

На правах рукописи

ПОРТЯНКИН АРТЁМ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ
ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМИНИЯ
И НАГРЕВА СЛЯБОВ В КОНВЕКТИВНЫХ ПЕЧАХ**

Специальность 05.13.06 - Автоматизация и управление технологическими процессами
и производствами (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2018

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Научный руководитель:

доктор технических наук,
Пискажова Татьяна Валериевна

Официальные
оппоненты:

Лившиц Александр Валерьевич
доктор технических наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Иркутский государственный
университет путей сообщения», г. Иркутск,
проректор по научной работе

Серегин Юрий Николаевич
кандидат технических наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Сибирский государственный
университет науки и технологий имени
академика М.Ф. Решетнева», г. Красноярск,
доцент кафедры «Информационно-
управляющие системы»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский
технический университет», г. Иркутск

Защита состоится 19 октября 2018 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.249.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» по адресу: 660037, г. Красноярск, проспект имени газеты «Красноярский рабочий», 31.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева и на сайте <https://www.sibsau.ru>.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Панфилов
Илья Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Металлургические процессы продолжают оставаться очень энергоемкими. Так получение алюминия сырца требует от 13000 до 17000 кВт/час на тонну, в зависимости от конструкции аппарата и системы управления. При этом половина подведенной мощности теряется в виде тепла в окружающую среду. Поэтому ведение этого процесса с возможно более низким расходом энергии и возможность рекуперации теплотерь являются очень актуальными. Энергоемкость обработки алюминия также высока, так, гомогенизация и нагрев слитков перед прокаткой требует от 580 кВт/час на тонну на старых печах до 220 кВт/час на тонну на лучших зарубежных образцах. Обработка и получение металлов зачастую требует строгого соблюдения температурных и химических режимов, при этом возможности непосредственного измерения технологических параметров ограничены. Например, угар металла при неправильном нагреве ведет к его прямым потерям до 2%, не считая убытков при прокатке от окалины на поверхности слитков. Повышение температуры расплава при получении алюминия на 10°C ведет к снижению производительности электролизера на 2 %, не считая увеличения теплотерь в окружающую среду и дополнительного износа конструкции. При этом не все предприятия имеют возможность замены устаревших печей, и тогда возможности энерго- и ресурсосбережения лежат только в области улучшения систем управления.

Поэтому одним из актуальных направлений совершенствования технологических процессов в металлургии является внедрение современных АСУТП печей для первичного получения металлов и их дальнейшей обработки, и в том числе, замены регулирования по отклику на упреждающее регулирование. В связи с этим требуются математические модели и алгоритмы, позволяющие в режиме реального времени прогнозировать не измеряемые или редко измеряемые параметры процесса и корректировать поведение объектов в зависимости от изменения подаваемой мощности, сырья, окружающей среды. В алгоритмах автоматизации в основном используются стохастические, вероятностные модели. Но для энергосбережения нужно использовать больше моделей, основанных на законах теплообмена. Эти модели должны быть быстродействующие, и поэтому при их разработке следует проводить постоянное сравнение с расчетами более сложных моделей, с экспериментальными данными.

Для разработки алгоритмов управления тепловым балансом в алюминиевом электролизере большую роль играет понимание теплообмена футеровки электролизера с расплавами и окружающей средой с учетом фазового перехода застывшего расплава.

Вопросам разработки моделей и алгоритмов для управления электролизом посвящены исследования П.В. Полякова, А.Н. Березина, П.Н. Вабищевича, В.М. Белолипецкого, Т.В. Пискажовой, В.В. Юркова, В. Х. Манна, М.А. Marois, С. Bertrand, М. Desilets, М.М. Coulombe, М. Lacroix, С.С. Wei, J.J.J. Chen, В. J. Welch, V.R. Voller.

В металлургических печах нагрева в условиях современных требований к качеству (стандарт ISO) для возможности поставки российского проката на предприятия авиастроения, необходимо строго выдерживать требования как по равномерности прогрева объема печи, так и требования к прогреву садки. При этом существующие АСУТП осуществляют ПИД-регулирование локального нагревателя по измерениям температуры воздуха возле этого нагревателя, задача поддержания нужного прогрева объема всей печи и садки в таком управлении невыполнима.

Существенный вклад в исследования и оптимизацию режимов нагревов внесли российские ученые В.А. Кривандин, Б.Л. Марков, С.А. Мокрушин, А.М. Вохмяков, М.Д. Казяев, В.А. Арутюнов, В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников и зарубежные исследователи L. Lahoucine-Abaih, A. Van Bennekom, M. Fathi, Li Jing, Wang Jing, Hao Chunhui и другие ученые.

Обязательным условием разработки хорошей системы управления и ее успешного внедрения является понимание разработчиками и пользователями динамических процессов, протекающих в металлургическом аппарате, его откликов на управляющие воздействия, взаимосвязей параметров конструкции с операционной деятельностью. Поэтому создание

автоматизированных систем научных исследований, посвященных теплопереносу в печах, является актуальной задачей.

Целью диссертации является повышение качества управления металлургическими печами за счет разработки моделей теплообмена, фазовых переходов и алгоритмов на их основе для АСУТП.

Поставленные цели потребовали решения следующих задач:

1. Провести изучение основ теплообмена печей для разработки энергосберегающих алгоритмов, рассмотреть методику алгоритмизации теплотехнического объекта.
2. Для использования в алгоритмах управления тепловым балансом алюминиевого электролизера разработать одномерную динамическую модель теплопередачи через бортовую футеровку и гарнисаж алюминиевого электролизера с учетом фазового перехода, с явным выделением фронта плавления.
3. Разработать разностную схему и расчетный алгоритм для этой модели на движущейся сетке. Провести апробацию модели путем сравнения результатов расчетов между двумя видами моделей при подаче управляющих воздействий.
4. Разработать модель нагрева материалов в печах конвективного теплообмена для использования в управляющих контроллерах с учетом теплопроводности нагреваемых материалов, скорости и температуры нагревающего газа. Провести апробацию модели путем сравнения результатов расчетов между двумя видами моделей.
5. Разработать алгоритм управления печью нагрева с применением новой модели, предложить модернизацию структуры АСУ конвективной печи.
6. Разработать автоматизированную систему научных исследований для изучения теплопередачи конструктивными элементами и динамического отклика переменных процесса в металлургических печах.

Объект исследований – Металлургические печи для получения и обработки металла и системы управления ими.

Предмет исследований – Модели и алгоритмы для управления металлургическими печами и для автоматизированных исследовательских систем в теплотехнике.

Научная новизна работы:

1. Предложена численная модель поведения гарнисажа в алюминиевых электролизерах, отличающаяся рассмотрением плавления гарнисажа на футеровке, условием конвективного теплообмена снаружи борта, и позволяющая рассчитывать динамическое распределение температур по сечению борта электролизера и положение фронта кристаллизации.
2. Разработан новый алгоритм для расчета температур слоев футеровки и гарнисажа на движущейся сетке, с учетом соединения слоев и определением толщины гарнисажа модифицированным методом «ловли фронта в фазовый узел».
3. Предложена новая модель нагрева материалов в печах конвективного нагрева, пригодная к использованию в алгоритмах АСУТП, позволяющая оценить скорость и равномерность нагрева слитков в зависимости от температуры и скорости нагревающего газа с учетом теплопроводности нагреваемого материала. Определены границы применимости предложенной модели.
4. Предложен новый алгоритм управления печью, основанный на расчете температуры поверхности и середины нагреваемых слябов, позволяющий достигать заданных показателей нагрева.
5. Разработана автоматизированная система научных исследований в теплотехнике, отличающаяся от существующих аналогов возможностью проведения интерактивных расчетов теплопередачи конструктивными элементами при подаче управляющих воздействий, при подборе материалов стенки; возможностью исследования нагрева материалов и фазовых переходов в печах разными численными методами.

