92, 93, 94].

4.2 Разработка способа контроля параметров дуговой сталеплавильной печи

Для снижения энергозатрат и повышения качества готового расплава, снижения количества преждевременно выходящих из строя электродов и подовой и боковой футеровки за счет повышения достоверности оценки теплового состояния печи был разработан способ контроля параметров ДСП.

Способ осуществляется следующим образом. Для измерения температуры и контроля теплового состояния дуговой печи в контрольных точках установлены термопары (ТПП (S)). Контрольные точки предполагаются на каждом электроде

трехэлектродной свечи непосредственно под креплением электрододержателя, между футеровкой и кожухом печи (в шести точках по периметру агрегата), в подине печи (в шести точках напротив каждого электрода и между ними). Расположение термопар представлено на рисунке 4.8. Цифрами на рисунке обозначены: 1 – термопара; 2 – электрод; 3 – электрододержатель; 4 – свод печи; 5 – футеровка печи; 6 – ванна печи; 7 – кожух печи.

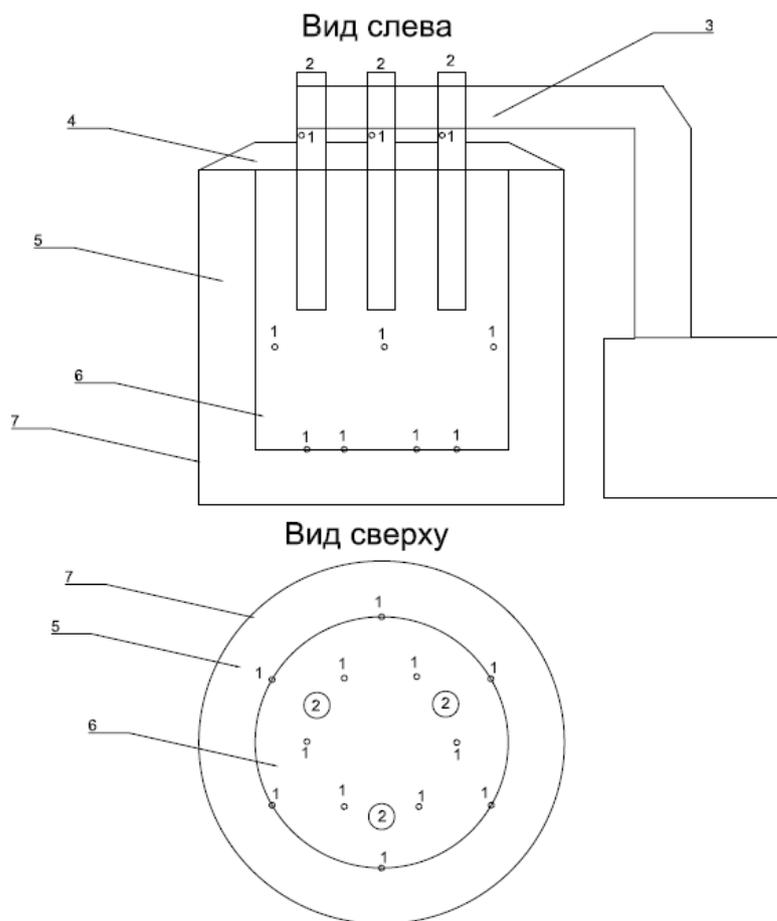


Рисунок 4.8 – Расположение термопар для контроля температуры в ДСП

Время плавки в печи ДСП-90 в данном случае составляет 52 минуты. После начала плавки определяется текущее время плавки (t) и измеряется температура указанными термопарами, затем данные для вычисления передаются в контроллер.

Программа управления, фиксируемая через работу контроллера, работает по следующему алгоритму (рисунок 4.9).

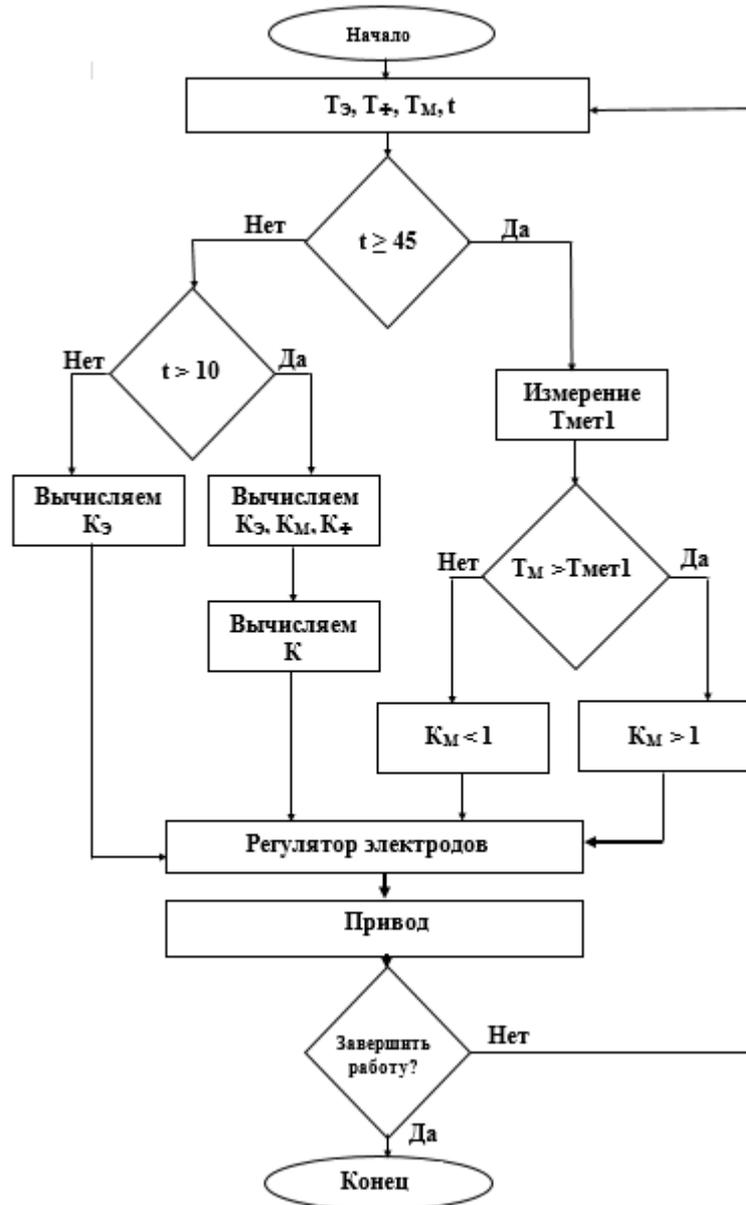


Рисунок 4.9 – Алгоритм работы программы для контроля параметров ДСП

По зависимостям вычисляется средняя температура электродов ($T_{\text{э}}$), средняя температура расплавленного металла ($T_{\text{М}}$), средняя температура футеровки ($T_{\text{ф}}$).

$$T_{\text{э}} = \frac{\sum_1^i T_{\text{э}i}}{i}, \quad (4.12)$$

$$T_{\text{М}} = \frac{\sum_1^n T_{\text{М}n}}{n}, \quad (4.13)$$

$$T_{\phi} = \frac{\sum_1^m T_{\phi m}}{m}. \quad (4.14)$$

Определяется текущее значение времени плавки. Если текущее значение времени плавки меньше 10 минут, то вычисляется коэффициент изменения температуры на электроде ($K_{\text{Э}}$).

$$K_{\text{Э}} = \frac{T_{\text{Э}}}{T_P}, \quad (4.15)$$

$$\text{где } T_P = \frac{P}{M_M \cdot C_M} \cdot t, \quad (4.16)$$

где P – мощность, используемая для нагрева, Вт;

C_m – расчетная удельная теплоемкость металла, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;

M_m – масса металла, кг;

t – текущее время плавки, с.

Значение $K_{\text{Э}}$ передается в регулятор электродов, затем управляющий сигнал передается на привод электрододержателя.

Если время плавки расположено в диапазоне от 10 до 45 минут, тогда вычисляются коэффициенты: $K_{\text{Э}}$, коэффициент изменения температуры металла (K_M) и коэффициент изменения температуры футеровки ($K_{\text{Ф}}$).

$K_{\text{Э}}$ вычисляется по формуле (4.15), K_M и $K_{\text{Ф}}$ вычисляются по формулам (4.17) и (4.18) соответственно.

$$K_M = \frac{T_M}{T_P}, \quad (4.17)$$

$$K_{\text{Ф}} = \frac{T_{\text{Ф}}}{T_P}. \quad (4.18).$$

Затем определяем общий коэффициент изменения температуры K :

$$K = \frac{K_{\text{Э}} + K_M + K_{\text{Ф}}}{3}. \quad (4.19)$$

Значение K поступает в регулятор электродов, затем управляющий сигнал передается на привод электрододержателя.

Если текущее значение времени плавки больше либо равно 45 минутам, то дополнительно измеряется температура стали при погружении в ванну датчика – термопары. ЭДС термопары преобразуется в температуру и выдается оператору. Точность датчика – $\pm 3^{\circ}\text{C}$, а точность измерительного преобразователя $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Термопары типа платина/платина-10%родий пригодны для измерения температур до 1760°C . Для измерения более высоких температур (до 1820°C) должны применяться термопары типа платина-10%родий/платина-13%родий).

Температуру не следует измерять до тех пор, пока не будут достигнуты условия плоской ванны или не будет подведена определенная энергия для расплавления. Температура измеряется оператором вручную. После этого измеренное однократно значение температуры ($T_{\text{мет1}}$) передается в контроллер. Сравнивается $T_{\text{М}}$ и $T_{\text{мет1}}$. Если $T_{\text{М}}$ больше $T_{\text{мет1}}$, то выбирает $K_{\text{М}}$ больше 1, иначе $K_{\text{М}}$ меньше 1. Выбор значения $K_{\text{М}}$ производится из ранее рассчитанных $K_{\text{М}}$. Значение $K_{\text{М}}$ передается в регулятор электродов, затем управляющий сигнал передается на привод электрододержателя.

Для апробации алгоритма использовали данные, полученные в ходе лабораторных исследований (рис. 4.10 и 4.11). Из графиков следует, что рассогласование между расчётными значениями температуры металла ($T_{\text{р}}$) и футеровки ($T_{\text{фр}}$) в ходе плавки и полученными в лабораторном эксперименте значениями температуры металла ($T_{\text{и}}$) и футеровки ($T_{\text{фи}}$) минимально. Доказано, что работа данного алгоритма является эффективной, а модель работает адекватно [42, 43, 97, 98, 100, 101].

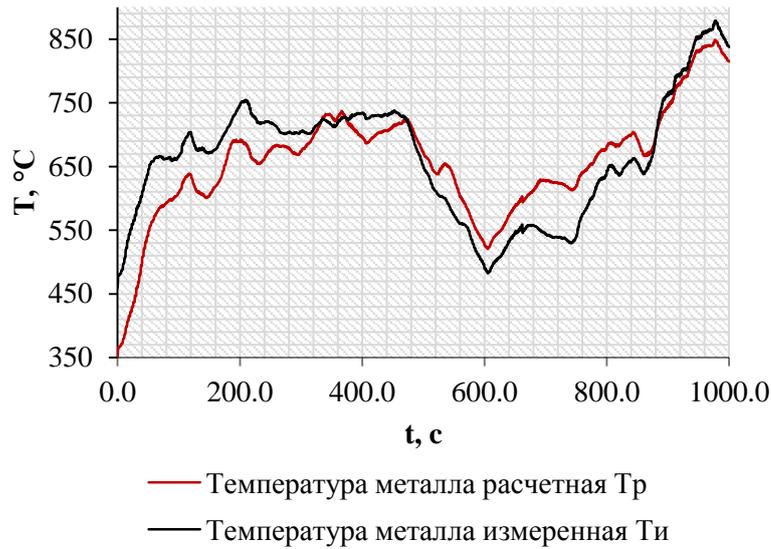


Рисунок 4.10 – График изменения температуры металла в ходе плавки

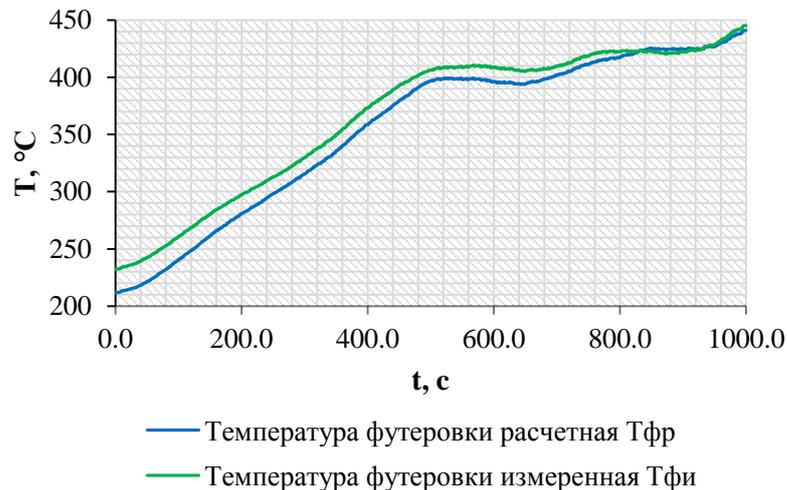


Рисунок 4.11 – График изменения температуры футеровки в ходе плавки

Для реализации данного способа предложено в существующую на предприятии SCADA-систему добавить следующие параметры: начальные значения температуры ванны печи, температура в стенке печи, температура под электродами, температура металла (расплава). Это позволит улучшить управление тепловым состоянием ДСП и за счет расширения информационного потока оптимизировать существующие параметры до более узких значений [97]. Проект внедрения новых параметров в действующую SCADA-систему представлен на рисунках 4.12-4.13.

