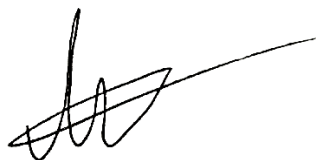


На правах рукописи

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)*

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научные руководители:

доктор технических наук, доцент, проректор по научно-инновационной деятельности

Бажин Владимир Юрьевич

Официальные оппоненты:

Душин Сергей Евгеньевич

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», кафедра автоматики и процессов управления, профессор

Николаев Александр Николаевич

кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Центр профессионального аутсорсинга «Ресурс», начальник отдела АСУ ТП

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»

Защита диссертации состоится 21 мая 2020 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.03 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 20 марта 2020 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

диссертационного совета



Бодуэн

Анна Ярославовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 патентного исследования;

- 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.

Научная новизна работы:

– 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:

–разработанный алгоритм управления тепловым состоянием дуговой сталеплавильной печи 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 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.

Личный вклад автора состоит в постановке целей, формулировке 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.

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 программного пакета Matlab R2014b.

Синтез регулятора и его настройки производились в программном пакете Matlab R2014b.

Тестирование предложенной системы управления производилось по архивным данным процесса плавки в ДСП.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается большим объемом экспериментальных исследований, применением современных методов статистического анализа, сходимостью теоретических и экспери-

ментальных результатов, тестированием системы управления на лабораторных и промышленных архивных данных о протекании технологического процесса плавки металлолома в ДСП.

Апробация работы.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований 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).

Публикации.

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 8 печатных работах, в том числе 4 статьи в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), 1 статья в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus, получены 1 патент 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулированы общая цель и задачи исследовательской работы, научная новизна и практическая ценность работы.

В главе 1 представлен анализ существующих способов контроля и систем управления технологическими параметрами дуговых

сталеплавильных печей в России и за рубежом, проведено сравнение характеристик оборудования для производства стали в различных печных агрегатах, обозначены проблемы и недостатки в контроле и управлении дугowymi печами, сформулированы задачи исследования.

В главе 2 выбраны и обоснованы методы решения поставленных задач исследования, представлена схема лабораторной установки, разработаны методики проведения лабораторных и промышленных экспериментов.

В главе 3 приведены результаты изучения влияния изменения температуры металла на изменение температуры футеровки и электродов во время плавки. Выявлены и получены зависимости температуры футеровки от температуры металла, температуры электрода от температуры металла. На основе экспериментальных данных рассчитан коэффициент огнеупорности для печи ДСП-90.

В главе 4 представлена математическая модель процесса плавки в дуговой сталеплавильной печи. Обоснован способ контроля параметров дуговой сталеплавильной печи (на примере ДСП-90). Разработан алгоритм и описан реализованный программный пакет для управления тепловым состоянием дуговой сталеплавильной печи для дополнительного встраивания в существующие АСУ ТП. Рассчитан экономический эффект предлагаемого решения.

В заключении сформулированы основные выводы, результаты проведенных экспериментальных и теоретических исследований и рекомендации.

Основные результаты исследований отражены в следующих защищаемых положениях:

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.

Плавку высоколегированных сталей в ДСП целесообразно определять тремя режимами: электрическим, температурным и технологическим. Электрический режим плавки характеризует измене-

ния подводимой к печи мощности во времени, но при этом температурный режим, который включает изменение по ходу плавки температуры металла, шлака и футеровки не всегда имеет адекватные значения. В ходе технологического цикла плавки происходит изменение химического состава металла, которое сопровождается скачками температуры при выполняемых во временных промежутках операций (скачивание шлака, присадка легирующих и др.). Для повышения уровня контроля и работы систем автоматизации предлагается объединить режимы. Для решения задач экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке, представленной на рисунке 1.