Теоретическая значимость заключается в разработанных методах и моделях для решения задач автоматизированного управления, основанных на законах тепломассопереноса, что позволяет использовать их для широкого круга металлургических объектов.

Систематизирована методика моделирования теплотехнического объекта для использования в алгоритмах АСУТП, заключающаяся в схематизации и разбиении сложного объекта исследования на различные зоны, выделении объединяющего элемента в этом разложении в зависимости от задачи управления. Разработана новая разностная схема на движущейся сетке для решения одномерной задачи на многослойной стенке с учетом фазового перехода, что вносит вклад в методики расчетов динамических тепловых балансов металлургических печей и может быть использовано в задачах литья и обработки металлов с фазовыми переходами.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

Использование разработанных виртуальных моделей для АСУТП позволит с упреждением определять параметры и переменные объектов и их поведение при подаче различных воздействий, что снижает энергозатраты на производстве, позволяет стабильно и точно выдерживать технологические режимы.

Численная модель поведения гарнисажа разрабатывалась в рамках договора «Разработка связанного алгоритма стабилизации состава электролита и управления тепловым балансом для энергоэффективных электролизеров» с ООО «РУСАЛ ИТЦ» в 2016 году. В рамках проведения договорных научно-технических работ в 2017 году по теме «Разработка программного обеспечения и алгоритмов для оптимального управления энергоэффективными электролизерами» предлагаемая численная модель была внедрена в состав ПО «Виртуальный электролизер»; с использованием новой модели были рассчитаны управляющие воздействия для нескольких типов электролизеров (РА-180, ОА-120, С-175, С-255). В настоящее время рассчитанные управляющие воздействия используются в автоматическом управлении заданным напряжением на опытных электролизерах РА-180 ОАО КрАЗ, при этом на этих электролизерах стандартное отклонение по температуре электролита на 2 градуса меньше, чем у «свидетелей». По сопутствующему параметру КО у опытных электролизеров СКО на 0,02 единицы меньше, чем у «свидетелей».

Планируемая к внедрению установка рекуперации бортовых теплопотерь сверхмощных электролизеров не сможет управляться без ущерба для технологии электролиза, если не будут использованы модели, правильно рассчитывающие теплообмен электролизера с устройством теплосбора. Поэтому в диссертации предложена схема модернизации АСУТП электролиза с использованием новой модели бортовой теплопередачи и плавления настыли в комплексном управлении.

Предложенный алгоритм нагрева материалов в АСУТП печи конвективного нагрева позволит ожидать нужных температурных показателей слябов на основе предварительно или интерактивно проводимых расчетов необходимой температуры греющего газа и своевременной регулировки нагревателей. Специалисты ООО «КраМЗ» подтверждают необходимость использования нового алгоритма для локальных АСУТП печей нагрева.

На основе автоматизированной системы научных исследований разработан программный продукт «Виртуальная лаборатория теплотехники», позволяющий проводить научные исследования поведения металлургических объектов, использовать результаты статистических и динамических решений как прогнозы для принятия правильных решений в штатных и нештатных ситуациях. Данный программный продукт внедрен в Сибирском федеральном университете в качестве автоматического обучающего комплекса.

Положения, выносимые на защиту:

1. Сравнительные расчеты двумя моделями теплопередачи через бортовую стенку электролизера с разными свойствами футеровки и гарнисажа показывают, что новая модель лучше учитывает инерционность объекта, чем используемая сейчас в АСУТП электролиза.

2. Разработанный алгоритм для расчета температур слоев футеровки и гарнисажа позволяет лучше оценить теплотери электролизером в окружающую среду и соответственно правильно рассчитать вольт-добавки.

3. Предложенная модель нагрева материалов в конвективной печи и новый алгоритм управления печью на ее основе позволяют выдерживать заданные температурные показатели перегрева слитков.

4. Разработанная АСНИ позволяет проводить исследования тепловых откликов печей, как объектов управления, с различными конструктивными особенностями, при различных воздействиях.

Методы исследований. Для решения поставленных задач были использованы следующие методы: математическое моделирование; теория теплопередачи; численные методы для решения уравнений в частных производных; численные и аналитические методы для решения обыкновенных дифференциальных уравнений.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов исследований подтверждается: совпадением результатов применения классических уравнений для решения задач и предложенных математических моделей; достаточной сходимостью теоретических и экспериментальных исследований.

Апробация диссертационной работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных, всероссийских научно-технических и научно-практических конференциях:

XVII Международной научной конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. Секция «Математические методы моделирования, управления и анализа данных». – Красноярск, 2013г.;

Международная научно-практическая конференция «Стратегические направления развития науки, образования, технологий». – Белгород, 2017г.;

VIII, X-ой Всероссийской научно – технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «МОЛОДЁЖЬ И НАУКА». Секция «Цветные металлы». – Красноярск, 2012г., 2013г., 2014г.;

Третья международная научная конференция «INDUSTRY 4.0» – Варна, Болгария, 2018г.;

Шестая всероссийская конференция «Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений». – Уфа – Ставрополь, 2018г.;

На семинаре профессора Полякова П.В.

Также на ежегодных научных семинарах кафедры Автоматизации производственных процессов в металлургии (2012 – 2017гг.)

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе 5 работ в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ для публикации основных научных результатов, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 141 наименование; содержит 145 страниц машинописного текста, 45 рисунков, 18 таблиц и 2 приложения на 15 страницах машинописного текста.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность и формулируется цель диссертационной работы, а также предлагается последовательность задач для достижения поставленной цели. Указывается научная новизна, практическая значимость работы и методы исследований, сведения об апробации и использовании на производстве результатов работы.

В первой главе проводится обзор методологии алгоритмизации металлургических объектов для задач АСУТП, математических методов описания различных способов передачи тепла и решения задач с фазовыми переходами, а также обзор различных программных продуктов для моделирования теплообменных процессов.

В соответствии с представленной в главе методикой моделирования теплотехнического объекта для задач управления выделены зоны, нуждающиеся в рассмотрении, с точки зрения энергосбережения для всех металлургических аппаратов. Исходя из этого, актуальными задачами исследования являются разработки моделей отмеченных теплообменных систем для использования в алгоритмах АСУТП разного уровня.

Во второй главе представлены способы управления тепловым балансом алюминиевого электролизера. Рассмотрен новый метод энергосбережения, заключающийся в сборе бортовых теплопотерь теплообменником. Разработаны модели и разностные схемы, пригодные для использования в АСУТП для управления тепловым балансом и стабилизации формы рабочего пространства.

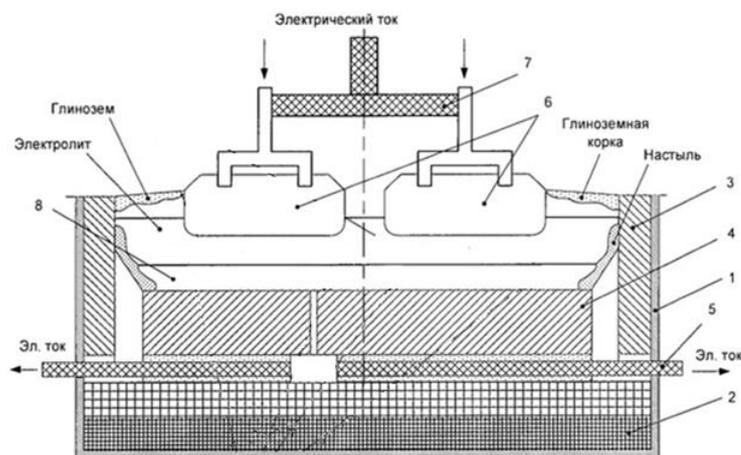


Рисунок 2.1 – Разрез алюминиевого электролизера

(1 – металлический кожух, 2 – теплоизоляция, 3 – торцевые углеродистые блоки, 4 – подовые углеродистые блоки, 5 – катодная шина, 6 – обожженные аноды, 7 – анодная шина, 8 – расплавленный алюминий)

Теплопотери алюминиевого электролизера в окружающую среду распределяются следующим образом – примерно 10% днищем, 50% верхом электролизера (анодами и укрытием) и 40% бортами электролизера. При оперативных воздействиях, меняются в основном теплопотери в борт, теплопотери верхом и низом электролизера могут быть изменены значительными ручными вмешательствами либо авариями. Поэтому для задач автоматического управления электролизерами важным является рассмотрение динамики бортовых теплопотерь, с учетом плавления – кристаллизации застывшего на внутренней поверхности борта электролита. Далее везде будем называть слой застывшего электролита гарнисажем.