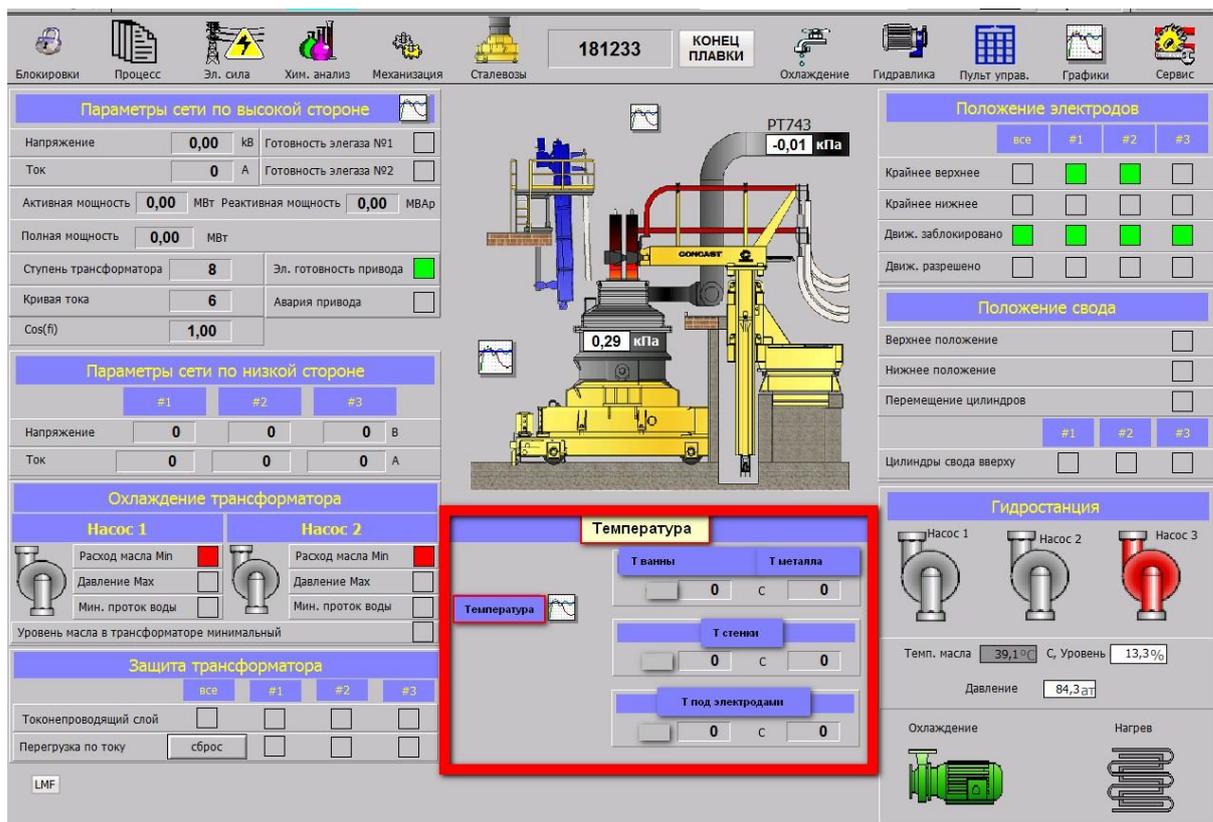


Рисунок 4.12 – Проект внедрения новых параметров в действующую SCADA-систему

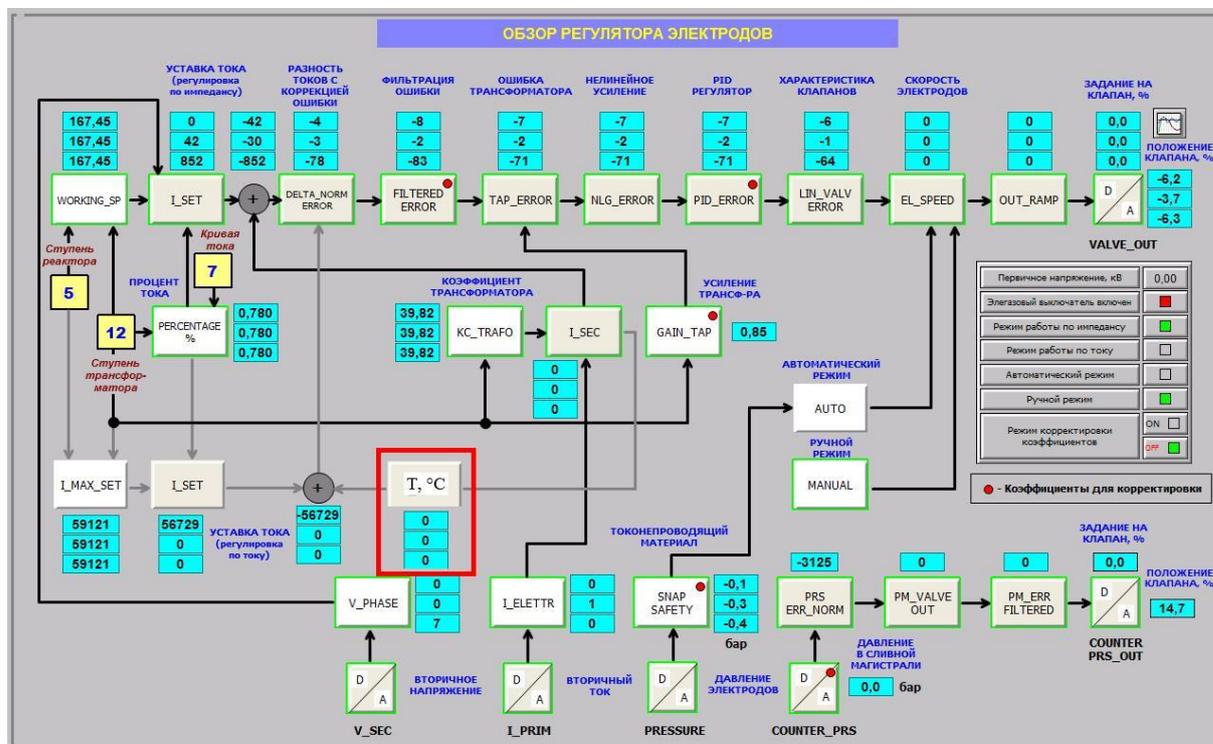


Рисунок 4.13 – Проект внедрения новых параметров в действующую SCADA-систему (в регулятор электродов)

Таким образом, SCADA-система после внедрения новых параметров станет более информативной для оператора, что позволит тщательнее контролировать процесс плавки и при необходимости вносить корректировки.

4.3 Моделирование процесса плавки металлолома в ДСП

В настоящее время одним из основных методов исследования стал метод математического моделирования. В основу этого метода положено понятие о математической модели процесса.

Процесс выплавки стали в ДСП можно описать уравнением теплового баланса, полученного на основе данных [6, 9, 16,18, 20, 24, 27, 30]:

$$\sum_{i=1}^1 Q_{\text{прихода}} = \sum_{i=1}^2 Q_{\text{расхода}}, \quad (4.20)$$

$$\sum_{i=1}^1 Q_{\text{прихода}} = P \quad (\text{так как используются мгновенные значения}) \quad (4.21)$$

$$\sum_{i=1}^2 Q_{\text{расхода}} = Q_{\text{нагрев металла}} + P_{\text{потери}}, \quad (4.22)$$

$$Q_{\text{нагрев металла}} = C_m \cdot M_m \cdot T, \quad (4.23)$$

$$P_{\text{потери}} = P_{\text{с.т.}} + P_{\text{свод}} + P_{\text{о.г.}} + P_{\text{к}}, \quad (4.24)$$

где P – мощность, используемая для нагрева, Вт;

$Q_{\text{нагрев металла}}$ – физическое тепло, расходуемое на нагрев металла, Дж;

$P_{\text{потери}}$ – потери теплоты, Дж;

C_m – средняя удельная теплоемкость металла, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;

M_m – масса металла, кг;

T – температура вещества, °С;

$P_{\text{с.т.}}$ – потери тепла на резисторное сопротивление трансформатора и короткой цепи, Дж;

$P_{\text{свод}}$ – потери тепла с охлаждающей водой (свод-крышка), Дж;

$P_{\text{о.г.}}$ – потери тепла с отходящими газами, Дж;

$P_{\text{к}}$ – потери тепла на нагрев футеровки, Дж,

t – время, с.

При средних значениях силы тока напряжение на дуге не зависит от силы тока, так как сечение столба дуги увеличивается пропорционально силе тока, из этого следует, что напряжение на дуге зависит только от длины дуги.

Приближенно напряжение горячей дуги выражается следующей формулой [32]:

$$U_{\delta} = a + b \cdot L, \quad (4.25)$$

где U_{δ} – напряжение дуги, В;

a – постоянный коэффициент, который выражает сумму падений напряжений на катоде и аноде дуги, не зависящий от длины дуги (для ДСП емкостью 80-100 т коэффициент $a = 50$ [32]);

b – среднее падение напряжения на единицу длины дуги, В/мм (при обработке экспериментальных данных для дуговых установок емкостью 80-100 т были определены зависимости коэффициента b от рабочих длин дуг L при номинальных режимах в виде графиков [32];

L – длина дуги, мм.

Для определения мощности электрической дуги на одном электроде используем формулу активной мощности со стороны низкого напряжения питающего трансформатора [31]:

$$P_{\delta} = U \cdot I \cdot \cos(\varphi), \quad (4.26)$$

где U – напряжение трансформатора, В;

I – сила тока трансформатора, А

$\cos(\varphi)$ – коэффициент мощности (для печи ДСП-90 $\cos(\varphi)=0.8$) [8, 45, 49];

Так как электродная свеча состоит из трех электродов, тогда полная мощность будет равна

$$P = 3 \cdot P_{\delta}. \quad (4.27)$$

Обобщенную модель объекта запишем следующей формулой

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{M_m \cdot C_m} \cdot (P - P_{\text{потери}}). \quad (4.28)$$

Тогда конечная формула для моделирования теплового состояния печи выглядит следующим образом:

$$T = \int_0^t \left(\frac{3 \cdot I \cdot (a + b \cdot L) \cdot \cos(\varphi) - P_{\text{номеру}}}{M_m \cdot C_m} \right) dt + T_{\text{нач}}, \quad (4.29)$$

где $T_{\text{нач}}$ – температура в ДСП в начальный момент времени.

Допущения модели теплового состояния печи ДСП-90 представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Допущения модели теплового состояния печи ДСП-90

№ п/п	Допущения
1	Не учитывается температура окружающей среды.
2	Управление производится всей электродной свечой одновременно, а не отдельно каждым электродом.
3	Отсутствует система зажигания дуги.
4	Потери теплоты в модели обозначены одним коэффициентом, зависящим от периода выплавки стали.
5	Ток дуги, используемый в модели, равен току, выдаваемому с трансформатора.
6	Мощность модели равна активной составляющей мощности трансформатора, не учитывается реактивная составляющая, возникающая из-за катушек индуктивности в трансформаторе.
7	Не учитывается сопротивление короткой сети, сопротивление в модели равно сопротивлению дуги.
8	Не учитывается возможность возникновения короткого замыкания в цепи.

Необходимо отметить, что данная модель используется для изучения влияния главных параметров (воздействий) на температуру системы, так как основные физические законы процессов, происходящих в объекте, учтены.

Для имитации процесса выплавки стали в ДСП составлена модель процесса в программной среде Matlab (рисунок 4.14).

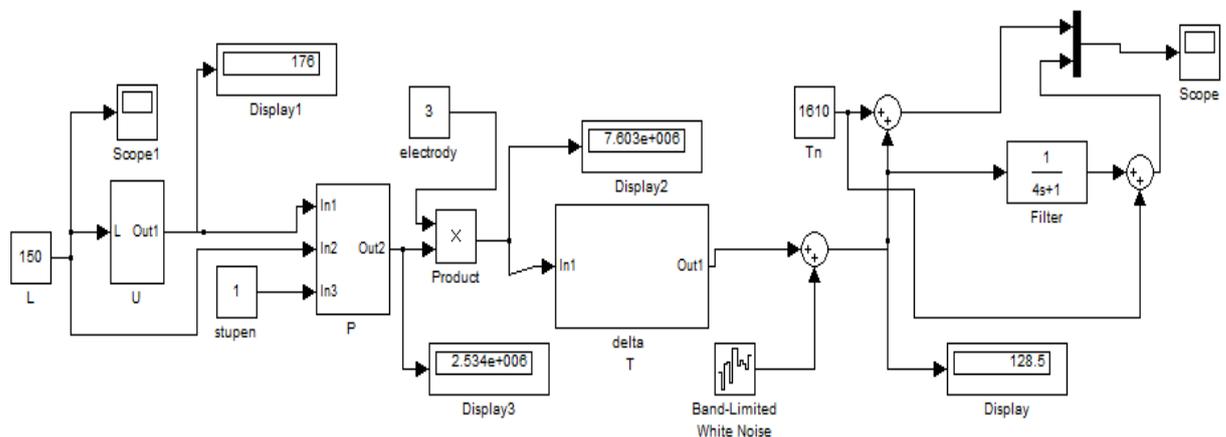


Рисунок 4.14 – Модель объекта управления

Модель объекта управления включает в себя подсистемы, вычисляющие значения напряжения электрической дуги, исходя из длины дуги; мощности дуги, используя значение напряжения дуги, значение тока дуги и значение коэффициента мощности установки; учитывая количество электродов в ДСП (3), температуры в ДСП, вычисляя ее из значения мощности дуги, учитывая потери теплоты в процессе плавки, массу металла и его теплоемкость, а также начальную температуру металла в печи. Для моделирования электрических шумов термопары используется блок Band-Limited White Noise. Для устранения электрических шумов термопары используется сглаживающий фильтр в виде апериодического звена первого порядка.

Подсистема для определения напряжения дуги представлена на рисунке 4.15.

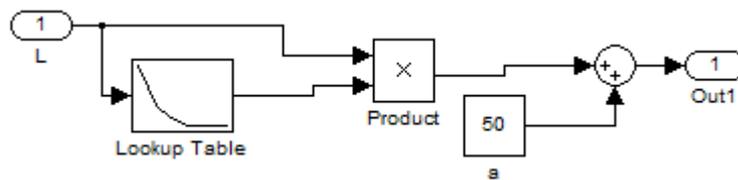


Рисунок 4.15 – Подсистема, моделирующая зависимость напряжения от длины дуги

На вход данной подсистемы (рисунок 4.15) поступает значение длины дуги (L). При помощи блока Lookup Table по графику зависимости среднего падения напряжения на единицу длины дуги от длины дуги вычисляется значение коэффициента b (среднее падение напряжения на единицу длины дуги) согласно поступившему значению L . Далее L и b перемножаются и суммируются со значением коэффициента a (постоянный коэффициент, который выражает сумму падений напряжений на катоде и аноде дуги, не зависящий от длины дуги). В результате на выход подсистемы подается значение напряжения электрической дуги [92, 93, 94, 102, 103].

Зависимость среднего падения напряжения на единицу длины дуги от длины дуги представлена на рисунке 4.16. По оси абсцисс – длина дуги, мм, по оси ординат – среднее падение напряжения на единицу длины дуги, В/мм.