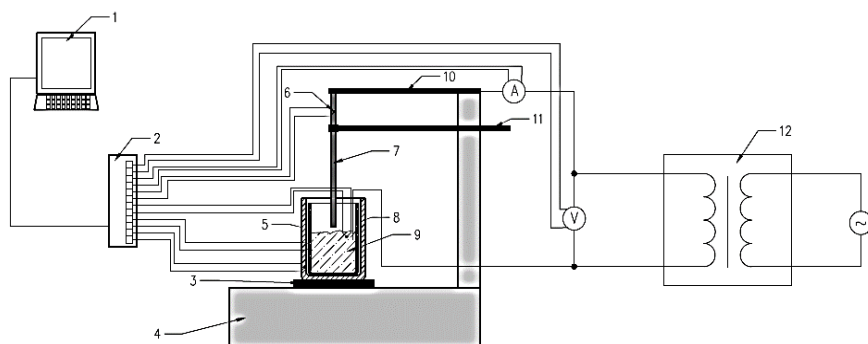


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки:

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

В ходе проведения лабораторных экспериментов были получены данные, представленные на рисунке 2. Анализируя графики изменения температуры металла, футеровки и электродов в течение 1000 с, можно сделать вывод, что при нагревании и расплавлении металла температура футеровки изменяется с различным коэффициентом запаздывания (по сравнению с температурой металла). Температура электрода также изменяется, но носит более четко выраженный характер, чем в случае температуры футеровки. Это связано с влиянием расположения конструктивных элементов в зоне мак-

симального нагрева. Видно, что футеровка прогревается гораздо быстрее, чем электроды. Однако, прерывание нагрева и остывание электродов вследствие их попеременного движения вниз или вверх при регулировании дуги приводит к неравномерному прогреву данных элементов и временным скачкам температуры. Опыты показали, что на практике стабильным местом для установки термопары на электроде является верхняя часть электрода в зоне контакта с токоподводящими элементами.

В ходе эксперимента выявлено, что скорости изменения температур расплава, 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.

Используя метод наименьших квадратов, была выполнена аппроксимация экспериментальных данных, в результате чего получена зависимость температуры электрода от температуры металла (рисунок 3).

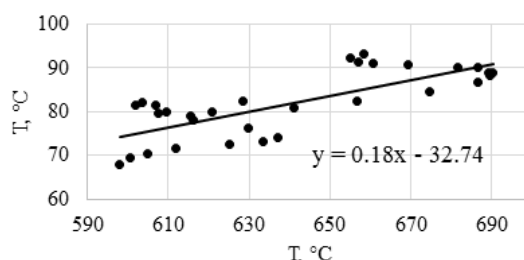


Рисунок 3 – Зависимость температуры электрода от температуры металла

Зависимость температуры электрода от температуры металла носит линейный характер, следовательно, температурный градиент электродов дуговой сталеплавильной печи зависит от скорости регулирования дуги, что может являть основанием для ввода дополнительных функций в АСУ.

Был проведен ряд промышленных экспериментов с целью определения значения коэффициента огнеупорности печи ДСП-90 в зависимости от теплофизических свойств футеровочных материалов.

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

Коэффициент огнеупорности – фактор, определяющий влияние дуги на огнеупоры. Коэффициент огнеупорности как правило вычисляют по следующей формуле:

$$Ko = \frac{Varc^2 \cdot I}{d^2}, \frac{kB \cdot Bm}{cm^2}, \quad (1)$$

где $Varc$ – напряжение дуги, В;

I – ток, подводимый к электроду, кА;

d – расстояние от дуги до огнеупорной части печи (216.5 см).

Для определения потерь тепла через футеровку использовался коэффициент теплопроводности.

В результате обработки данных, полученных при проведении промышленного эксперимента был рассчитан коэффициент огнеупорности для футеровки печи ДСП-90 по формуле 1.

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

График зависимости коэффициента огнеупорности от изменения значения напряжения дуги представлен на рисунке 4. График зависимости коэффициента огнеупорности от изменения величины напряжения при переключении ступеней трансформатора представлен на рисунке 5.

Анализируя графики изменения напряжения дуги (рисунки 4 и 5) в период плавления металла, можно увидеть, что среднее напряжение дуги равно примерно 350 В. Длина дуги при этом примерно равна 350 мм. Исходя из этого, уровень шлака на поверхности расплава должен быть не менее 400 мм, чтобы полностью скрыть дугу, 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 $120.0 \frac{kB \cdot Bm}{cm^2}$.

Таким образом, можно сделать вывод, что коэффициент огнеупорности зависит от тока дуги прямо пропорционально, что также подтверждается результатами расчета по формуле 1.