В главе проводилось сравнение расчетов нульмерной модели теплопередачи через бортовую футеровку, которая уже используется в алгоритмах управления компании РУСАЛ и новой одномерной модели теплопередачи через борт и поведения гарнисажа.

Стационарное состояние исследуемого объекта для нульмерной и одномерной моделей определяется одинаково по методике, представленной в диссертации в главе 1.

Нульмерная модель теплообмена и динамического расчета толщины гарнисажа основана на балансовых уравнениях для определения средних температур слоев футеровки:

$$m \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} = Q_{\text{вх}} - Q_{\text{вых}},$$

и разностном уравнении определения толщины гарнисажа:

$$\delta_{n+1} = 0,5 \cdot \left(\delta_n - \frac{dt \cdot \alpha_1 \cdot (T_0 - T_1)}{\rho_n \cdot L_n} \right) + \sqrt{0,25 \cdot \left(\delta_n - \frac{dt \cdot \alpha_1 \cdot (T_0 - T_1)}{\rho_n \cdot L_n} \right)^2 + \frac{dt \cdot \lambda_n \cdot (T_1 - T_2)}{\rho_n \cdot L_n}}$$

где δ_n – толщина гарнисажа в данный момент времени; α_1 – коэффициент внутренней теплоотдачи; λ_n , ρ_n – коэффициенты теплопроводности и плотность гарнисажа; L_n – удельная теплота плавления гарнисажа; T_0 – температура расплава; T_1 – температура ликвидуса; dt – шаг по времени; T_2 – температура границы гарнисаж – угольный блок.

Для повышения точности определения изменений толщины гарнисажа и распределения температур по сечению стенки разработана и реализована одномерная модель.

На рисунке 2 представлена структурная схема стенки с гарнисажем для модели в частных производных.

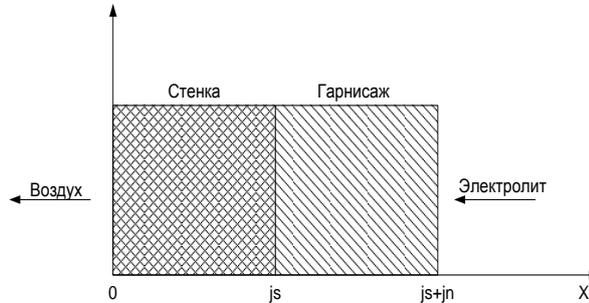


Рисунок 2 – Структурная схема стенки с гарнисажем

Считая жидкую и твердую фазы однородными средами с постоянными теплофизическими характеристиками, рассмотрим внутри каждого слоя уравнения теплопроводности:

$$\text{стенка} - \frac{\partial T}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; a_1 = \frac{\lambda_1}{c_1 \cdot \rho_1}; \text{гарнисаж} - \frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho};$$

где a, a_1 – коэффициенты температуропроводности слоев.

На границе катодный кожух – воздух рассматривается граничное условие третьего рода:

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x}(0, t) = h_1(T) \cdot (T(0, t) - T_{air}(t))$$

На границе раздела стенка – настыль ($j=js$) должны выполняться условия сопряжения:

$$T(x_{js} - 0, t) = T(x_{js} + 0, t) - \text{условие непрерывности температуры};$$

$$\lambda(x_{js} - 0) \frac{\partial T}{\partial x}(x_{js} - 0, t) = \lambda(x_{js} + 0) \frac{\partial T}{\partial x}(x_{js} + 0, t) - \text{условие непрерывности теплового потока}.$$

На границе электролит – гарнисаж выполняется условие Стефана:

$$\rho Q \frac{d\delta_g}{dt} = \lambda \frac{\partial T}{\partial x}(x_{js+jn}, t) - \alpha_{bath}(T_{bath}(t) - T_{liq}(t)).$$

где Q – удельная теплота плавления, $\delta_g(t)$ – толщина гарнисажа на каждом шаге по времени, T_{liq} – температура ликвидуса и T_{bath} – температура расплава.

На поверхности гарнисажа всегда выполняется условие:

$$T(x_{js+jn}, t) = T_{liq}(t)$$

Разностная схема для стенки с гарнисажем записывается в виде:

$$\lambda_1 \frac{T_1^{k+1} - T_0^{k+1}}{hx} - h_1(T_0^{k+1} - T_{air}) = \frac{1}{2} c_1 \rho_1 hx \frac{T_0^{k+1} - T_0^k}{\Delta t};$$

$$\frac{T_j^{k+1} - T_j^k}{\Delta t} = a_1 \frac{T_{j+1}^{k+1} - 2T_j^{k+1} + T_{j-1}^{k+1}}{hx^2}; j = \overline{1, js-1}; a_1 = \frac{\lambda_1}{c_1 \rho_1};$$

$$\lambda_1 \frac{T_{js}^{k+1} - T_{js-1}^{k+1}}{hx} = \lambda \frac{T_{js+1}^{k+1} - T_{js}^{k+1}}{hx};$$

$$\frac{T_j^{k+1} - T_j^k}{\Delta t} = a \frac{T_{j+1}^{k+1} - 2T_j^{k+1} + T_{j-1}^{k+1}}{hx^2}; j = \overline{js+1, jn+js}; a = \frac{\lambda}{c \rho}.$$

Полученная система разностных уравнений решается методом прогонки, основанном на предположении, что искомые неизвестные связаны рекуррентным соотношением:

$$T_j^{k+1} = \alpha_j T_{j+1}^k + \beta_j.$$

Таким образом, для решения разностной схемы нам необходимо знать α_j , β_j кроме последнего, крайнюю правую точку – температура в ней всегда равна T_{liq} и неизвестно ее расположение.

$$\text{граница стенки: } \alpha_0 = \frac{2f_1}{1+2f_1(1+b)}; f_1 = a_1 \cdot \Delta t / (hx)^2; \beta_0 = \frac{2f_1 b T_{air} + T_0^k}{1+2f_1(1+b)}; b = \frac{h_1 hx}{\lambda_1}.$$

$$\text{стенка: } \alpha_j = \frac{f_1}{1+f_1(2+\alpha_{j-1})}; \beta_j = \frac{T_j^k + f_1 \beta_{j-1}}{1+f_1(2+\alpha_{j-1})}; j = \overline{1, js-1}.$$

$$\text{граница стенка-гарнисаж: } \alpha_{js} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_1}{\lambda} (1 + \alpha_{js-1})}; \beta_{js} = \frac{\frac{\lambda_1}{\lambda_1} \beta_{js-1}}{1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_1} (1 - \alpha_{js-1})}.$$

$$\text{гарнисаж: } \alpha_j = \frac{f}{1+f(2+\alpha_{j-1})}; f = a \cdot \Delta t / (hx)^2; \beta_j = \frac{T_j^k + f \beta_{j-1}}{1+f(2+\alpha_{j-1})}; j = \overline{js+1, js+jn-1}.$$

Найдем прирост гарнисажа на основании уже рассчитанных температур:

$$\Delta \delta_n = \frac{\Delta t}{\rho Q} [-\alpha_{bath} (T_{bath}^k - T_{liq}^k) + \frac{\lambda}{hx} (T_{liq}^k (1 - \alpha_{js-jn-1}) + \beta_{js+jn-1})]$$

Определим Δt при котором $\Delta \delta_n = hx$, то есть изменение толщины гарнисажа равно шагу по координате:

$$\Delta t = \frac{\rho Q hx}{\left[-\alpha_{bath} (T_{bath}^k - T_{liq}^k) + \frac{\lambda}{hx} (T_{liq}^k (1 - \alpha_{js-jn-1}) + \beta_{js+jn-1}) \right]}$$

На рисунке 3 представлена блок-схема алгоритма, разработанного для определения динамических изменений толщины застывшего слоя и температурного распределения в слоях. Алгоритм реализован на языке программирования C++.