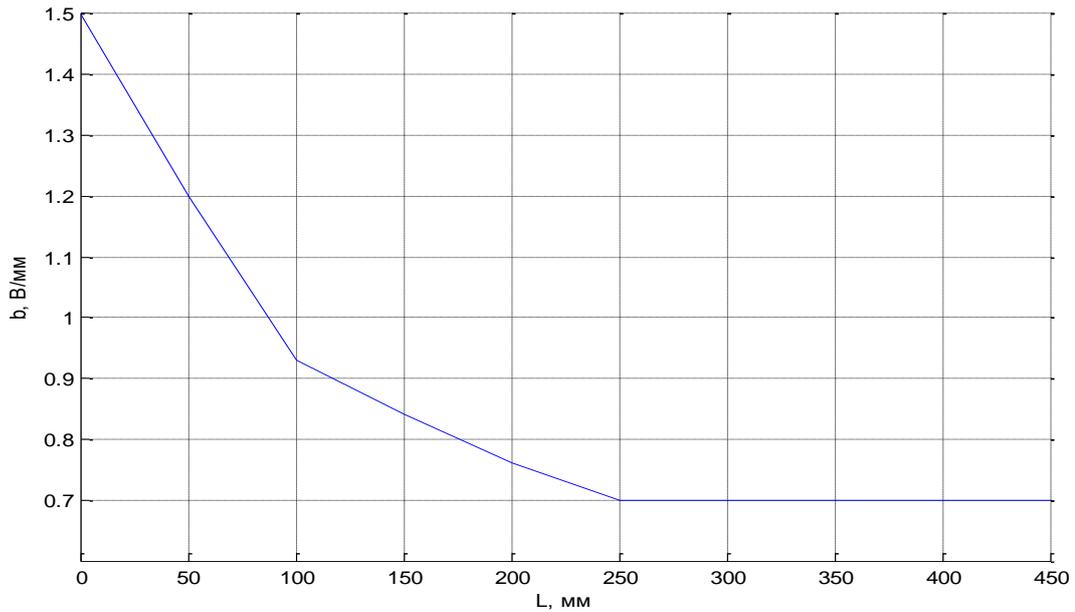


Рисунок 4.16 – Зависимость среднего падения напряжения на единицу длины дуги от длины дуги

Подсистема для определения мощности дуги представлена на рисунке 4.17.

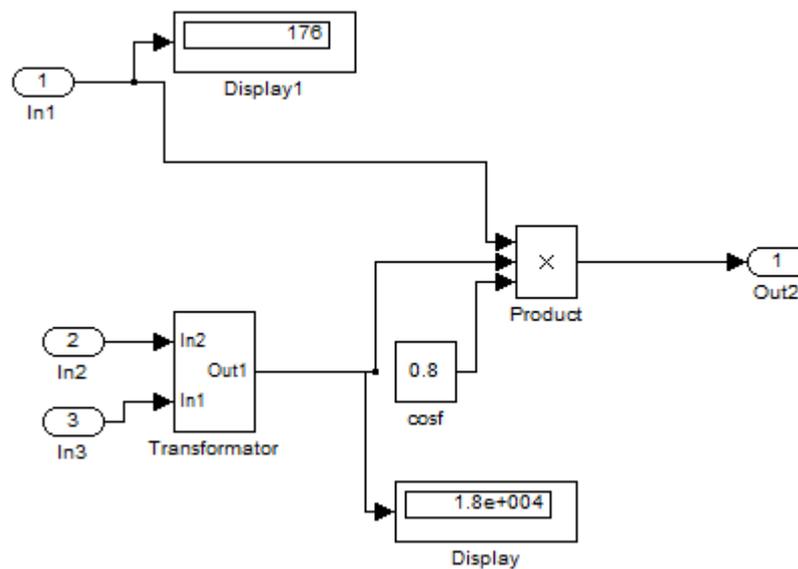


Рисунок 4.17 – Подсистема, моделирующая мощность дуги

На вход подсистемы In1 (рисунок 4.17) поступает напряжение дуги. На вход In2 – длина дуги, In3 – время. В блоке Transformer, в зависимости от поступившего значения длины дуги с помощью блока Lookup Table по графику зависимости тока (I) от длины дуги с учетом периода плавки (времени) определяется значение тока электрической дуги (равное значению тока, выдаваемому с трансформатора). Учитывая коэффициент мощности дуги, на выходе подсистемы получаем

значение мощности дуги. Подсистема, вычисляющая ток электрической дуги, представлена на рисунке 4.18.

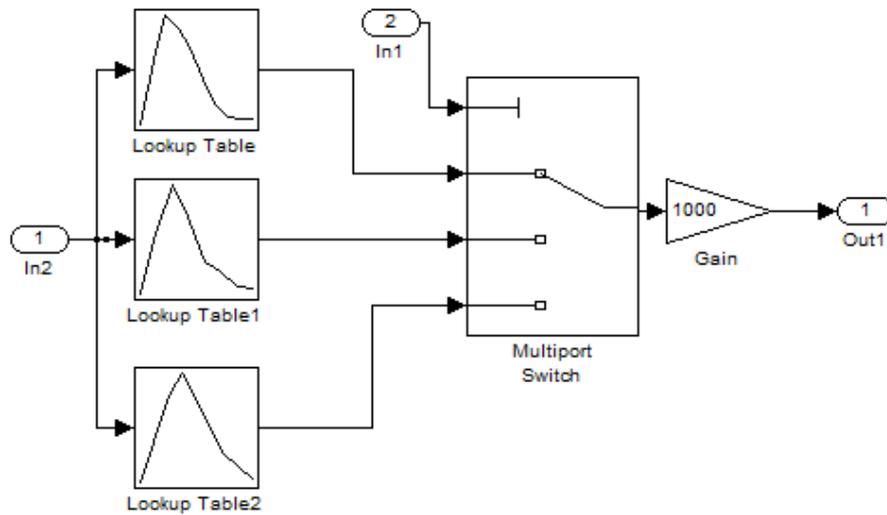


Рисунок 4.18 – Подсистема, моделирующая ток электрической дуги

Каждой ступени трансформатора соответствует своя кривая по току (рисунок 4.18.). Кривые по току получены на основе практических данных [32]. Переключение ступеней трансформатора осуществляется в зависимости от периода плавки стали. В начальный период (0-30 минут) трансформатор работает на 1 ступени (самой мощной). В период от 30 до 45 минут – на 2 ступени трансформатора. В период с 45 минуты и до конца плавки – на 3 ступени трансформатора (самой слабой). Кривые по току для трех ступеней трансформатора представлены на рисунках 4.19, 4.20 и 4.21. По оси абсцисс откладывается значение длины дуги L , мм, по оси ординат – ток электрической дуги, кА.

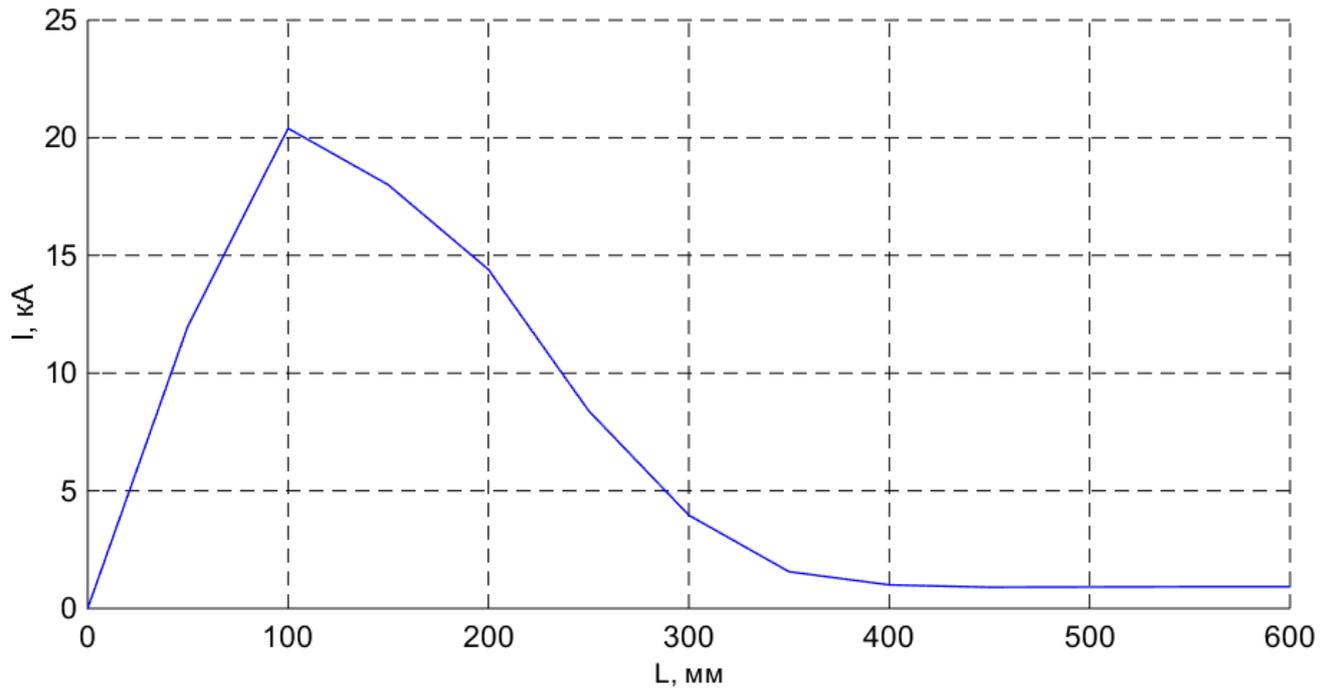


Рисунок 4.19 – Зависимость по току, соответствующая первой ступени трансформатора

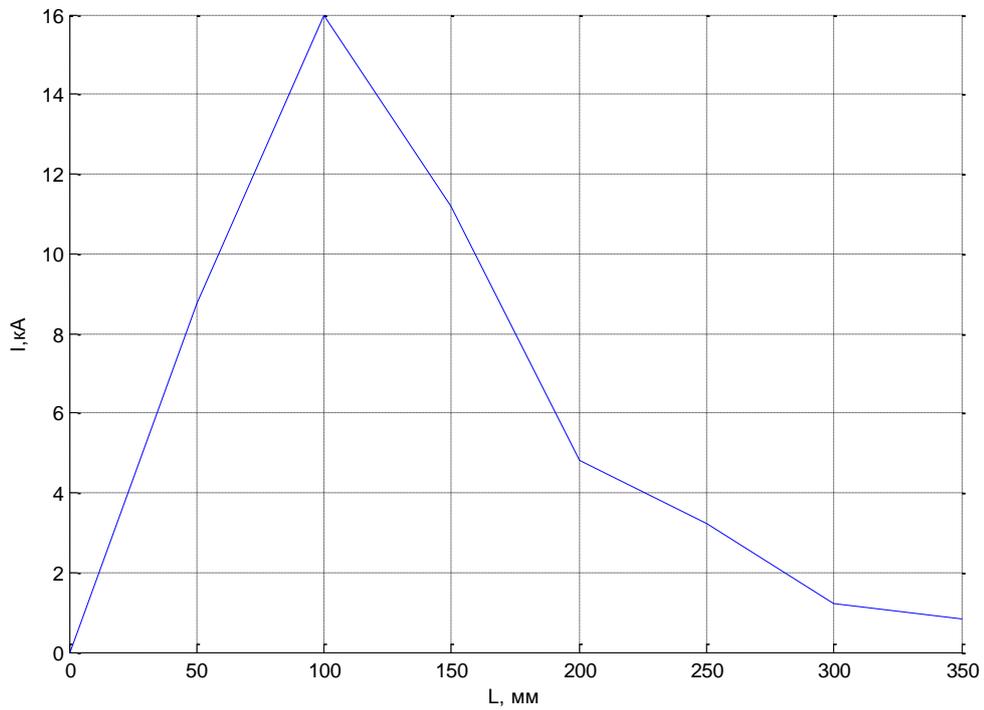


Рисунок 4.20 – Зависимость по току, соответствующая второй ступени трансформатора

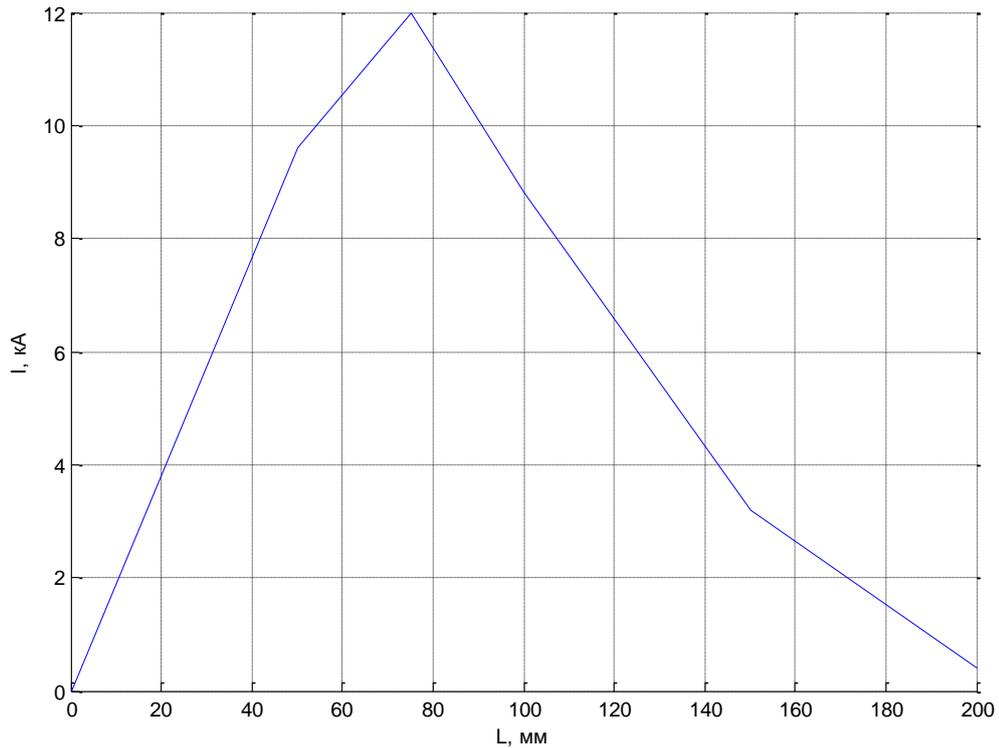


Рисунок 4.21 – Зависимость по току, соответствующая третьей ступени трансформатора

Подсистема, позволяющая получить значение изменения температуры стали в ДСП, представлена на рисунке 4.22.