В этой связи, для измерения температуры и контроля теплового состояния дуговой печи в контрольных точках установлены термомпары (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).

Данный алгоритм был реализован в программном пакете Matlab 2014b Simulink. Для апробации алгоритма использовались данные, полученные в ходе лабораторных исследований (рис. 6 и 7). Из графиков следует, что расчётные значения температуры металла (T_p) и футеровки ($T_{фр}$) в ходе плавки практически совпадают с полученными в лабораторном эксперименте значениями температуры металла ($T_{и}$) и футеровки ($T_{фи}$). Доказано, что работа данного алгоритма является эффективной.

2. 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.

Периодический режим работы оказывает существенное влияние на футеровочные материалы шахты печи. Для создания математической модели использованы данные работы типовой дуговой сталеплавильной печи ДСП-90. Цикл выплавки стали в данной дуговой печи составляет 52 минуты, при этом температура расплава достигает 1620-1630 °С. После выливки металла температура футеровки снижается до 700-800°С, что приводит к изменению теплового поля в некоторых частях печи. Подобные перепады температуры отрицательно сказываются на состоянии элементов футеровки печи: возникают микротрещины, происходит изменение толщины швов футеровки, образуются сколы и изломы). Вместе с тем, особенности эксплуатации ДСП влияют на теплофизические свойства самих эле-

ментов футеровки (металлизация и зашлакованность). Все эти факторы изменяют тепловой баланс агрегата, поэтому возникает необходимость постоянной корректировки мощности дуги, так как КПД печи и величина потребляемой энергии напрямую зависят от потерь тепла через футеровку печи.

Обобщенную модель ДСП (изменение температуры во времени) можно представить следующей формулой:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{M_m \cdot C_m} \cdot (P - P_{потери}), \quad (2)$$

где P – мощность, используемая для нагрева, Вт;

$P_{потери}$ – потери теплоты, Дж;

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

M_m – масса металла, кг;

Следовательно, температура в ДСП определяется следующим образом:

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

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

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;

L – длина дуги, мм;

I – сила тока трансформатора, А

$\cos(\varphi)$ – коэффициент мощности (для печи ДСП-90 $\cos(\varphi)=0.8$);

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

На основе метода конечных разностей была разработана программа для имитационного моделирования и управления тепловым состоянием дуговой сталеплавильной печи.

Процесс прогрева футеровки ДСП описывается дифференциальным уравнением следующего вида:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (4)$$

Начальные и граничные условия для данной задачи:

$$T(0, r) = T_n(r); \quad \frac{\partial T(t, 0)}{\partial r} = 0; \quad -\lambda \cdot \frac{\partial T(t, R)}{\partial r} = \alpha(T(t, R) - T_{oo}) \quad (5)$$

Начальное условие выражает первичное распределение температуры в футеровке печи, 1-е граничное условие выражает симметрическое распределение температуры по радиусу прогрева ДСП, а 2-е граничное условие описывает равенство теплового потока из окружающей среды (электрической дуги и металла) тепловому потоку внутрь футеровки за счет теплопроводности.

Представим значения производных через разности:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial T}{\partial \rho} \right|_i &\cong \frac{T_i^{(j-1)} - T_{i-1}^{(j-1)}}{\Delta \rho}; \quad \left. \frac{\partial c}{\partial \rho} \right|_{i+1} \cong \frac{T_{i+1}^{(j-1)} - T_i^{(j-1)}}{\Delta \rho}; \\ \frac{\partial^2 T}{\partial T^2} &\cong \frac{\frac{T_{i+1}^{(j-1)} - T_i^{(j-1)}}{\Delta \rho} - \frac{T_i^{(j-1)} - T_{i-1}^{(j-1)}}{\Delta \rho}}{\Delta \rho} = \frac{T_{i+1}^{(j-1)} - 2 \cdot T_i^{(j-1)} + T_{i-1}^{(j-1)}}{\Delta \rho^2}; \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} &\cong \frac{T_i^{(j)} - T_i^{(j-1)}}{\Delta t} \\ \left. \frac{\partial T}{\partial \rho} \right|_i &\cong \frac{T_i^{(j-1)} - T_{i-1}^{(j-1)}}{\Delta \rho}; \quad \left. \frac{\partial c}{\partial \rho} \right|_{i+1} \cong \frac{T_{i+1}^{(j-1)} - T_i^{(j-1)}}{\Delta \rho}; \\ \frac{\partial^2 T}{\partial T^2} &\cong \frac{\frac{T_{i+1}^{(j-1)} - T_i^{(j-1)}}{\Delta \rho} - \frac{T_i^{(j-1)} - T_{i-1}^{(j-1)}}{\Delta \rho}}{\Delta \rho} = \frac{T_{i+1}^{(j-1)} - 2 \cdot T_i^{(j-1)} + T_{i-1}^{(j-1)}}{\Delta \rho^2}; \quad (7) \\ \frac{\partial T}{\partial t} &\cong \frac{T_i^{(j)} - T_i^{(j-1)}}{\Delta t} \end{aligned}$$