Проведено сравнение расчетов изменения температур и поведения гарнисажа при воздействиях двумя вышеописанными методами.

За исходные данные взяты два варианта футеровки алюминиевых электролизеров (угольный блок теплопроводностью 7, карбидокремниевый блок теплопроводностью 25) и два различные по свойствам гарнисажа (гарнисаж №1 с теплопроводностью 1, гарнисаж №2 с теплопроводностью 2).

Воздействия выполнялись мгновенным изменением температуры ликвидуса расплава или температурой самого расплава. В реальной технологии воздействия осуществляются добавками сырья, или изменениями падения напряжения или силы тока на ячейке, но указанные воздействия температурами также могут иметь место, например, при анодном эффекте. Кроме того, необходимо было сравнить два различных расчетных алгоритма, без технологии. Результаты сравнения моделей представлены в таблице 1.

В столбцах 2 и 3 таблицы 1 приведены результаты воздействия повышением температуры ликвидуса на 5°C. Видно, что обе модели дают увеличение толщины гарнисажа и снижение температуры наружной поверхности борта электролизера. То же самое происходит и в реальной технологии при изменении химического состава расплава, приводящего к повышению температуры ликвидуса. При этом одномерная модель (УЧП), дает прирост толщины гарнисажа на 1,5-3 см больше (в зависимости от футеровки), чем нульмерная модель (ОДУ), и снижение температуры наружной поверхности больше на 50 градусов, что дает значительное снижение отходящего теплового потока и свидетельствует об утеплении электролизера. Время переходного процесса увеличивается на 65% и достигает 7 суток, что может иметь место в электролизерах с большими гарнисажами.

В столбцах 4 и 5 воздействие осуществлялось повышением температуры расплава на 5°C , то есть увеличением входного потока в гарнисаж. При этом по модели УЧП, в случае с угольным блоком, гарнисаж расплавился полностью, и время переходного процесса оказалось меньше, чем у модели в ОДУ. В случае карбидкремниевом блока гарнисаж расплавился не полностью, но больше, чем в модели ОДУ.

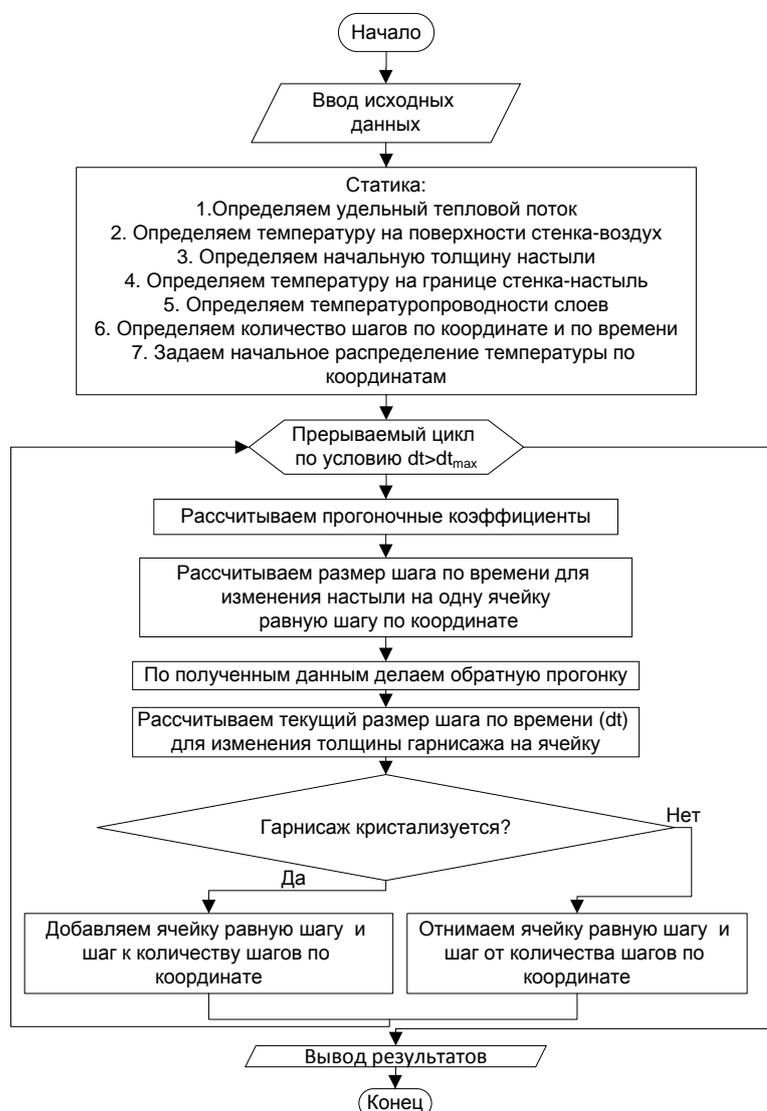


Рисунок 3 – Блок схема алгоритма расчета температур слоев футеровки и определением толщины гарнисажа

Тенденция большего проплавления бортового гарнисажа позволяет сделать выводы о необходимости меньших затрат энергии, чем ранее предполагалось по модели ОДУ, например при необходимости нагрева расплава, так как излишне подведенная энергия из-за высоких температур борта будет потеряна в окружающую среду.

Важным моментом для принятия решения об увеличении или снижении напряжения в автоматическом управлении тепловым балансом электролизера является правильное определение инерционности электролизера, графиков переходных процессов. На рисунке 4 приведено сравнение расчетных графиков снижения температур наружной поверхности футеровки, то есть графиков изменения теплопотерь в окружающую среду в течение 7 часов при воздействии увеличением температуры кристаллизации. Видно, что модель в частных производных дает участок длиной примерно в полтора часа, при котором температура наружной стенки не меняется. Это означает, что при потере энергии (например, в случае аварии на подстанции), расплав охлаждается медленнее, чем рассчитывали ранее по нульмерной модели.

Новая модель была внедрена в программу «Виртуальный электролизер», эксплуатируемую на РУСАЛе, новым блоком вместо процедуры расчета динамики гарнисажа в ОДУ. С помощью модернизированной программы были выполнены расчеты вольт-добавок для алгоритма управления тепловым балансом для нескольких типов электролизеров РУСАЛа. Рассчитанные добавки используются в управлении электролизерами ОА-120 (ОАО КраЗ).