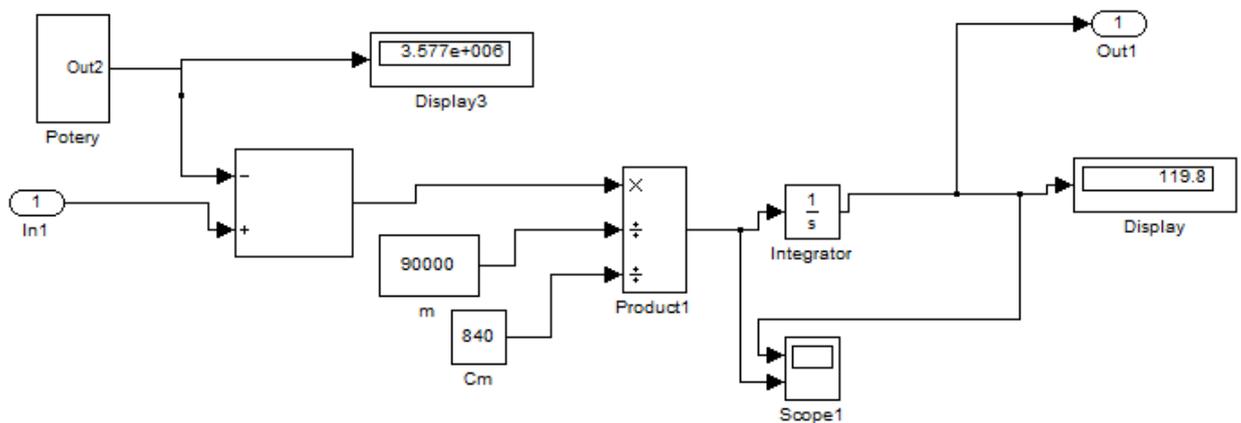


Рисунок 4.22 – Подсистема модели изменения температуры стали в ДСП

На вход подсистемы In1 (рисунок 4.22) поступает значение количества теплоты, полученное исходя из мощности электрической дуги. Учитывая потери теплоты, массу и теплоемкость металла, интегрируем полученное значение. В ре-

зультате на выход подсистемы подается значение изменения температуры стали в ДСП за 1 с.

Потери теплоты зависят от периода плавки стали в ДСП. На основе экспериментальных данных была выявлена следующая зависимость [32]:

$$P_{\text{потери}} = -1.66 \cdot t^2 + 4451 \cdot t + 7.5 \cdot 10^5. \quad (4.30)$$

Подсистема, имитирующая потери теплоты в процессе выплавки стали в ДСП реализована по формуле (4.30) и приведена на рисунке 4.23.

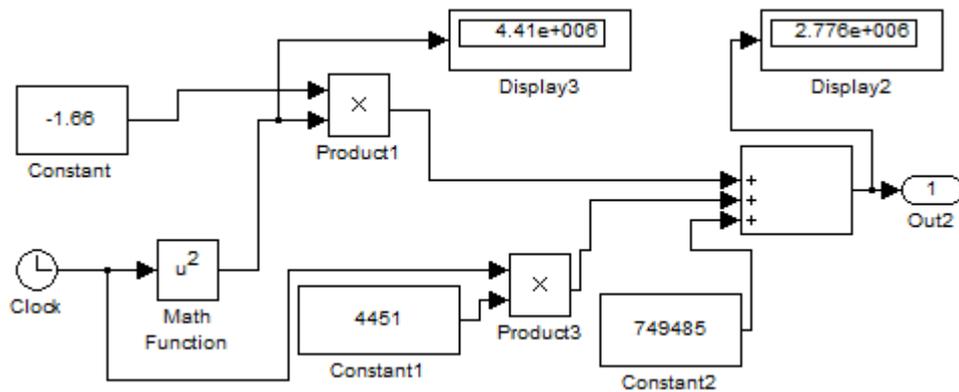


Рисунок 4.23 – Подсистема, моделирующая потери теплоты в зависимости от периода плавки

В результате работы модели ДСП получили данные об изменении температуры расплава за весь период плавки (рисунок 4.24). Здесь по оси абсцисс отложено время в секундах (с), по оси ординат – температура в ДСП в градусах Цельсия (°C).

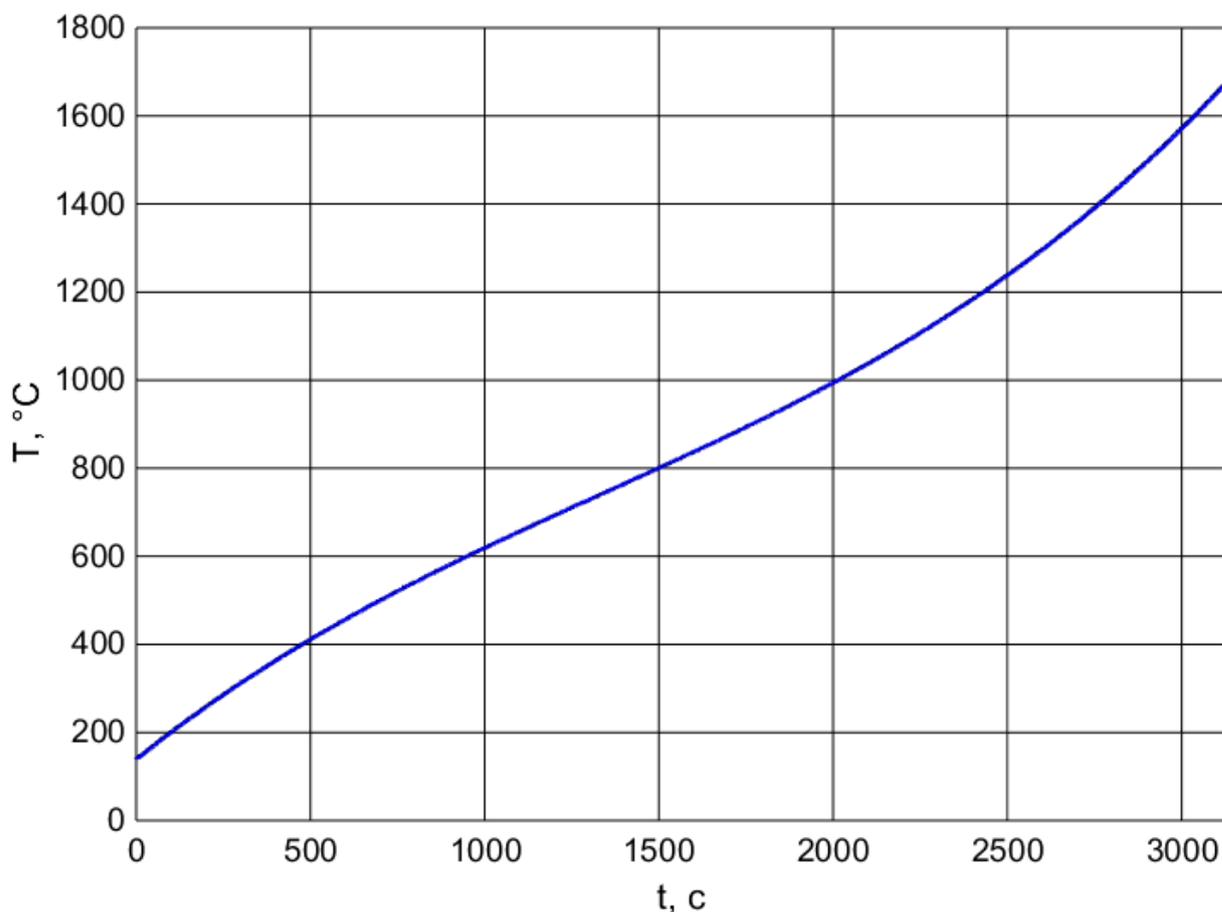


Рисунок 4.24 – Изменение температуры за период плавки в ДСП

Таким образом, за весь период плавки температура в дуговой сталеплавильной печи ДСП-90 изменяется от 100 °C при загрузке шихтовых материалов до 1650 °C в периоды расплавления и выливки. Такой диапазон распределения температур негативно сказывается на сроке службы футеровочных материалов и конструктивных элементов печи.

Представленная модель теплового состояния печи показывает изменение температуры металла в печи ДСП-90 в течение плавки длительностью 52 минуты. Адекватность модели проверена на архивных данных, полученных при проведении промышленного эксперимента на действующем металлургическом предприятии ООО «Ростовский электрометаллургический завод». Поэтому применение данной модели для разработки адаптивной системы управления дуговой сталеплавильной печью является обоснованным.

4.4 Предложенная система управления дуговой сталеплавильной печью

В автоматических системах управления нестационарными объектами для обеспечения заданного качества регулирования в процессе работы АСУ производится целенаправленное изменение динамических свойств регулирующего устройства таким образом, чтобы изменения свойств объекта управления были компенсированы [11, 13, 44]. Эффективным способом решения данной проблемы является применение алгоритмов адаптации регулятора, то есть изменение параметров регулятора при изменении свойств объекта. На рисунке 4.25 представлена структурная схема адаптивной АСУ ТП.

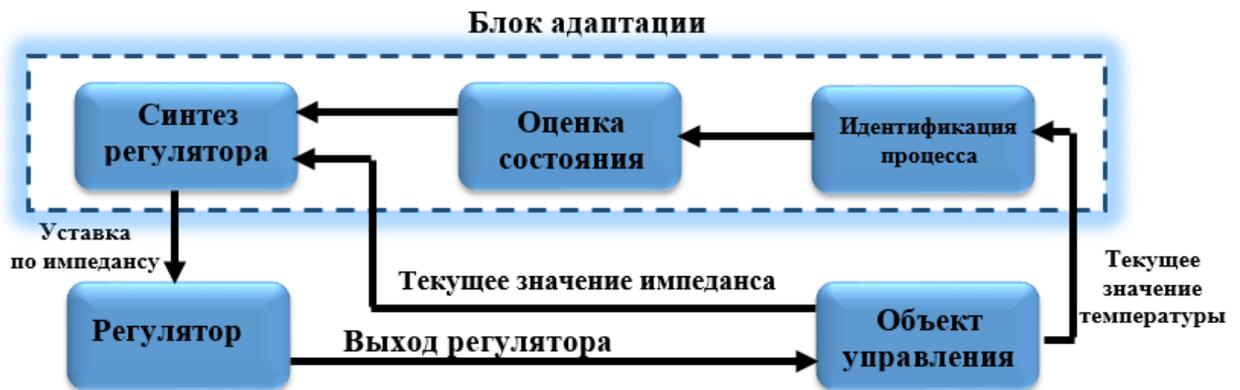


Рисунок 4.25 – Структурная схема адаптивной АСУ температурой ДСП

В работе представлены результаты исследования свойств системы автоматического управления температурой дуговой сталеплавильной печи, реализованной на основе ПИД-регулятора и блока адаптации.

Блок адаптации в данном случае разработан на основе алгоритма для контроля параметров ДСП (рисунок 4.9). В соответствии с алгоритмом определяется корректировочный коэффициент. Далее по таблице соответствия выбирается импеданс для уставки регулятору.

Модель разработанной системы управления была реализована в среде Simulink программного пакета Matlab 2014b.

Блок адаптации представлен на рисунке 4.26.

Электрический контур в модели дуговой сталеплавильной печи реализован следующим образом.

Объектом регулирования является электрический контур ДСП. Входной параметр – длина дуги $L_{ARC}(t)$ преобразуется в обратную ЭДС по выражению [18]:

$$E_{ARC}(t) = \alpha + \beta \cdot L_{ARC}(t) \quad (4.31)$$

где α – падение напряжения в приэлектродных областях анода и катода (для печей переменного тока $\alpha = 40$ В);

β – градиент напряжения (для сильноточной дуги переменного тока $\beta \approx 1$ В/мм).

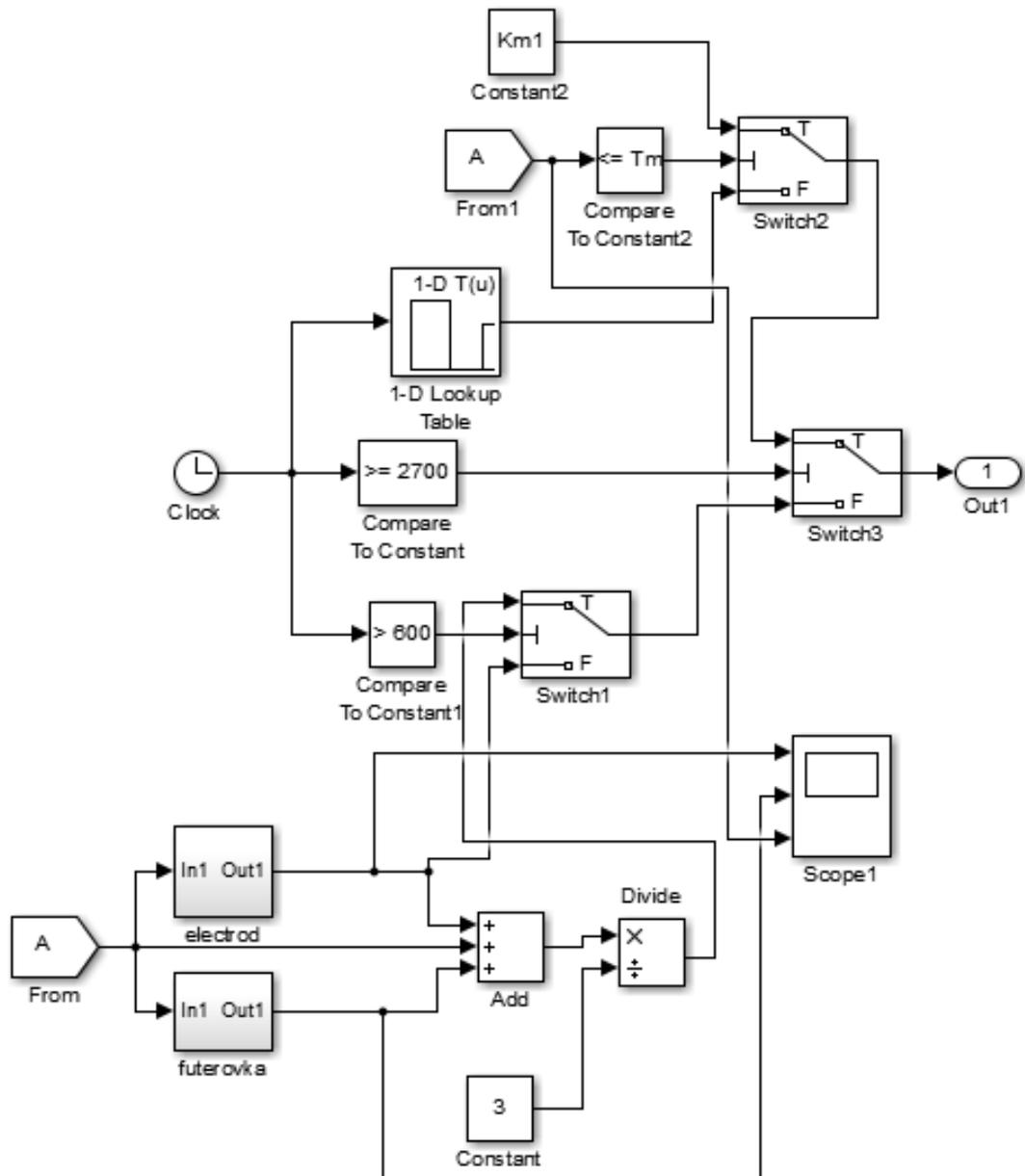


Рисунок 4.26 – Блок адаптации, реализованный в среде Simulink

Значение противо-ЭДС дуги является одним из входных параметров нелинейного дифференциального уравнения Касси, которое описывает изменение мгновенной проводимости электрической дуги $g_{ARC}(t)$:

$$\theta_{ARC} \frac{dg_{ARC}(t)}{dt} = \left(\frac{u_{ARC}^2(t)}{E_{ARC}^2(t)} - 1 \right) \cdot g_{ARC}(t) \quad (4.32)$$

где $u_{ARC}(t)$ – мгновенное напряжение на дуге;

$g_{ARC}(t)$ – мгновенная проводимость дуги, См;

θ_{ARC} – тепловая постоянная времени дуги, в зависимости от стадии плавки принимает значение от 0.1 до 5 мс.