На основании разностных значений производных, исходного уравнения (4) и уравнения граничных условий (5), сформирована зависимость:

$$\frac{T_i^{(j)} - T_i^{(j-1)}}{\Delta t} = \frac{a}{R^2} \cdot \left(\frac{T_{i+1}^{(j-1)} - 2 \cdot T_i^{(j-1)} + T_{i-1}^{(j-1)}}{\Delta \rho^2} + \frac{1}{i \cdot \Delta \rho} \cdot \frac{T_i^{(j-1)} - T_{i-1}^{(j-1)}}{\Delta \rho} \right);$$

$$T_i^{(j)} = T_i^{(j-1)} + B \cdot (T_{i+1}^{(j-1)} - 2 \cdot T_i^{(j-1)} + T_{i-1}^{(j-1)}) + \frac{B}{i} (T_i^{(j-1)} - T_{i-1}^{(j-1)}) \quad (8)$$

$$B = \frac{a \cdot \Delta t}{R^2 \cdot \Delta \rho^2}$$

Рекуррентное соотношение (8) позволяет вычислить 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.

$$T_0^{(j)} = T_1^{(j)} \quad (9)$$

$$-\frac{\lambda}{R} \frac{T_N^{(j)} - T_{N-1}^{(j)}}{\Delta \rho} = \alpha (T_N^{(j)} - T_{oc});$$

$$T_N^{(j)} \left(1 + \frac{\alpha \cdot R \cdot \Delta \rho}{\lambda} \right) = T_{N-1}^{(j)} + \frac{\alpha \cdot R \cdot \Delta \rho}{\lambda} \cdot T_{oc} \quad (10)$$

$$T_N^{(j)} = \frac{T_{N-1}^{(j)} + \frac{\alpha \cdot R \cdot \Delta \rho}{\lambda} \cdot T_{oc}}{\left(1 + \frac{\alpha \cdot R \cdot \Delta \rho}{\lambda} \right)}$$

Соотношения (10) позволяют вычислить все значения температур по пространственной и временной координатам.

Для контроля и управления температурным режимом и его тепловым состоянием по всему объему металлургического агрегата (ДСП) разработан программный алгоритм в рамках прикладного пакета Schneider Electric. Для сбора дополнительных данных и расширения информации о техпроцессе встроенные термопары фиксируют значение температуры в зависимости от изменения длины дуги и степени нагрева шихты и расплава в шахте печи. Регулятор согласо-

ет значения температуры футеровки со всех точек измерения и подает сигнал на привод управления изменением положения электродов. Если теплофизические свойства футеровки в процессе эксплуатации ухудшаются или изменяется форма рабочего пространства, вводится поправочный коэффициент, чтобы расчетные значения температуры совпадали с измеренными текущими данными.

На основе разработанного алгоритма, реализованного в программном комплексе Matlad 2014b, запатентована программа для ЭВМ «Управление тепловым состоянием дуговой сталеплавильной печи» (регистрационный номер 2018614175).

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

Данная программа 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.

В результате выполнения вышеописанной программы были получены профили температур по радиусу в различные моменты времени в процессе прогрева футеровки печи ДСП (рисунок 8).

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 9). Температура футеровки в верхней части печи выше, чем в нижней. Это объясняется тем, что излучение от дуги попадает непосредственно в верхнюю часть футеровки. Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что 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.