Таблица 1– Результаты сравнения моделей ОДУ и УЧП

Метод	ОДУ	УЧП	ОДУ	УЧП
Материалы стенки	Гарнисаж №1, карбидокремниевый блок	Гарнисаж №1, карбидокремниевый	Гарнисаж №1, угольный блок	Гарнисаж №1, угольный блок
Воздействие	Увеличение температуры ликвидуса на 5 градусов		Увеличение температуры расплава на 5 градусов	
Начальная толщина гарнисажа, м	0,052	0,052	0,031	0,031
Конечная толщина гарнисажа, м	0,135	0,146	0,005	0,001
Время переходного процесса, ч	65,2	103,3	58,3	53,6
Температура поверхности, °С	237,9	188,2	440,9	519,9
Материалы стенки	Гарнисаж №2, карбидокремниевый блок	Гарнисаж №2, карбидокремниевый блок	Гарнисаж №2, угольный блок	Гарнисаж №2, угольный блок
Начальная толщина гарнисажа, м	0,103	0,103	0,062	0,062
Конечная толщина гарнисажа, м	0,27	0,291	0,0103	0,0004
Время переходного процесса, ч	115,3	179,8	61,1	52,2
Температура поверхности, °С	238,0	189,3	440,9	520

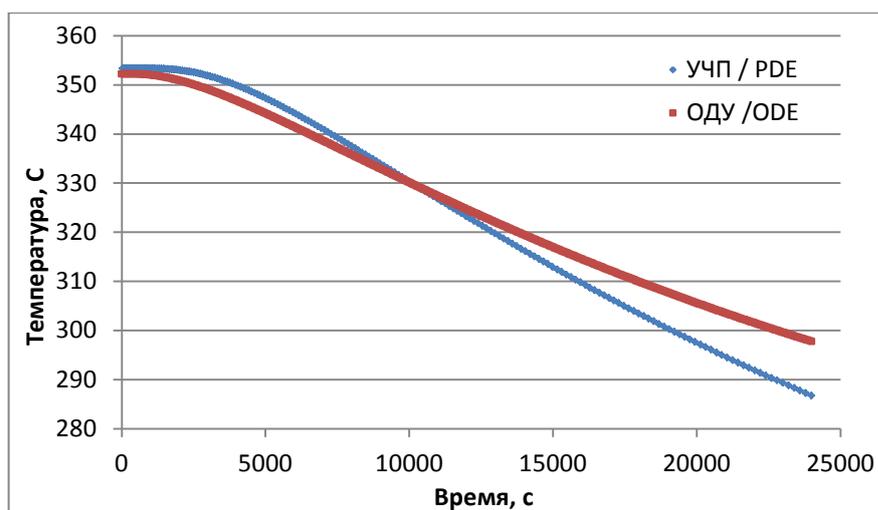


Рисунок 4 – расчеты снижения температуры наружной поверхности электролизера двумя моделями (настыль №1, угольный блок), при изменении температуры ликвидуса на +5 градусов

В настоящее время активно проводятся испытания различных конструкций теплообменников на бортовой футеровке лабораторных электролизеров. Эти устройства предназначены как для сбора теплотерь, так и для сохранения тепла в электролизере в случае коммерческого снижения силы тока. При этом эксплуатация таких установок на

промышленных электролизерах невозможна без единой системы управления этой установкой и электролизером, так как внутренние воздействия в виде изменения силы тока, напряжения и внешние в виде изменения температуры и скорости подачи охлаждающей среды должны быть взаимосвязаны для стабильного состояния электролизера. Система управления должна содержать математическую модель процесса с изложенной выше одномерной моделью для пересчета в режиме реального времени температур футеровки и толщины гарнисажа.

Предлагаемая схема модернизации представлена на рисунке 5 и содержит наряду с обычными алгоритмами алгоритм стабилизации гарнисажа для управления установкой бортовой рекупирации.

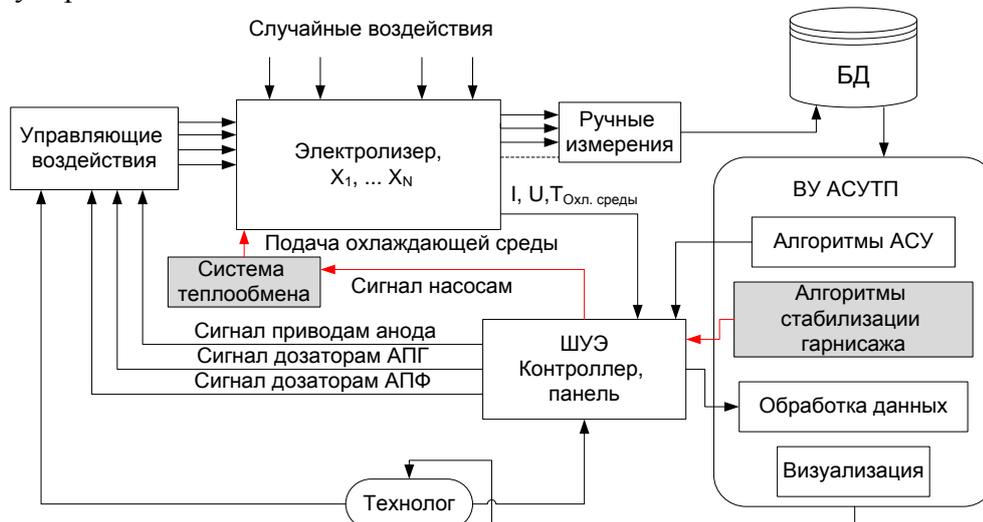


Рисунок 5 – Модернизированная схема управления алюминиевым электролизером

В третьей главе представлена упрощенная модель и алгоритм нагрева материалов в печи скоростного конвективного нагрева. Модель построена на обыкновенных дифференциальных уравнениях и позволяет при работе в составе АСУТП рассчитывать скорости и режимы нагревов, оценивать равномерности нагревов слитков для предоставления этих данных оператору, либо для автоматического принятия решения об изменении подводимой мощности или изменении времени нагрева.

Для тестирования и определения границ применения, расчеты по разработанной модели в обыкновенных дифференциальных уравнениях сравнивались с расчетами по эталонной модели В.А. Арутюнова, В.В. Бухмирова, С.А. Крупенникова, основанной на нестационарном уравнении теплопроводности. Рассматривался нагрев материалов с высокой и низкой теплопроводностью.

Для частных случаев нагрева тел простейшей формы (бесконечная пластина, бесконечный цилиндр, шар) при граничных условиях третьего рода имеются аналитические решения в виде рядов. Также в металлургической теплотехнике для определения температур поверхностей и центра слябов пользуются наборами специальных графиков для безразмерных температур в зависимости от критерия Био (Bi) и числа Fo . Для алгоритмов автоматического управления нагревом металла в условиях изменения режимов набор графиков или аналитические решения уравнений в частных производных не подходят не только в связи с громоздкостью, но также и с непригодностью этих решений при динамических воздействиях.

Рассмотрим разработанную модель. Сляб по сечению (половина сечения) разбит на 2 зоны, основная (толстый слой) и пограничная (тонкий слой) (рисунок 6).



Рисунок 6 – Схематичный рисунок сляба, разбитого на участки $0 \leq u \leq \delta - \epsilon$ (толстый слой) и $\delta - \epsilon \leq u \leq \delta$ (тонкий слой)

Следующие уравнения определяют средние температуры в областях $0 \leq y \leq \delta - \varepsilon$ и $\delta - \varepsilon \leq y \leq \delta$ и среднюю температуру всего тела:

$$\begin{cases} (\delta - \varepsilon) \cdot c \cdot \rho \cdot \frac{d\bar{T}_1}{dt} = k_{1-2} \cdot (\bar{T}_2 - \bar{T}_1) \\ \varepsilon \cdot c \cdot \rho \cdot \frac{d\bar{T}_2}{dt} = \alpha \cdot (T_0 - \bar{T}_2) - k_{1-2} \cdot (\bar{T}_2 - \bar{T}_1) \end{cases};$$

$$\bar{T}_{cp} = \frac{(\delta - \varepsilon) \cdot \bar{T}_1 + \varepsilon \cdot \bar{T}_2}{\delta}$$

$$\bar{T}_1(0) = \bar{T}_1^0, \quad \bar{T}_2(0) = \bar{T}_2^0$$

где \bar{T}_1 – средняя температура сляба на участке $0 \leq y \leq \delta - \varepsilon$, \bar{T}_2 – средняя температура сляба на участке $\delta - \varepsilon \leq y \leq \delta$, \bar{T}_{cp} – средняя температура сляба на участке $0 \leq y \leq \delta$, $k_{1-2} = 2 \cdot \lambda / \delta$ – коэффициент теплопередачи, λ – теплопроводность тела, c – теплоемкость тела, δ – толщина тела, ρ – плотность тела, ε – толщина тонкого слоя, α – коэффициент теплоотдачи, T_0 – температура греющей среды.