Мгновенное напряжение на дуге $u_{ARC}(t)$ определяется на основе второго закона Кирхгофа для электрического контура ДСП:

$$u_{ARC}(t) = u'_s(t) - i_{ARC}(t)R_{SUM} - L_{SUM} \frac{di_{ARC}(t)}{dt} \quad (4.33)$$

где $u'_s(t)$ – приведенное к вторичной обмотке трансформатора фазное напряжение питающей сети;

$i_{ARC}(t)$ – мгновенное значение тока электрической дуги;

$R_{SUM} = R_2 + R'_{TR}$ и $L_{SUM} = L_2 + L'_{TR}$ – суммарные значения активного сопротивления и индуктивности электрического контура электропечной установки;

R'_{TR} , L'_{TR} – приведенные к стороне низкого напряжения активные сопротивления и индуктивности трансформатора.

После этого на основе известных значений $u_{ARC}(t)$ и $g_{ARC}(t)$ рассчитывается мгновенный ток электрической дуги:

$$i_{ARC}(t) = u_{ARC}(t) \cdot g_{ARC}(t) \quad (4.34)$$

Для расчета фактического значения импеданса фазы ДСП Z_{ACT} на вторичной стороне трансформатора дополнительно определяется мгновенное значение фазного напряжения $u_2(t)$:

$$u_2(t) = u'_s(t) - i_{ARC}(t)R_2 - L_2 \frac{di_{ARC}(t)}{dt} \quad (4.35)$$

где R_2 и L_2 – активное сопротивление и индуктивность короткой сети и электрода ДСП [15, 72, 73].

Необходимо отметить, что ДСП имеет гидравлический привод для перемещения электродной свечи, поэтому модель гидропривода может быть упрощенно представлена в виде последовательного соединения двух апериодических звеньев первого порядка сервоклапана и гидроцилиндра, а также интегрирующего звена. Динамическое запаздывание клапана, которое появляется при изменении управляющего воздействия, учтено при помощи апериодического звена сервоклапана. Инерционные свойства гидроцилиндра и магистрали представлены апериодическим звеном гидроцилиндра. Преобразование скорости в перемещение производит интегрирующее звено. Длина дуги $L_{ARC(t)}$ является выходным параметром модели гидропривода. Модель гидропривода в среде Simulink программного пакета Matlab 2014b представлена на рисунке 4.27.

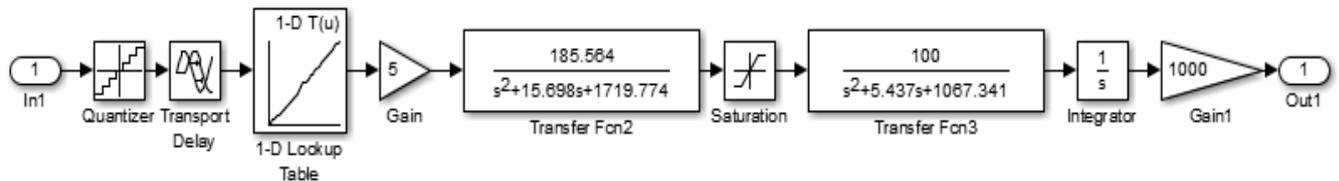


Рисунок 4.27 – Модель гидропривода в среде Simulink программного пакета Matlab 2014b

Длина дуги $L_{ARC(t)}$ подается на модель электрического контура ДСП. В нем происходит преобразование в противо-ЭДС по выражению (4.31). Изменение мгновенной проводимости электрической дуги $g_{ARC(t)}$ вычисляется по формуле (4.32). Мгновенное напряжение на дуге $u_{ARC(t)}$ определяется на основе второго закона Кирхгофа для электрического контура ДСП (4.33). Затем на основе известных значений $u_{ARC(t)}$ и $g_{ARC(t)}$ рассчитывается мгновенный ток электрической дуги (4.34). На вторичной обмотке трансформатора дополнительно определяется мгновенное значение фазного напряжения $u_2(t)$ и фактическое значение импеданса фазы ДСП Z_{ACT} (4.35) [15, 95, 96, 104]. Модель электрического контура ДСП в среде Simulink программного пакета Matlab 2014b представлена на рисунке 4.28.

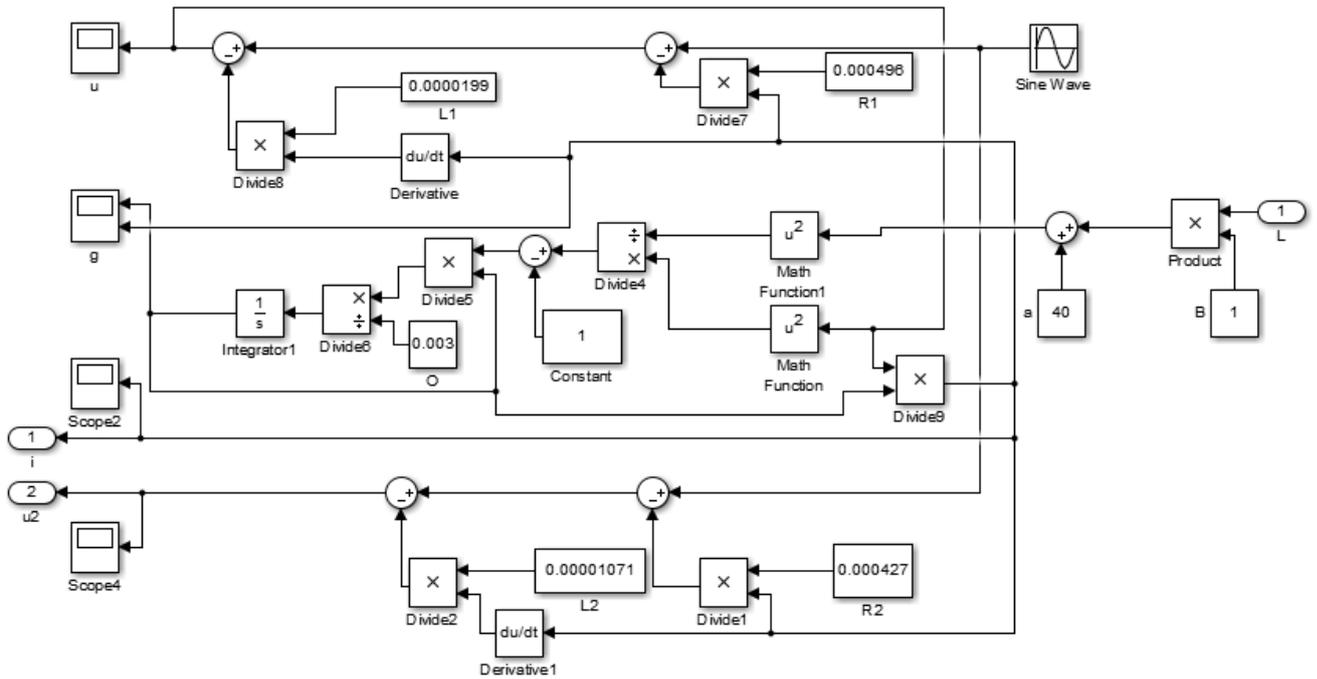


Рисунок 4.28 – Модель электрического контура ДСП в среде Simulink программного пакета Matlab 2014b

Для вычисления импеданса фазы ДСП Z_2 используются блоки RMS, в которых по рассчитанным мгновенным значениям $i_{ARC}(t)$ и $u_2(t)$ определяются действующие значения I_{ARC} и U_2 . Расчет импеданса фазы ДСП в среде Simulink программного пакета Matlab 2014b представлен на рисунке 4.29.

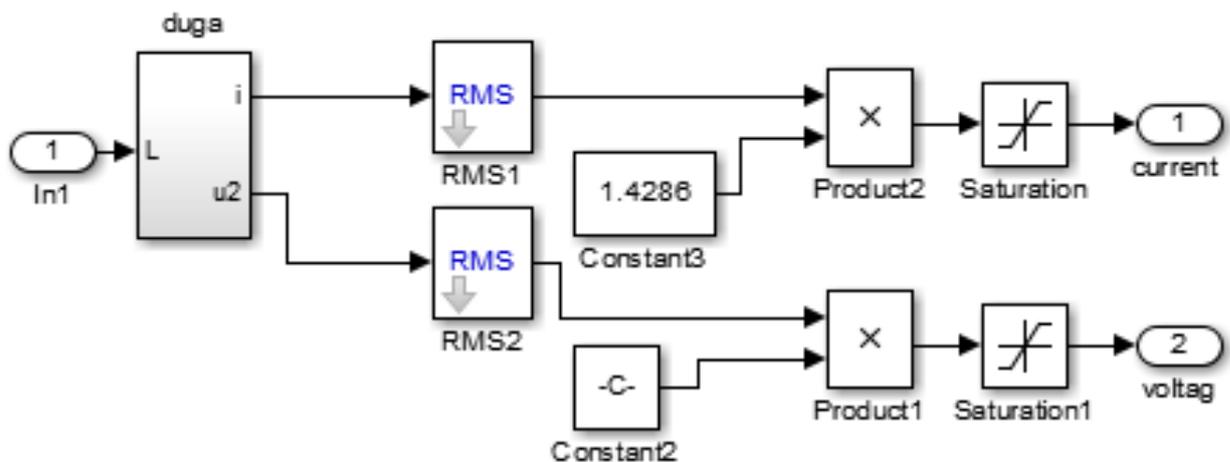


Рисунок 4.29 – Расчет импеданса фазы ДСП

На рисунке 4.30 представлена адаптивная АСУ ТП в ДСП, разработанная в среде Simulink.

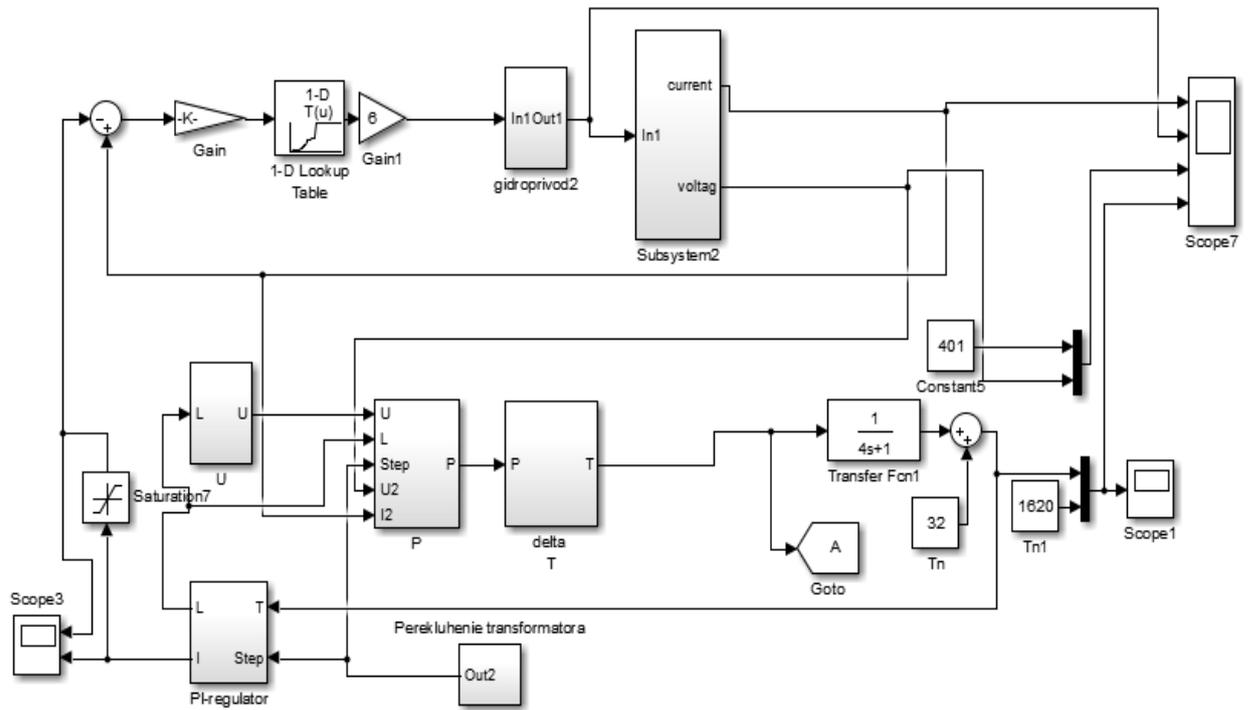


Рисунок 4.30 – АСУ ТП в ДСП

Таким образом, в системе управления регулирование положения электродов происходит по расчетному импедансу. Задающим для регулятора служит выходной сигнал блока адаптации. Регулятор АСУ ДСП представлен на рисунке 4.31.