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.

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. Проект ввода новых параметров в действующую SCADA-систему представлен на рисунке 10.

Простота реализации данного способа заключается в том, что не требуется установка новой SCADA-системы, а предлагается лишь ввести значения температуры с установленных по указанному выше способу термопар в существующую и произвести первоначальную настройку регулятора.

В автоматических системах управления нестационарными объектами для обеспечения заданного качества регулирования в процессе работы АСУ необходимо обеспечить целенаправленное изменение динамических свойств регулирующего устройства так, чтобы компенсировать нежелательные изменения свойств объекта управления. Эффективным способом решения для данной проблемы является применение алгоритмов адаптации регулятора, то есть изменение параметров регулятора при изменении свойств объекта. Структурная схема адаптивной АСУ ТП представлена на рисунке 11.

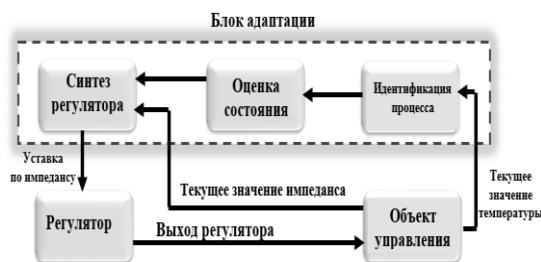


Рисунок 11 – Структурная схема адаптивной АСУ для контроля температуры ДСП

Модель данной системы управления была реализована в среде Simulink программного пакета Matlab 2014b. Результаты работы модели АСУ ТП в ДСП представлены на рисунке 12.

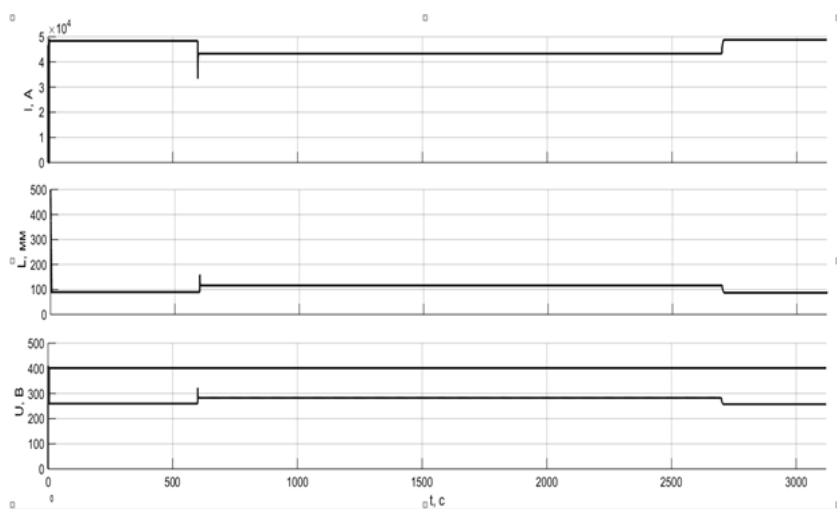


Рисунок 12 – Результаты работы АСУ ТП в ДСП

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

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

– 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;

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

– разработан алгоритм управления тепловым состоянием шахты печи и температурой расплава посредством изменения длины дуги при вводе дополнительных параметров контроля;

– 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);

– 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;

– выработаны 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 для электросталеплавильного цеха.

Содержание работы отражено в следующих основных публикациях:

В изданиях из Перечня ВАК

1. **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.

2. **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.

3. **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.

4. **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.

В издании, индексируемом в международной базе Scopus:

5. **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*, – Krasnoyarsk, Russia. – April 4-6, 2019. – V. 537. – P. 1-6.

В прочих изданиях:

6. **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*, February 25th, USA, 2019. – P. 66-70.

Патенты на изобретения, свидетельства на программы для ЭВМ:

7. Патент №2612340 Российская Федерация, МПК G05B 13/04 (2006.01) Адаптивная система управления: № 2015148330: заявл. 10.11.2015: опубл. 07.03.2017 / Белоглазов И.И., Мартынов С.А., Фитерман М.Я., **Мартынова Е.С.**; заявитель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». – 8 с.: ил. – Текст: непосредственный.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018614175 Российская Федерация. Управление тепловым состоянием дуговой сталеплавильной печи: №2018611554: заявл. 19.02.2018: опубл. 02.04.2018 / **Е.С. Мартынова**, В.Ю. Бажин, П.А. Петров, Л.Н. Никитина; заявитель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». – 1 с.: ил. – Текст: непосредственный.