Система уравнений с начальными условиями решалась аналитически. Аналитическое решение получено путем сведения системы уравнений к неоднородному уравнению второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$\frac{d^2 \bar{T}_1}{dt^2} + b_1 \frac{d\bar{T}_1}{dt} + b_2 \bar{T}_1 = b_2 T_0,$$

где $b_1 = \frac{\alpha}{a_2} + k_{1-2} \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} \right)$, $b_2 = \frac{\alpha \cdot k_{1-2}}{a_1 \cdot a_2}$, $a_1 = (\delta - \varepsilon) \cdot c \cdot \rho$, $a_2 = \varepsilon \cdot c \cdot \rho$.

Решение запишется в виде:

$$\begin{cases} \bar{T}_1 = A \cdot e^{\lambda_1 t} + B \cdot e^{\lambda_2 t} + T_0 \\ \bar{T}_2 = \bar{T}_1 + \frac{a_1}{k_{1-2}} \cdot (\lambda_1 \cdot A \cdot e^{\lambda_1 t} + \lambda_2 \cdot B \cdot e^{\lambda_2 t}) \end{cases},$$

где

$$\lambda_{1-2} = \frac{b_1 \pm \sqrt{b_1^2 + 4b_2}}{2}, \quad A = \frac{k_{1-2} \cdot (\bar{T}_2^0 - \bar{T}_1^0) - \lambda_2 \cdot (T_0 + \bar{T}_1^0)}{\lambda_1 - \lambda_2}, \quad B = \bar{T}_1^0 - T_0 - A.$$

Аналитическое решение удобно для быстрого анализа зависимостей необходимых времен нагрева от свойств материала, а также для использования непосредственно в управляющем контроллере одноуровневого АСУТП.

Исходные данные для тестового расчета приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Исходные данные для сравнительного расчета нагрева сляба

Переменная	ср	а	δ₁	ε	δ	к₁₋₂
Значение переменной	4375000	350	0,064	0,016	0,08	700
Единицы измерения	Дж·кг/(К·м ³)	Вт/(м ² ·К)	м	м	м	Вт/(м ² ·К)
Переменная	t	dt	T₀	λ	a	T_{нач}
Значение переменной	4800	16	2000	28	0,0000064	1100
Единицы измерения	с	с	К	Вт/(м·К)	м ² /с	К

Расчеты по эталонной модели, содержащей уравнения в частных производных (УЧП) проводились по явной четырехточечной схеме. По разработанным компьютерным программам

проведена серия расчетов и выполнен сравнительный анализ полученных результатов. Смоделирована ситуация, когда тело помещается в горячую печь.

На рисунке 7 приведены расчеты средней температуры сляба ранее отмеченными способами при исходных данных из таблицы 2. Введены обозначения: модель УЧП – эталонная модель, модель ОДУ – авторская модель.

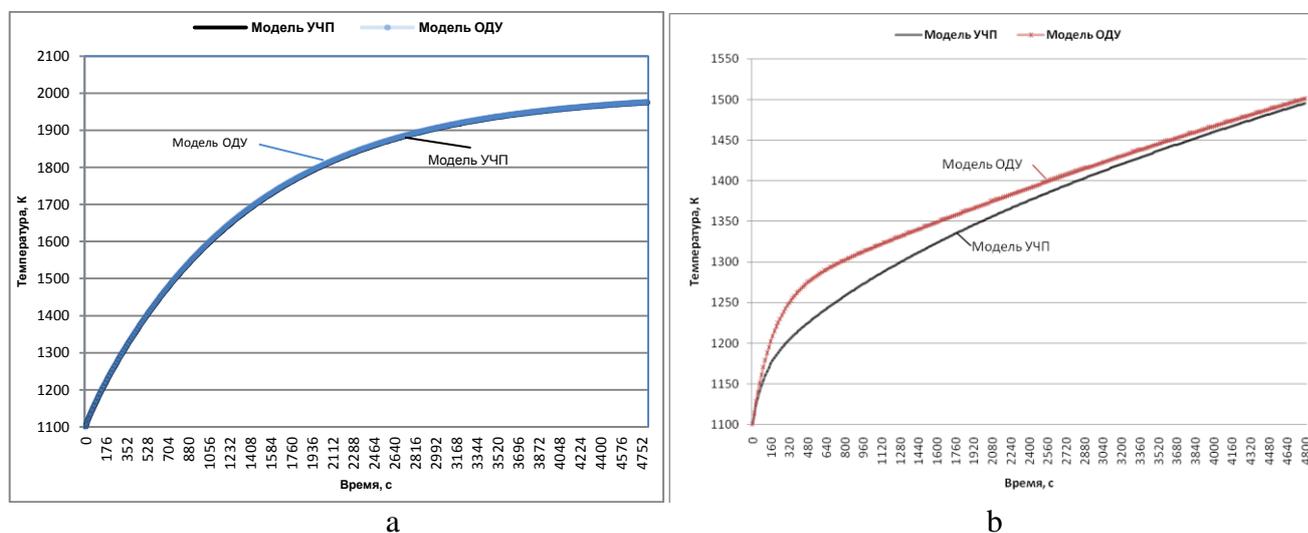


Рисунок 7 – Результаты сравнительных расчетов средней температуры сляба (а – при высокой теплопроводности материала, б – при низкой теплопроводности материала)

Из рисунка 7а видно, что решения практически совпадают и имеют отличия не более 3 градусов. На 480 секунде с начала нагрева средняя температура сляба по эталонной модели составляет 1380,3, а по предложенной модели составляет 1382,2, при $\epsilon=0,016$.

На рисунке 7б наблюдается разница в расчетах эталонной модели и предложенной при низкой теплопроводности нагреваемого материала ($\lambda=1$). На 480 секунде нагрева эталонная модель дает температуру 1224,9, а предложенная модель температуру 1274,8. В этом случае за расчетное время в 4800 сек, нагрев еще не вышел на стационарный режим, однако уже можно наблюдать схождение расчетов по двум моделям. Тело разогревается до максимальной температуры, нагрев выходит на стационарный режим после 50 000 секунд с начала нагрева.

Следует отметить, что теплопроводности металлов не бывают ниже значения 15 Вт/(м·К). Случай с низкой теплопроводностью рассмотрен для выяснения границ применения модели. Проведенный «спор моделей» позволяет сделать вывод о том, что авторская модель ОДУ применима к объектам, обладающим достаточно высокой теплопроводностью, каковыми являются все металлы. При практическом использовании модели в алгоритмах осуществляется дополнительная «подстройка» за счет коэффициентов теплообмена.

Для разработки алгоритма управления проведен численный эксперимент. Был запрограммирован экспериментальный закон изменения температуры воздуха в печи (показан на верхних графиках рисунка 8), заключающийся в том, что для разных диапазонов температур в печи скорости нагрева и охлаждения среды различны. В качестве нагреваемых материалов рассматривались алюминиевый, стальной и титановый слябы.

Проведен расчет переменных процесса гомогенизации алюминиевых пластин в конвективной печи. Графики переходных процессов изменения температур в печи, поверхности сляба и средней температуры толстого слоя, представлены на рисунке 8.

На рисунках показано, как программой с заданными скоростями менялась температура воздуха в печи до момента достижения рабочей температуры. Параллельно нагреву печи происходил нагрев поверхности и центра тела. Существенные различия между переходными процессами вызваны теплофизическими характеристиками материалов. Так, например, у алюминиевого сляба за счет высокой теплопроводности и теплоемкости, низкой плотности алюминия перепад температур между поверхностью и центром тела не превышал 3°C. А при нагреве титанового сляба, переходные процессы которого показаны на рисунке 8б,

максимальный перепад температур составлял около 50°C , и постепенно снижался до 5°C . Это объясняется тем, что титан обладает низкой теплопроводностью и теплоемкостью, но более высокой плотностью относительно алюминия. Также видно, что при заданных температурах процесс перерегулирования происходит только при нагреве титанового сляба.