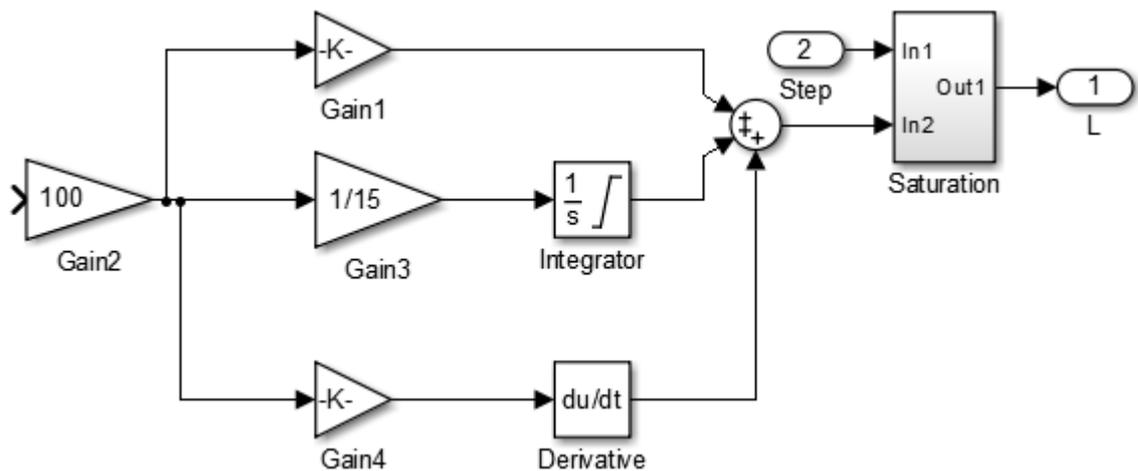


Рисунок 4.31 – Регулятор АСУ ДСП

Результаты работы АСУ ТП в ДСП представлены на рисунках 4.32-4.34. Из представленных графиков видно, что в момент скачков тока изменяется и длина дуги, следовательно, регулятор справляется с поставленной задачей. Температура изменяется плавно, без резких скачков, что позволяет равномерно прогреваться конструктивным элементам печи. Перерегулирование составляет

$$y = \frac{y_{\max} - y_{\text{уст}}}{y_{\text{уст}}} \cdot 100\% = \frac{1622 - 1620}{1620} \cdot 100\% = 0.1\% , \text{ что является незначительной величиной,}$$

которая меньше погрешности прибора (2.5 °С).

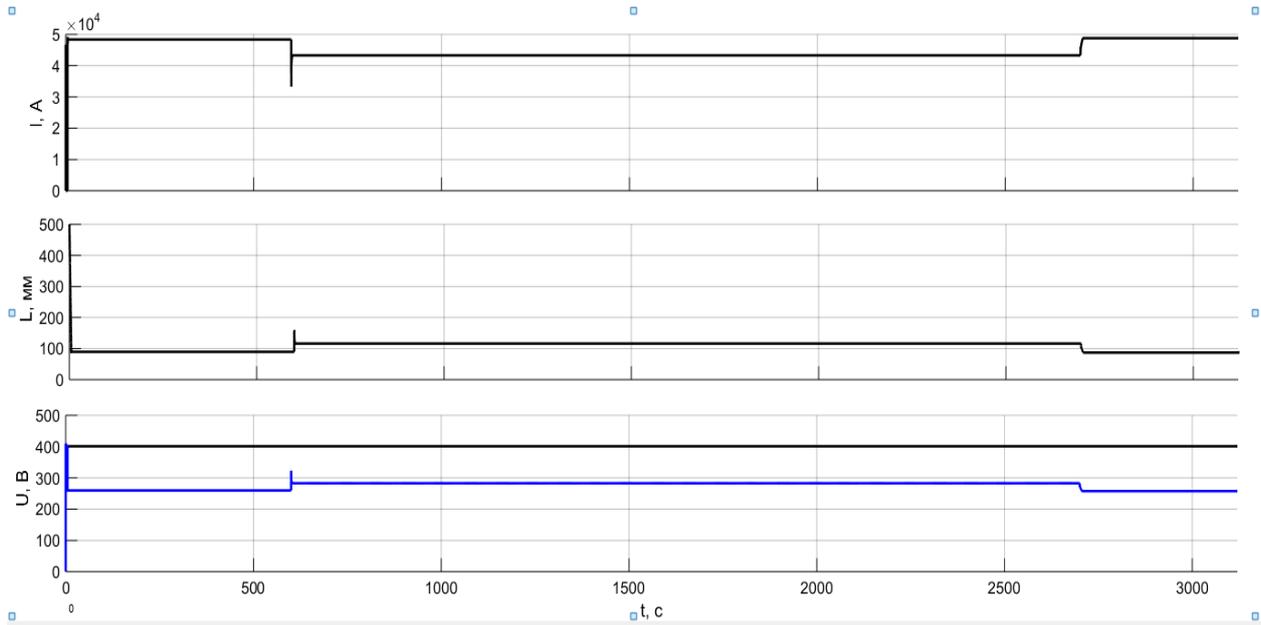


Рисунок 4.32 – Результаты работы АСУ ТП в ДСП

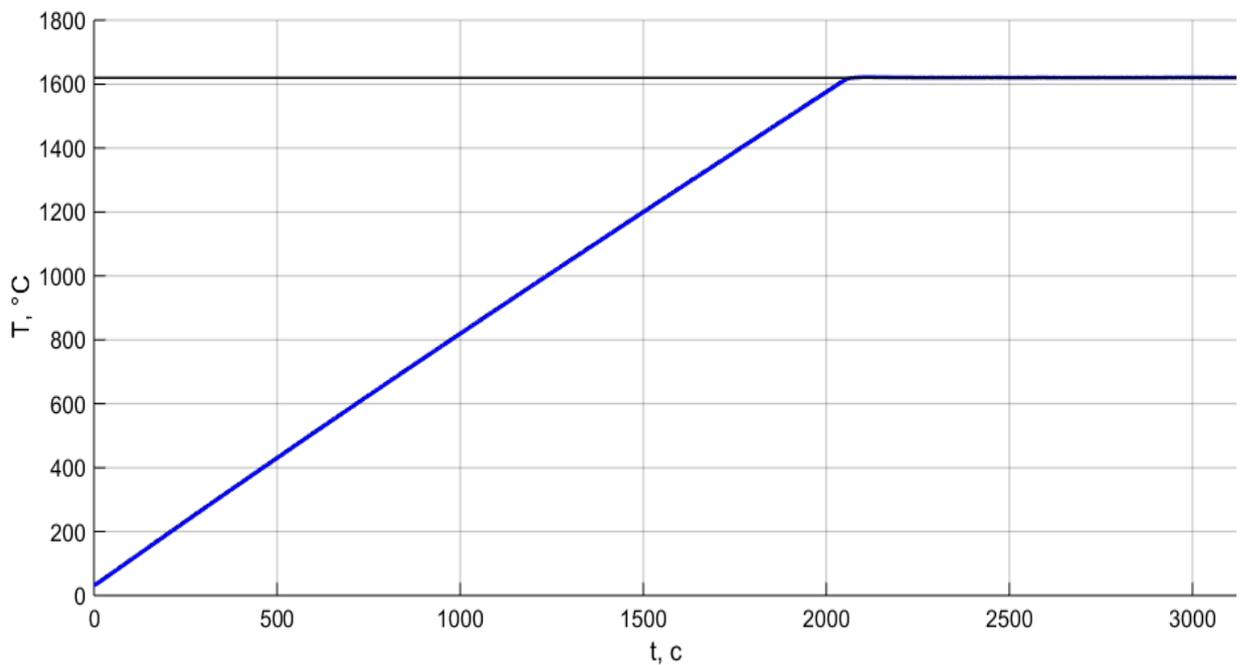


Рисунок 4.33 – Результаты работы АСУ ТП в ДСП (температура)

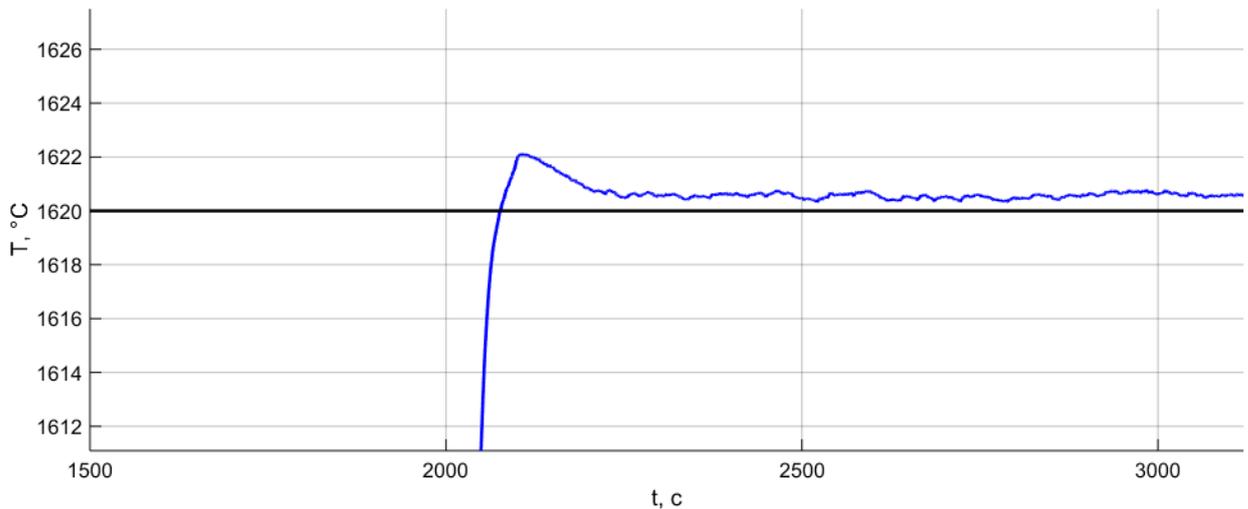


Рисунок 4.34 – Результаты работы АСУ ТП в ДСП (температура), более крупный масштаб для наглядности перерегулирования

Таким образом, изменение величины дуги от 100 до 600 мм в соотношении с адаптивной величиной температуры футеровки и электродов через встроенные термопары зависит от результатов расчетной математической модели теплового поля дуговой сталеплавильной печи при расширении дополнительных функций управления АСУ ТП.

Система автоматизации технологических процессов и агрегатов позволит создать полностью автоматизированные производственно-технологические комплексы по выпуску высококачественной стали, ее доводке и разливке с последующим производством готовой продукции на мелкосортно-проволочном стане.

Таким образом, создание единого информационного пространства в результате максимально возможной автоматизации технологических процессов, представление в цифровом виде заданных и получаемых параметров производства позволит упорядочить информационные потоки, предоставить оперативному и управленческому персоналу эффективный доступ к данным всех уровней для принятия мотивированных управленческих решений.

4.5 Экономическая эффективность предлагаемого решения по автоматизации ДСП

4.5.1 Расчёт себестоимости продукции цеха по выплавке стали

Себестоимость выпускаемой продукции определяется на основании произведённых сырьевых и топливно-энергетических затрат, расходов на содержание и эксплуатацию оборудования и цеховых расходов. Для определения себестоимости продукции составляется калькуляция (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Калькуляция себестоимости продукции

Статьи расхода	Ед. изм.	Цена за ед., руб.	Фактическая		По проекту	
			Кол-во	Сумма, тыс. руб.	Кол-во	Сумма, тыс. руб.
1	2	3	4	5	6	7
I. Сырье, материалы и полуфабрикаты						
Лом стальной	т	7000	831000	5817000.0	831000	5817000.0
Ферросплавы	т	85000	10500	892500.00	10500	892500.00
Порошковая проволока	т	240000	750	180000.00	750	180000.00
Известь	т	1768	33750	59670.00	33750	59670.00
Кокс, коксик	т	23230	11250	261337.50	11250	261337.50
Плавиновый шпат	т	6100	750	4575.00	750	4575.00
Огнеупоры и огнеупорные порошки и массы	т	14678	25832	379162.10	25832	379162.10
Электроды	т	58754	2260	132784.04	2260	132784.04
Итого		–	–	7727028.6	–	7727028.6
Возвратные отходы						
Электросталеплавильный шлак	т	3876.8	90500	350846.78	90500	350846.78
Отходы огнеупоров и электродов ЭСПЦ	т	4689.9	6620	31046.94	6620	31046.94
Шлам МНЛЗ	т	4000	1460	5840.00	1460	5840.00
Пыль газоочисток	т	0	9211	0.00	9211	0.00
Итого за вычетом отходов		–	–	7339294.9		7339294.9

Продолжение таблицы 4.2

II. Вспомогательные материалы						
1	2	3	4	5	6	7
Кислород	нм ³	36.5	30960000	1130040.0	30960000	1130040.0
Аргон	нм ³	147.67	520000	76788.40	520000	76788.40
Азот	нм ³	63.5	3650	231.78	3650	231.78
Итого		–	–	1207060.18	–	1207060.18
III. Энергетические затраты						
Электроэнергия	тыс. кВт час	1880	462450	869406.00	460137.75	865058.97
Природный газ	тыс. нм ³	2090	11240	23491.60	11240	23491.60
Вода свежая для подпитки	м ³	50.43	844400	42583.09	844400	42583.09
Итого		–	–	935480.69	–	931133.66
IV. Основная заработная плата	тыс. руб.	–	–	16115.17	–	16114.11
V. Дополнительная заработная плата	тыс. руб.	–	–	2432.82	–	2432.56
VI. Страховые взносы на обязательное социальное страхование	тыс. руб.	–	–	5564.40	–	5564.27
VII. Содержание оборудования	тыс. руб.	–	–	75530.98	–	75530.98
VIII. Цеховые расходы	тыс. руб.	–	–	104002.81	–	104002.81
Цеховая себестоимость	тыс. руб.	–	–	20278164.95	–	9681134.92
На 1 т продукции	тыс. руб/т	–	–	23.30823	–	12.41171

4.5.2 Расчёт экономической эффективности проекта автоматизации ДСП

Экономический эффект может быть достигнут за счет снижения расхода электроэнергии на дуговой сталеплавильной печи вследствие автоматизации управления температурным режимом ДСП. В данном случае это происходит за счет внедрения новых параметров в SCADA-систему. Технически это реализуется за счет установки дополнительного оборудования (модули аналогового ввода SM 331 6ES7331-7PF01-0AB0, датчики температуры и многожильные термоэлектродные удлинительные (компенсационные) провода). Оборудование для реализации проекта представлено в таблице 4.3.

Система управления, предложенная в работе, позволяет добиться более плавного регулирования основного параметра – температуры и нивелирует ее резкие колебания, что в конечном итоге не допускает перерасхода электроэнергии.