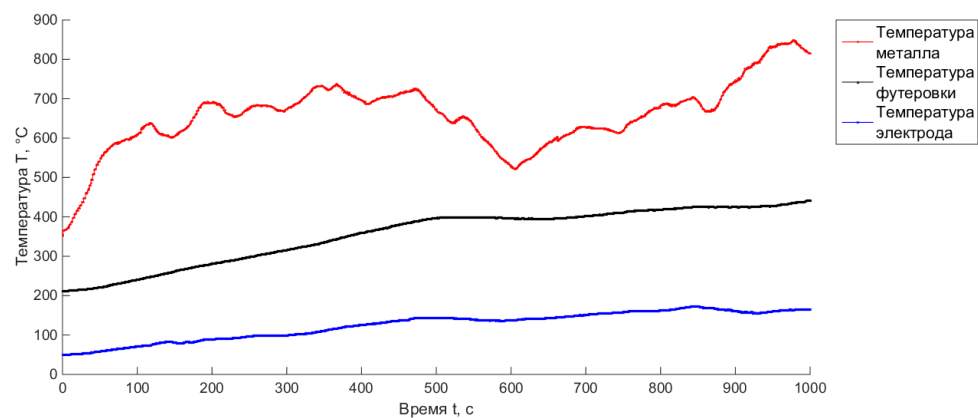


Рисунок 2 – Изменение температуры в течение плавки

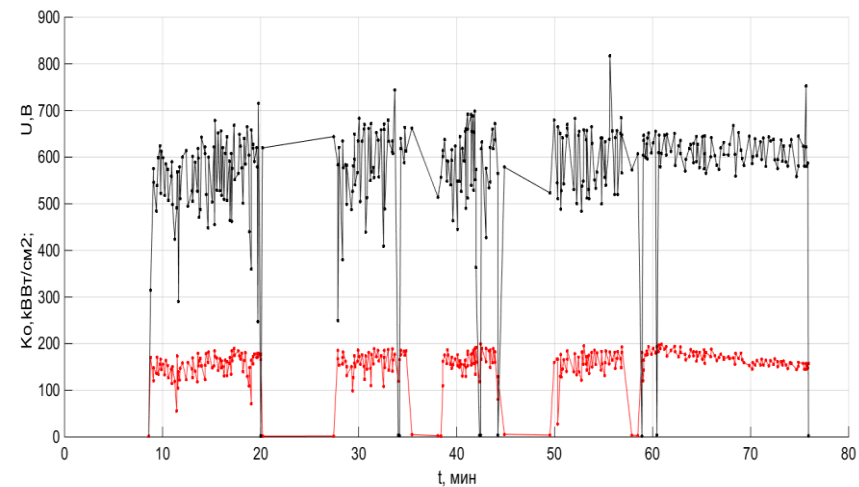


Рисунок 4 – График зависимости коэффициента огнеупорности от изменения значения напряжения дуги