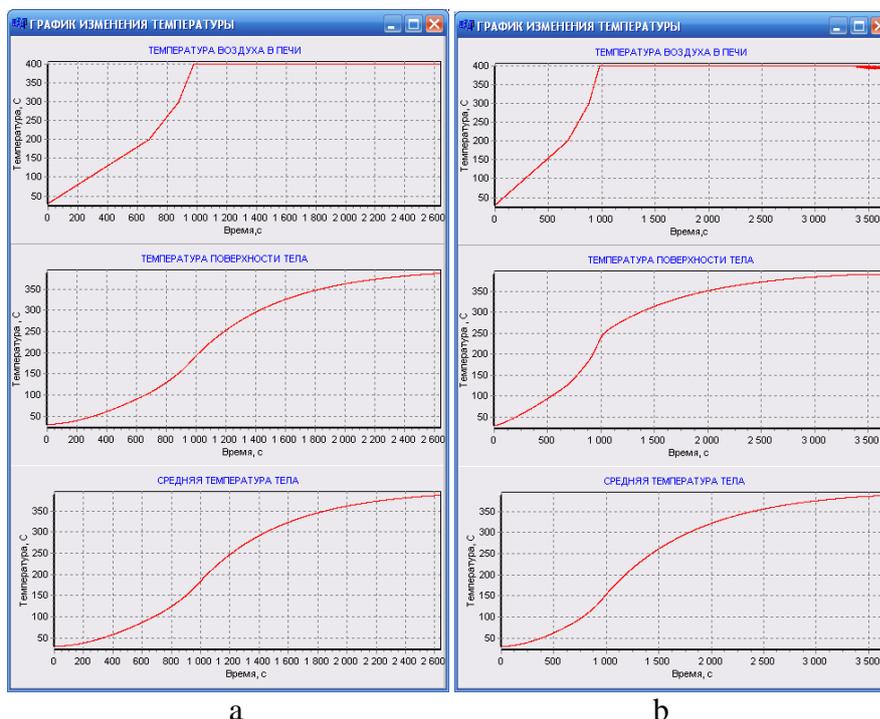


Рисунок 8 – Интерфейс программы с переходными процессами температур в разных точках объекта (а – алюминиевый сляб, б– титановый сляб)

Время нагрева до заданных температур составило около 45 минут для алюминиевого сляба и около часа для титанового, далее температуру печи устанавливают согласно регламенту на несколько градусов ниже заданной температуры поверхности и выдерживают несколько часов, до достижения необходимых температур по всей толщине сляба.

В настоящее время регулирование осуществляется отдельными ПИД регуляторами на каждый нагревательный элемент в печи в соответствии с показаниями термопары, установленной возле этого элемента – рисунок 9. Предлагаемая схема управления включает в себя ПК или ПЛК с предустановленным алгоритмом управления, содержащим модель, которая позволяет определять температуру на поверхности сляба и в его центре.

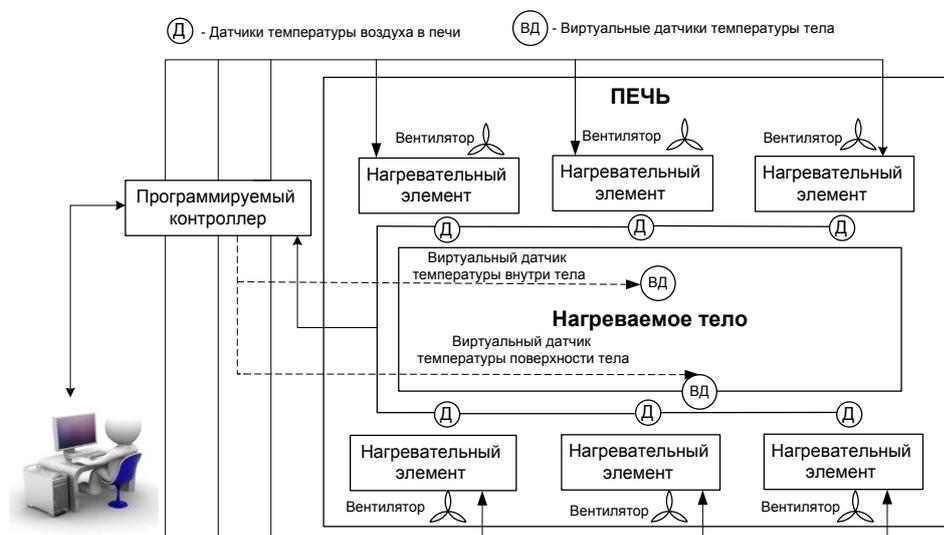


Рисунок 9 – Многоканальное регулирование

Алгоритм управления заключается в переопределении искомых температур на каждом временном шаге при подаче воздействий. При достижении поверхностью тела заданного значения температуры ($T_{з.п.}$) автоматически происходит запуск цикла управления нагревателями, который прерывается, когда расчетная температура середины тела ($T_{з.ц.}$) достигнет заданного значения, обусловленного показателями качества для готового продукта.

Предлагаемый алгоритм управления, представленный на рисунке 10, позволяет регулировать температуру воздуха в печи, исходя из заданных значений поверхности и середины сляба.

Следует отметить, что программа позволяет рассчитывать температуру тела и регулировать температуру воздуха в различных точках объекта, показанного на рисунке 9. Алгоритм может параллельно рассчитывать прогрев тела в разных точках и управлять температурой каждой зоны отдельно, но обеспечивая при этом равномерность температурного поля по всему объему садки.



Рисунок 10 – Алгоритм управления нагревом материалов в печи

Четвертая глава посвящена разработке и внедрению автоматизированной научно-исследовательской системы для использования в исследовательских задачах теплотехники и управления. Программное обеспечение реализовано в среде объектно-ориентированного программирования C++ Builder, имеет встроенную базу данных материалов. Структура программного комплекса представлена на рисунке 11.



Рисунок 11 – Структура программного комплекса

Автоматизированная система научных исследований содержит 3 раздела: автоматизированный подбор параметров и материалов футеровки металлургических аппаратов, исследование динамики теплообмена с фазовыми переходами и исследования переходных процессов при нагреве материалов в печи. Рассмотрим программы, входящие в разделы программного комплекса, интерфейс которых представлен на рисунке 12.