Таблица 4.3 – Оборудование для реализации проекта

Наименование	Количество, шт.	Цена, тыс. руб.	Всего, тыс. руб.
Модуль аналогового ввода SM 331 6ES7331-7PF01-0AB0	2	59.105	118.210
Датчик температуры ТПП-233	9	35.000	315.000
Датчик температуры ТПП-001	3	20.000	60.000
Многожильный термоэлектродный удлинительный (компенсационный) провод ПТ Scb2150ФЭФ	1200 м	0.250	300.000
Монтажные работы и пусконаладочный работы	1	200.000	200.000
Программирование	1	100.000	100.000
Всего, тыс. руб.			1093.210

Экономия энергетических затрат за счет изменения норм расхода электроэнергии [11]:

$$\mathcal{E}_H = (H_1 - H_2) \cdot C \cdot A, \quad (4.36)$$

где H_1 и H_2 – нормы расхода сырья, материалов, топлива, энергозатрат соответственно до и после внедрения мероприятия, натур. ед.; C – цена за единицу сырья,

материалов, топлива, энергозатрат, руб.; A – годовой объем выпуска продукции, натур. ед.

$$\mathcal{E}_H = (462450.00 - 460137.75) \cdot 1880 \cdot 780000 = 3390683400 \text{ тыс. руб.}$$

Экономический эффект от внедрения мероприятия составит [11]:

$$\mathcal{E}_\phi = \Delta C \cdot (1 - H_{II}), \quad (4.37)$$

где C_1 – себестоимости годового выпуска базового варианта, руб.; C_2 – себестоимость годового выпуска по проектируемому объекту, руб.; H_{II} – налог на прибыль, д.ед.

$$\mathcal{E}_\phi = (20278164.95 - 9681134.92) \cdot (1 - 0,2) = 8477.624 \text{ тыс. руб.}$$

Срок окупаемости мероприятия составит [11]:

$$T = \frac{K_2 - K_1}{C_1 - C_2} = \frac{\Delta K}{\Delta C}, \quad (4.38)$$

где K_1 – капитальные вложения базового варианта, руб.; K_2 – капитальные вложения по проектируемому объекту, руб.

$$T = \frac{K_2 - K_1}{C_1 - C_2} = \frac{\Delta K}{\Delta C} = \frac{1093210}{4347030} = 0.25 \text{ года.}$$

Экономический эффект от внедрения автоматизированной системы управления: для данного передела составил 8 млн. 477 тыс. рублей в год. Срок окупаемости капитальных вложений составит 3 месяца.

4.5.3 Техничко-экономические показатели предлагаемого решения по автоматизации ДСП

Сводные технико-экономические показатели предлагаемого решения по автоматизации ДСП представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Сводные технико-экономические показатели предлагаемого решения по автоматизации ДСП

Наименование	Единица измерения	Значение показателей	
		По проекту	По действующему производству
1	2	3	4
Годовой выпуск продукции:			
в натуральном выражении	тыс. т	780	780
Капитальные вложения в основные фонды, всего	тыс. руб.	1093.210	0
В том числе:			
в оборудование	тыс. руб.	793.210	0
Численность трудящихся, всего	чел.	104	104
Себестоимость продукции	руб./т	12411.71	23308.23
Срок окупаемости капитальных вложений	лет	0.25	–
Экономический эффект от внедрения оргтехмероприятия	тыс. руб.	8477.624	–

4.6 Выводы по Главе 4:

В Главе 4 доказано следующее научное положение:

Изменение величины дуги от 100 до 600 мм в соотношении с адаптивной величиной температуры футеровки и электродов через встроенные термомпары зависит от результатов расчетной математической модели теплового поля дуговой сталеплавильной печи при расширении дополнительных функций управления АСУ ТП.

Получены следующие результаты:

1. На основе метода конечных разностей разработана программа для имитационного моделирования и управления тепловым состоянием дуговой сталеплавильной печи. В программе учитываются: начальные значения температуры ванны печи, температура в стенке печи, температура под электродами, температура металла (расплава). Программа «Управление тепловым состоянием дуговой сталеплавильной печи» обеспечивает выполнение следующих функций: контроль температурного режима по всему объему металлургического агрегата; расчет

температуры верхнего слоя шлака; расчет температурного поля металла под электродом; расчет теплового поля всего металла; расчет температуры стенки.

2. Разработан способ контроля параметров ДСП для снижения энергозатрат и повышения качества готового расплава, снижения количества преждевременно выходящих из строя электродов и подовой и боковой футеровки за счет повышения достоверности оценки теплового состояния печи.

3. Для реализации данного способа предложено в существующую на предприятии SCADA-систему добавить следующие параметры: начальные значения температуры ванны печи, температура в стенке печи, температура под электродами, температура металла (расплава). Это позволит улучшить управление тепловым состоянием ДСП и за счет расширения информационного потока оптимизировать существующие параметры до более узких интервалов значений.

4. Разработана тепловая и электрическая модель плавки в дуговой сталеплавильной печи. Синтезирована система управления дуговой сталеплавильной печью, на основе предложенного способа контроля параметров дуговой сталеплавильной печи. Система учитывает тепловое состояние агрегата, но основное управление осуществляется по электрическим параметрам (импедансу).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе представлены теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых были получены и научно обоснованы следующие научно-технические результаты:

1. Проведены анализ состояния современных систем управления дуговыми сталеплавильными печами и температурным состоянием процесса, патентное исследование.

2. Определены зависимости между температурами расплава, электродов и футеровки печи с установлением значений передаточного теплового коэффициента расплава и элементов футеровки печи. Получены следующие результаты:

– доказано, что скорости изменения температур металла, футеровки и электродов имеют один порядок, но скорость изменения температуры металла примерно в 2.5 раза выше скорости изменения температуры футеровки и примерно в 3.5 раза выше скорости изменения температуры электродов;

– выявлено, что в начале плавки с момента времени 100 секунд до 700 секунд идет прогрев футеровки, поэтому коэффициент запаздывания носит четко выраженный нелинейный характер и зависит от материала футеровки и от разницы температур;

– найдены зависимости температуры футеровки от температуры металла $y = 0.44x - 13.66$ и температуры электродов от температуры металла $y = 0.18x - 32.74$. Оценка адекватности аппроксимирующих зависимостей (зависимостей температуры футеровки от температуры металла, температуры электродов от температуры металла) исследуемому объекту производилась с помощью критерия Фишера. В результате оценки было выявлено, что полученные зависимости адекватны объекту исследования.

3. Выполнены расчет теплового баланса и трехмерное математическое моделирование тепловых потоков при изменении положения электродов и значения напряжения в дуговой печи.

4. Разработан алгоритм управления тепловым состоянием шахты печи и температурой расплава посредством изменения длины дуги при вводе дополнительных параметров контроля.

Для реализации данного способа предложено в существующую на предприятии SCADA-систему добавить следующие параметры: начальные значения температуры ванны печи, температура в стенке печи, температура под электродами, температура металла (расплава). Это позволит улучшить управление тепловым состоянием ДСП и за счет расширения информационного потока оптимизировать существующие параметры до более узких интервалов значений.

5. Реализованы программные продукты для контроля технологических параметров ДСП и управления процессом плавки металлолома (патент на изобретение №2612340 и свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2018614175), которые были апробированы в условиях действующего производства.

При использовании метода конечных разностей разработана программа для имитационного моделирования и управления тепловым состоянием дуговой сталеплавильной печи. В программе учитываются следующие параметры: начальные значения температуры ванны печи, температура в стенке печи, температура под электродами, температура металла (расплава). Программа «Управление тепловым состоянием дуговой сталеплавильной печи» обеспечивает выполнение следующих функций: контроль температурного режима по всему объему металлургического агрегата; расчет температуры верхнего слоя шлака; расчет температурного поля металла под электродом; расчет теплового поля всего металла; расчет температуры стенки.

6. Разработаны рекомендации по использованию алгоритма управления тепловым состоянием шахты печи и температурой расплава посредством изменения длины дуги, способные обеспечить получение суммарного экономического эффекта 8 млн. рублей в год.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ДСП – дуговая сталеплавильная печь;

ДСП-90 – дуговая сталеплавильная печь с массой плавки 90 тонн;

SCADA-система (Supervisory Control and Data Acquisition) – система управления, сбора, обработки, передачи и отображения информации;

УКП – установка печь-ковш;

КИПиА – контрольно-измерительные приборы и автоматика;

АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическим процессом;

ООО «РЭМЗ» – Общество с ограниченной ответственностью «Ростовский электрометаллургический завод»;

ЭСЦ – электросталеплавильный цех;

МНЛЗ – машина непрерывного литья заготовок;

AC (alternating current) – переменный ток;

DC (direct current) – постоянный ток;

ЭДП – электродуговая печь;

UHP (Ultra High Power) – сверхмощная дуговая печь;

DRI – железо прямого восстановления;

HBI – железо горячего брикетирования;

ЭДС – электродвижущая сила;

MES-система (Manufacturing Execution System) – база данных, система управления и оптимизации производства;

EAM-система (Enterprise Asset Management) – система комплексного управления основными фондами предприятия;

ERP-система (Enterprise Resource Planning) – система управления предприятием верхнего уровня;

САУ – система автоматического управления;

ТХА – хромель-алюмелевая термопара;

НСХ – номинальные статические характеристики;

ЧЭ – чувствительный элемент;

МЭК – Международная электротехническая комиссия;

ПЛК – программируемый логический контроллер;

АСУ – автоматизированная система управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматическое управление электротермическими установками: Учебник для вузов / А.М. Кручинин, К.М. Махмудов, Ю.М. Миронов и др. Под ред. А.Д. Свенчанского. – Москва: Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.
2. Агаев, А.Г. Метод работы электроплавильщика Буторина М.Д. / под ред. А.Г. Агаева. – Мончегорск, 1956. – 8 с.
3. Айфичер, Э. Цифровая обработка сигналов: практический подход / Э. Айфичер, Б. Джервис. – 2-е издание. – Москва: Вильямс, 2004. – 320 с.
4. Анализ различных вариантов построения схем автоматического управления перемещением электродов дуговых сталеплавильных печей и установок печь-ковш / А.А. Николаев и др. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2015. – № 2. – С. 90-100.
5. Анализ энерготехнологических режимов работы дуговых сталеплавильных печей при использовании различных видов шихты / В.И. Тимошпольский и др. // Литье и металлургия. – 2006. – № 4 (40). – С. 19-23.
6. Афанасьев, В.Н. Математическая теория конструирования систем управления / В.Н. Афанасьев, В.Б. Колмановский, В.Р. Носов. – Москва: Высшая школа, 2003. – 614 с.
7. Безопасность жизнедеятельности в металлургии: Учебник для вузов / Л.С. Стрижко, Е.П. Потоцкий, И.В. Бабайцев и др. / Под ред. Стрижко Л.С. – Металлургия, 1996. – 416 с.
8. Белковский, А.Г. Современное состояние и тенденции развития технологии производства стали в ДСП и их конструкций / А.Г. Белковский, Я.Л. Кац, М.В. Краснянский // Бюллетень «Черная металлургия». – 2013. – № 3. – С. 72-88.
9. Брайсон, А. Прикладная теория оптимального управления / А. Брайсон, Хо Ю-Ши. – Москва: Мир, 1971. – 544 с.

10. Вапник, М.А. Автоматическое управление руднотермическими электропечами (Контроль положения конца электрода зоны коксования) / М.А. Вапник, Э.Э. Семенов. – Москва: НИИТЭхим, 1977. – 25 с.
11. Васильев, В.В. Управление руднотермической электроплавкой сульфидного медно-никелевого сырья на основе гармонического анализа тока и напряжения электродов: диссертация кандидата технических наук. / Васильев В.В. // С.-Петерб. гос. гор. ин-т им. Г.В. Плеханова. – Санкт-Петербург, 2010. – 143 с.
12. Волков, А.И. Большой химический справочник / А.И. Волков, И.М. Жарский. – Москва: Современная школа, 2005. – 608 с.
13. Воробьев, В.П. Электротермия восстановительных процессов / В.П. Воробьев. – Екатеринбург: УРО РАН, 2009. – 268с.
14. Воронов, Г.В. Аэродинамика и тепловое состояние современной дуговой сталеплавильной печи / Г.В. Воронов, В.А. Гольцев, И.В. Глухов // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2016. – №1. – С. 28-34.
15. Глинков, Г.М. Контроль и автоматизация металлургических процессов / Г.М. Глинков, А.И. Косырев, Е.К. Шевцов; под науч. ред. проф. д.т.н. Г.М. Глинкова. – Москва: Металлургия, 1989. – 352 с.
16. Григорян, В.А. Теоретические основы электросталеплавильных процессов / В.А. Григорян, Л.Н. Белянчиков, А.Я. Стомахин. – Москва: Металлургия, 1987. – 272 с.
17. Гудим Ю.А. Производство стали в дуговых печах. Конструкции, технология, материалы / Гудим Ю.А., И.Ю. Зинуров, А.Д. Киселев.–Новосибирск, 2010. – 546 с.
18. Данцис, Я.Б. Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей / Я.Б. Данцис, Л.С. Кацевич, Г.М. Жилов, Н.Н. Митрофанов, В.Л. Розенберг, И.М. Черенкова. – Москва: Металлургия, 1987. – 320 с.
19. Добрынин, И.Ф. Электрическая дуга / И.Ф. Добрынин. – Москва: Знание, 1958. – 32 с.

20. Елизаров, В.А. Исследование гармонического состава тока в трехфазной электрической цепи с дугой / В.А. Елизаров, К.А. Елизаров, В.П. Рубцов // Электричество. – 2013. – № 3. – С. 12-17.
21. Ефроймович, Ю.Е. Осциллограммы и нагрузочные характеристики промышленных трехфазных дуговых сталеплавильных печей / Ю.Е. Ефроймович. – Москва, 1950. – 31 с.
22. Жилов, Г.М. Автоматизация управления электротехнологическими режимами работы печей химической электротермии / Г.М. Жилов. – Москва: НИИТЭхим, 1985. – 37 с.
23. Журавлев, А.А. Расчеты материальных и энергетических балансов при выплавке стали в дуговых сталеплавильных печах: учебно-методическое пособие / А.А. Журавлев, В.Ф. Мысик, А.В. Жданов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 128 с.
24. Зайцев, С.А. Обобщенная модель искусственной иммунной системы / С.А. Зайцев, С.А. Субботин // Материалы XII Всероссийской научно-технической конференции «нейроинформатика-2010». – 2010. – С. 98-107.
25. Зацепин, Е.П. Влияние излучения электрической дуги на футеровку стен и свода сталеплавильной печи / Е.П. Зацепин, Ю.А. Шурыгин // Вести высших учебных заведений ченоземья. – 2009. – № 2(16). – С.76-81.
26. Зинуров, И.Ю. Этапы развития конструкции дуговых сталеплавильных печей / И.Ю.Зинуров, Ю.А. Гудим // Электротехнология. – 2006. – № 10. – С. 9-15.
27. Иванушкин, В.А. Структурное моделирование электромеханических систем и их элементов / В.А. Иванушкин, Ф.Н. Сарапулов, П. Шымчак. – Щецин. – 2000. – 310 с.
28. Капцов, Н.А. Электрические явления в газах и в вакууме / Н.А. Капцов. М., Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы. – 1947. – 821 с.
29. Кесаев, И.Г. Катодные процессы электрической дуги / И.Г. Кесаев. – Москва: Наука, 1968. – 244 с.