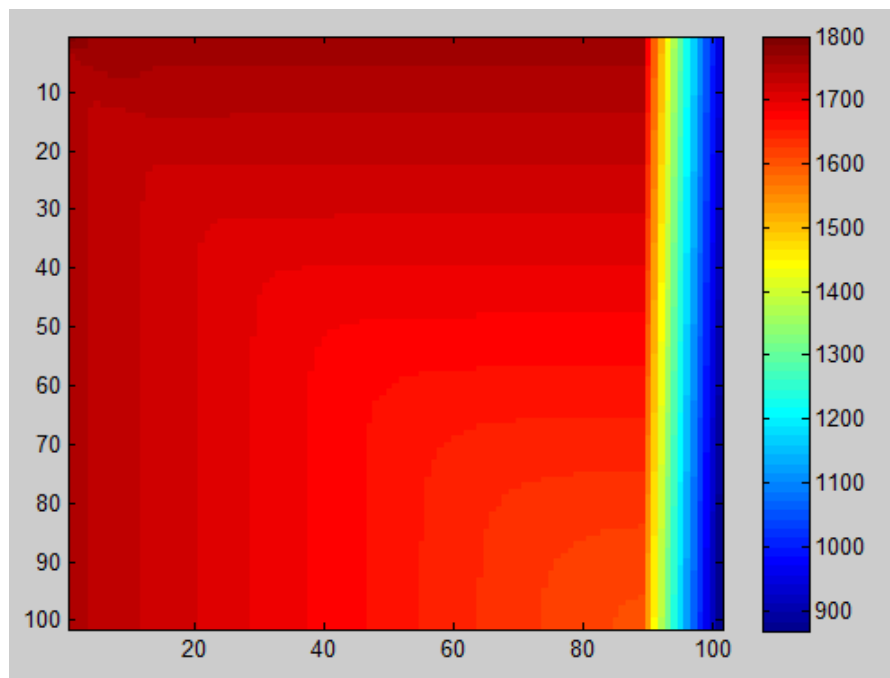


Рисунок 8 – Профили температур по радиусу в различные моменты времени в процессе прогрева футеровки печи

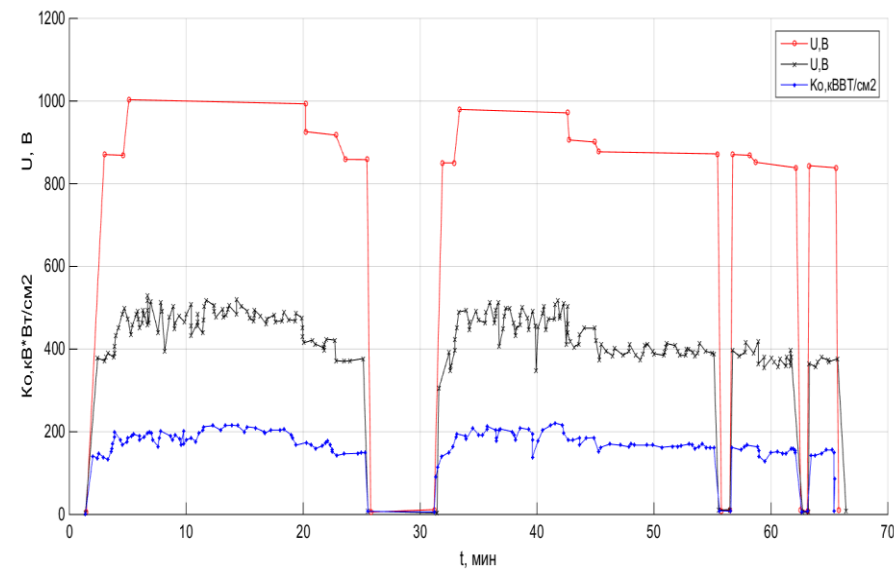
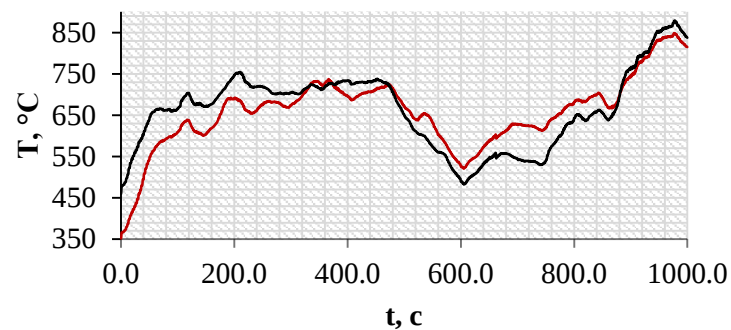
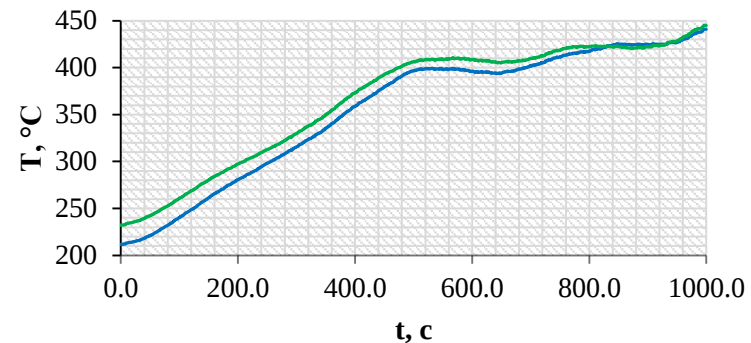