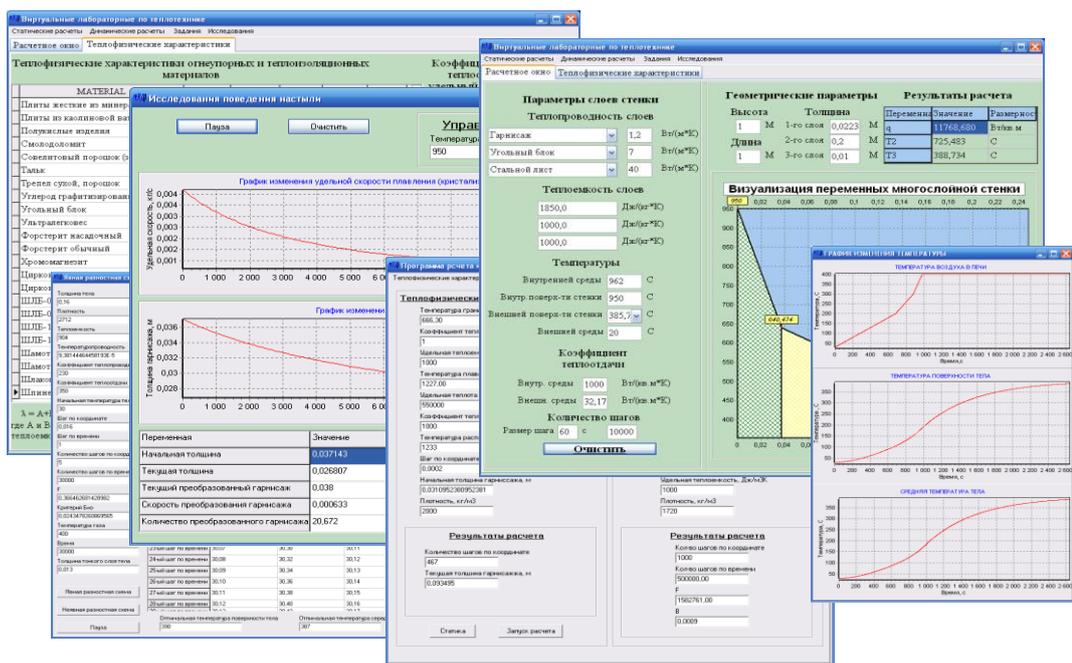


Рисунок 12 – Интерфейс программного комплекса

Программа подбора параметров футеровки, имеет следующие функциональные возможности: расчет теплового потока и распределения температур по толщине плоской многослойной стенки; подбор толщины слоя; расчет толщины; динамический расчет изменения распределения температур в слоях стенки при подаче различных воздействий.

Программа расчета скоростного конвективного нагрева материалов имеет следующие функциональные возможности: расчет переменных при нагреве сляба методом конечных разностей по явной или неявной схемам; расчет переменных при нагреве сляба методом обыкновенных дифференциальных уравнений; экспорт данных в MS Excel.

Программа по исследованию фазовых переходов имеет следующие функциональные возможности: определение начальных параметров и переменных в статике; расчет толщины

гарнисажа при задании граничных условий 3-го рода; динамический расчет изменения распределения температур в слоях стенки, при подаче различных воздействий; динамический расчет толщины гарнисажа на многослойной стенке, при изменении управляющего воздействия. экспорт данных в MS Excel.

По заключению специалистов ОАО «КраМЗ», разработанная АСНИ должна быть применена на производстве с привязкой к объекту и получением реальных данных, как для предварительной оценки конструктивных изменений печей, так и для интерактивных расчетов изменений нагрева материалов.

Представленный программный комплекс опробован в процессе обучения бакалавров и магистрантов института цветных металлов и материаловедения СФУ по направлениям «Металлургия», «Автоматизация технологических процессов и производств», «Управление в технических системах».

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В соответствии с методикой алгоритмизации теплотехнического объекта поставлены цели исследования, заключающиеся в моделировании теплообменных процессов, лежащих в основе качественных методов управления.

Для использования в алгоритмах управления тепловым балансом алюминиевого электролизера разработана новая динамическую модель теплопередачи через бортовую футеровку и гарнисаж алюминиевого электролизера с расчетом температурного распределения, с явным выделением фронта плавления. Разработан алгоритм и разностная схема для этой модели, проведена апробация путем сравнения результатов расчетов между двумя видами моделей при подаче управляющих воздействий. Проведены расчеты управляющих воздействий напряжением для алюминиевых электролизеров с использованием новой модели, результаты расчетов применены на практике, получено улучшение качества управления температурой расплава на 22% на электролизерах, использующих новые воздействия, а по показателю химического состава КО улучшение составило 25% .

Разработана модель нагрева материалов в печах конвективного теплообмена для использования в управляющих контроллерах с учетом теплопроводности нагреваемых материалов, скорости и температуры нагревающего газа. Проведена апробация модели путем сравнения результатов расчетов между двумя видами моделей. Разработан алгоритм управления с применением новой модели, предложена модернизация структуры АСУТП.

Разработана автоматизированная система научных исследований для моделирования теплопередачи конструктивными элементами и изучения динамического отклика переменных процесса в металлургических печах.

В целом разработана модельно-алгоритмическая платформа, позволяющая осуществлять управление алюминиевыми электролизерами с понижением расхода электроэнергии и управлять нагревом материалов в конвективных печах с поддержанием равномерного температурного поля в печи и выдерживанием требований к перегреву металла.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Портянкин, А.А. Учебно-консультационная компьютерная программа для изучения теплообменных процессов / А.А. Портянкин, С.М. Тинькова, Т.В. Пискажова // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. – 2016. – Т. 14, № 1. – С. 116 – 123.
2. Портянкин, А.А. Модель скоростного конвективного нагрева металла для использования в алгоритмах АСУТП / В.М. Белолипецкий, Т.В. Пискажова, А.А. Портянкин // Вестник СибГАУ. – 2016. – Т. 17, № 3. – С. 554 – 561.
3. Портянкин, А.А. Численная модель поведения гарнисажа в алюминиевом электролизере / В.М. Белолипецкий, Т.В. Пискажова, А.А. Портянкин // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 20, № 8. – С. 151 – 166.

4. Портянкин А.А. Модели нагрева материалов в печах конвективного теплообмена для решения задач автоматизации / В.М. Белолипецкий, Т.В. Пискажова, А.А. Портянкин Г.В. Зинченко // Автоматизация в промышленности. – 2017, №1 2. – С. 59 – 64.

5. Портянкин А.А. Автоматизированная система научных исследований в теплотехнике / А.А. Портянкин // Современные наукоемкие технологии. – 2018, №. – С.

Разработка, зарегистрированная в Реестре программ для ЭВМ РФ:

6. Учебно-консультационная программа для расчета и визуализации параметров и переменных многослойной стенки. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015613485 Красноярск, 2015.

Прочие публикации по теме диссертации:

7. Портянкин, А.А. Программно-алгоритмическое обеспечение для расчета и визуализации переменных процесса получения алюминия // Молодёжь и наука: Сборник материалов VIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, посвященной 155-летию со дня рождения К. Э. Циолковского [Электронный ресурс]. – Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2012. – Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2012/section03.html>. – Загл. с экрана.

8. Портянкин, А.А. Создание учебно-консультационной программы для расчета и визуализации параметров и переменных многослойной стенки: научное издание / А.А. Портянкин, С.М. Тинькова, Т.В. Пискажова // Решетневские чтения: материалы XVII Междунар. науч. конф.: в 2 ч. – 2013. - Ч. 2. – С. 249 – 251. – ISSN 1990 –7702.

9. Портянкин, А. А. Создание учебно-консультационного комплекса для решения задач теплотехники // Молодежь и наука: сборник материалов X Юбилейной Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 80-летию образования Красноярского края [Электронный ресурс]. – Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2014. – Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2014/directions.html>. – Загл. с экрана.

10. Портянкин, А.А. Разработка программного комплекса для решения задач теплотехники / А.А. Портянкин, Т.В. Пискажова, С.М. Тинькова // Образовательные ресурсы и технологии. – 2016. - № 2(14). – С. 60 – 66.

11. Портянкин, А.А. Виртуальная лаборатория теплотехники // Курсы: система электронного обучения СФУ [Электронный ресурс]. - Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2016. – Режим доступа: <https://e.sfu-kras.ru/course/view.php?id=7645>. – Загл. с экрана.

12. Портянкин, А.А. Алгоритм нагрева материалов в металлургической печи // Стратегические направления развития науки, образования, технологий : сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции в 4 ч. / Под общ. ред. Е. П. Ткачевой. – Белгород: ООО Агентство перспективных научных исследований (АПНИ), 2017. – Часть I. – 160 с.

13. Портянкин, А. А. Модельно-алгоритмическая платформа для управления тепловым балансом алюминиевого электролизера / Т.В. Пискажова, А.А. Портянкин // Третья международная научная конференция «INDUSTRY 4.0»: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. – Варна, Болгария, 2018. – Часть 2. – С.

14. Портянкин, А. А. Автоматизированная система научных исследований «Виртуальная лаборатория теплотехники» // Труды Шестой всероссийской конференции «Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений», Уфа-Ставрополь, Россия, 2018. – С. 135 – 140.