30. Коновалов, Ю.В. Статистическое моделирование с использованием регрессионного анализа: методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине «Компьютерное и статистическое моделирование» / Ю.В. Коновалов. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 73 с.
31. Конструкции и проектирование сталеплавильного производства. В.П. Григорьев, Ю.М. Нечкин, А.В. Егоров, Л.И. Никольский. – Москва: «МИСИС», 1995. – 562 с.
32. Кузовкин, В.А. Теоретическая электротехника / В.А. Кузовкин. – Москва: Логос, 2005. – 480 с.
33. Лапшин, И.В. Автоматизация дуговых печей / И.В. Лапшин. – Москва: Издательство МГУ, 2004. – 165 с.
34. Лесков, Г.И. Электрическая сварочная дуга / Г.И. Лесков. Москва: Машиностроение, 1970. – 335с.
35. Лопухов, Г.А. Анализ технико-экономических показателей работы традиционной дуговой печи и дуговой печи Consteel / Г.А. Лопухов // Электromеталлургия. – 2010. – № 7. – С. 45 - 46.
36. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. Москва: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1952. – 392 с.
37. Макаров, А.Н. Законы теплообмена электрической дуги и факела в металлургических печах и энергетических установках / А.Н. Макаров. Тверь: ТвГТУ, 2012. – 164 с.
38. Макаров, А.Н. Теория и практика теплообмена в электродуговых и факельных печах, топках, камерах сгорания: монография / А.Н. Макаров. Тверь: ТГТУ, 2007. – 184 с.
39. Малиновский, В.С. Техничко-экономические аспекты альтернативных технологий плавки металла в дуговых печах / В.С. Малиновский, Ф.Е. Дубинская // Электromеталлургия. – 1999. – № 3. – С. 8-16.
40. Мартынова, Е.С. Автоматизированный контроль и управление тепловым состоянием дуговой сталеплавильной печи на примере ДСП-90 /

Е.С. Мартынова, В.Ю. Бажин, Л.Н. Никитина // *Электрометаллургия*. – 2018. – № 12. – С. 23-27.

41. Мартынова, Е.С. Актуальные проблемы эффективного управления дуговыми сталеплавильными комплексами / Е.С. Мартынова, В.Ю. Бажин, Л.Н. Никитина, А.И. Козырев // *Сталь*. – 2018. – № 12. – С. 21–23.

42. Мартынова, Е.С. Контроль мощности открытой электрической дуги электродной печи / А.А. Педро, В.Ю. Бажин, А.П. Суслов, А.Ю. Фирсов, Е.С. Мартынова // *Сталь*. – 2017. – № 7. – С. 21–23.

43. Мартынова, Е.С. Контроль теплового состояния футеровки дуговой сталеплавильной печи / Е.С. Мартынова, В.Ю. Бажин, Л.Н. Никитина // *Новые огнеупоры*. – 2018. – № 4. – С. 11.

44. Медведев, А.В. Непараметрические системы адаптации / А.В. Медведев. Новосибирск: Наука, 1983. – 173 с.

45. Минеев, А.Р. Моделирование электротехнологических процессов и установок / А.Р. Минеев, А.И. Коробов, М.Я. Погребинский. – Москва: «Компания Спутник+», 2004. – 124 с.

46. Миронов, Ю.М. Электрическая дуга в электротехнологических установках: Монография / Ю.М. Миронов. – Чебоксары: изд. Чуваш. Ун-та, 2013. – 290 с.

47. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – Москва: Энергия, 1977. – 344 с.

48. Николаев, А.А. Разработка усовершенствованной системы автоматического управления положением электродов дуговых сталеплавильных печей и агрегатов ковш-печь / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, П.Г. Тулупов, И.А. Якимов // *Электрометаллургия*. – 2014. – №5. – С.15-23.

49. Никольский, Л.Е. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей / Л.Е. Никольский, В.Д. Смоляренко, Л.Н. Кузнецов. Москва: Metallurgia, 1981. – 344 с.

50. Новиков, О.Я. Устойчивость электрической дуги / О.Я. Новиков. – Ленинград: Энергия, 1978. – 159 с.

51. Новицкий, П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. // 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. – 304 с.
52. Огороков, Н.В. Автоматические регуляторы для электропечей: учеб. пособие для вузов черной металлургии / Н. В. Огороков. – Москва; Ленинград: ОНТИ, 1935. – 175 с.
53. Огороков, Н.В. Дуговые сталеплавильные печи / Н.В. Огороков. Москва: Металлургия, 1971. – 344 с.
54. Окунева В.А. Разработка способов улучшения технико-экономических показателей и методики выбора рациональных режимов плазменно-дуговых сталеплавильных печей: дис. канд. техн. наук. – Москва, 2015. – 155 с.
55. ООО «Ростовский электрометаллургический завод». Технико-экономическое обоснование строительства. Сводная пояснительная записка. Том 1. – 2005 г.
56. ООО «Ростовский электрометаллургический завод». Технико-экономическое обоснование строительства. Сводная пояснительная записка. Том 2. – 2005 г.
57. ООО «Ростовский электрометаллургический завод». Технико-экономическое обоснование строительства. Сводная пояснительная записка. Том 1. – 2007 г.
58. Оптимизация управления температурным и энергетическими режимами в технологические периоды электродуговой плавки / Б.Н. Парсункин и др. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2007. – № 4. – С. 30-34.
59. Патент РФ № 2104450. Способ электроплавки и дуговая печь для его осуществления / В.С. Малиновский. Опубликовано 10.02.1998.
60. Патент РФ №2612340, 07.03.2017. Белоглазов И.И., Мартынов С.А., Фитерман М.Я., Мартынова Е.С. / Адаптивная система управления // Патент России №2612340. 2017. Бюл. №7.
61. Педро, А.А. Вентильный эффект в электродной печи / А.А. Педро, А.П. Суслов // Цветные металлы. – 2012. – №12. – С. 91-95.

62. Педро, А.А. Изменение постоянной составляющей фазного напряжения при плавке циркониевого электрокорунда / И.И. Белоглазов, А.П. Суслов, А.А. Педро // Цветные металлы. – 2014. – № 5. – С. 31–37.
63. Педро, А.А. Постоянная составляющая фазного напряжения при плавке циркониевого электрокорунда / А.А. Педро, М.П. Арлиевский, Р.В. Куртенков // Электротехнология. – 2011. – №7. – С. 63-67.
64. Педро, А.А. Природа и характер постоянной составляющей фазного напряжения в рудно-термической печи: монография / А.А. Педро, Л.Е. Старкова, А.П. Суслов; под общей редакцией Педро А.А. – Вологда: ВоГТУ, 2013. – 123 с.
65. Погребисский, М.Я. Разработка способов и систем регулирования температуры электропечей сопротивления с улучшенными энергетическими показателями: Диссертация на соискание степени кандидата технических наук. – Москва, 2001. – 137 с.
66. Райхбаум, Я.Д. Спектроскопические методы измерения температуры электрической дуги: учебное пособие для студентов физических факультетов университетов / Я.Д. Райхаум, В.Д. Малых, В.В. Пластинин. – Иркутск: б. и., 1969. – 45 с.
67. Рубцов В.П. Параметры дугового разряда и их влияние на эффективность работы электротехнологических установок/ И.Ю Дмитриев, А.Р. Минеев // Электричество. – 2000. – № 12. – С. 34-39.
68. Рубцов, В.П. Исполнительные приводы электротехнологических установок / В.П. Рубцов. – Москва: МЭИ, 2002. – 72 с.
69. Рубцов, В.П. Моделирование в технике / В.П. Рубцов, М.Я. Погребиский. – Москва: МЭИ, 2008. – 104 с.
70. Самервилл, Дж. М. Электрическая дуга / Дж.М. Самервилл. – Ленинград: Госэнергоиздат, 1962. – 120 с.
71. Самсонов, Г.В. Физико-химические свойства окислов: справочник. Москва: Металлургия, 1978. – 472 с.
72. Сапко, А.И. Исполнительные механизмы регуляторов мощности дуговых электропечей / А.И. Сапко. – Москва: Энергия, 1980. – 136 с.

73. Свенчанский, А.Д. Электрические промышленные печи: дуговые печи и установки нагрева / А.Д. Свенчанский, И.Т. Жердев, А.М. Кручинин. – Москва: Энергоиздат, 1981. – 296 с.
74. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №2018614175. Управление тепловым состоянием дуговой сталеплавильной печи / Е.С. Мартынова, В.Ю. Бажин, П.А. Петров, Л.Н. Никитина // Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 02 апреля 2018 г.
75. Сергеев, П.В. Электрическая дуга в электродуговых реакторах/ П.В. Сергеев. – Алма-Ата: Наука, 1978. – 140 с.
76. Сергеев, П.В. Энергетические закономерности рудно-термических электропечей, электролиза и электрической дуги / П.В. Сергеев. – Алма-Ата.: Изд-во академии наук Казахской ССР, 1963. – 249 с.
77. Сисоян, Г.А. Электрическая дуга в электрической печи / Г.А. Сисоян. – Москва: Metallurgy, 1974. – 304 с.
78. Сокращение теплотерь на выпуске из конвертера и увеличение пропускной способности агрегата ковш-печь / В.А. Баглук, И.Ю. Морозова, В.Г. Валитов и др. // Сталь. – 2004. – №7. – с. 20- 21.
79. Сысолин, А.В. Влияние химического состава шлака на электрический режим плавки стали в дуговой печи переменного тока / А.В. Сысолин, И.В. Некрасов, О.Ю. Шешуков, В.Т. Луценко, В.С. Гуляков // Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов: Тр. XII Российской конференции. Т. 3. Екатеринбург: УрО РАН. – 2008. – С. 98-101.
80. Технологические особенности выплавки стали в 180-т дуговых печах / В.Ю. Дьяченко и др. // Электрометаллург. – 2008. – № 2. – С. 9–11.
81. Тиходеев, Г.М. К теории электрической дуги большой мощности / Г.М. Тиходеев // Известия АН СССР. – 1958. – №3. – С.5-14.
82. Фарнасов, Г.А. Электрооборудование и элементы автоматизации электроплавильных установок / Г.А. Фарнасов, В.Л. Рабинович, А.В. Егоров. – Москва: Metallurgy, 1976. – 336 с.

83. Федченко, И.К. Измерение температуры электрической дуги / И.К. Федченко. – Киев: Техніка, 1966. – 154 с.
84. Физика дугового разряда: Сборник трудов. – Новосибирск: б.и., 1972. – 159 с.
85. Хардле, В. Прикладная непараметрическая регрессия / В. Хардле. Москва: Мир, 1993. – 349 с.
86. Чиркин, В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной физики. Справочник / В.С. Чиркин. – Москва: Атомиздат, 1968. – 484 с.
87. Шариков, Ю.В. Моделирование систем. Часть 2: Методы численной реализации математических моделей / Ю.В. Шариков, И.Н. Белоглазов. Санкт-Петербургский государственный горный университет. СПб., 2012. – 118 с.
88. Шевелев, Л.Н. Современное состояние и перспективы развития мирового рынка стали / Л.Н. Шевелев // Электротехнология. – 2010. – № 6. – С. 2–10.
89. Шпиганович, А.Н. Моделирование функционирования дуговых сталеплавильных печей на основании применения искусственных нейронных сетей / А.Н. Шпиганович, Ю.А. Шурыгин // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2009. – №2(16). – 23-26 с.
90. Энгель, А. Физика и техника электрического разряда в газах. т. 1-2 / А. Энгель, М. Штенбек. – Москва, Ленинград: Объединенное научно-техническое изд-во НКТП СССР, 1935. – 251 с.
91. Aamodt, A. AICom – Artificial intelligence communications, IOS Press / A. Aamodt, E. Plaza. –1994. – Vol. 7: 1. – P. 39-59.
92. Arzpeyma, N. Mathematical modeling of scrap melting in an EAF using electromagnetic stirring / N. Arzpeyma, O. Widlund, M. Ersson, P. Jönsson // ISIJ Int. 53. – 2013. – P. 48–55.
93. Bezuidenhout, J. Computational fluid dynamic modelling of an electric furnace used in the smelting of PGM containing concentrates / J. Bezuidenhout, J. Eksteen, S. Bradshaw // Miner. Eng. – 2009. – P. 995–1006.

94. Brandes, E.A. Smithells metals reference book / E.A. Brandes, G.B. Brook. Butterworth-Heinemann, 1992. – 1794 p.
95. Giri, F. Block-oriented nonlinear system identification / F. Giri, E. Bai // Springer, 2010. – 426 p.
96. Mallat, S. A. Wavelet tour of signal processing / S.A. Mallat. – Academic Press, 2009. – 832 p.
97. Martynova, E.S. Increasing the level of control and management of arc steel-smelting furnaces / E.S. Martynova, V.Yu. Bazhin, V.G. Kharazov // IOP Conference Series: MSE. – 2019. –V. 537. – P. 1-6.
98. Martynova, E.S. The project to control the thermal state of the electric arc furnace at the existing production / E.S. Martynova, V.Yu. Bazhin // International Conference on Advancing Knowledge from Multidisciplinary Perspectives in Science, Engineering & Technology: Conference Proceedings. – 2019. – P. 66-70.
99. Mineral commodity summaries 2015. – U.S. Geological Survey, 2015. – 196 p.
100. Moghadasian, M. Modelling and artificial intelligence-based control of electrode system for an electric arc furnace / M. Moghadasian, A. Emad // J. Electromagnetic Analysis & Applications. – 2011. – №3. – P. 47-55.
101. Nikolaev, A.A. Electrical optimization of superpowerful arc furnaces / A.A. Nikolaev, G.P. Kornilov, A.V. Anufriev et al. // Steel in Translation. – 2014. – Vol. 44. – № 4. – P. 289-297.
102. Procetdings of the 15th Mediterranean Conference on Control&Automation. – July 27-29, 2007. Athens – Greece. Radu Balan. Modeling and control of an electric arc furnace. – P. 91-97.
103. Viswanath, R.A. Comparison of different solution methodologies for melting and solidification problems in enclosures / R.A. Viswanath, Y. Jaluria. Heat Transfer Part B Fundam. – 1993. – V.24. –P. 77–105.
104. Voronov, G.V. Aspects of the aerodynamics in the working space of a modern electric-arc steelmaking furnace / G.V. Voronov, M.V. Antropov, O.V. Porokh // Refractories and Industrial Ceramics. – 2014. – Vol. 55. – № 4. – PP. 285-287.