Рисунок 5 – График зависимости коэффициента огнеупорности от изменения величины напряжения при переключении ступеней трансформатора



— Температура металла расчетная T_r
 — Температура металла измеренная T_i

Рисунок 6 – График изменения температуры металла в ходе плавки



— Температура футеровки расчетная $T_{фр}$
 — Температура футеровки измеренная $T_{фи}$

Рисунок 7 – График изменения температуры футеровки в ходе плавки

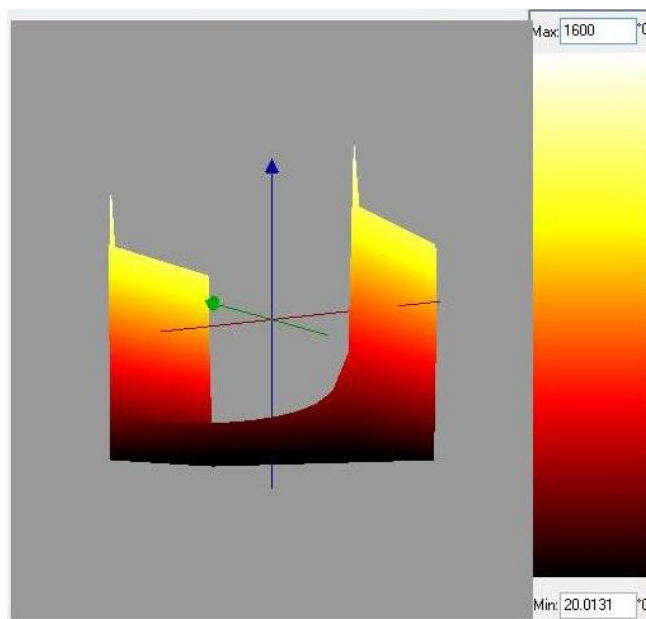


Рисунок 9 – Профиль температур футеровки ДСП

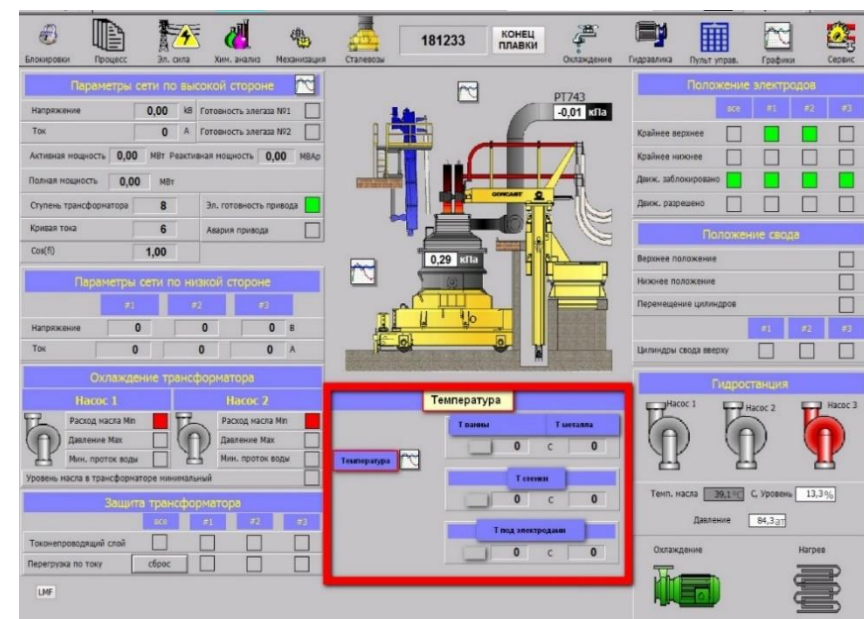


Рисунок 10 – Проект ввода новых параметров в действующую SCADA-систему