

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Сибирский федеральный университет»

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)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
Пискажова Т.В.

Красноярск – 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМИ ПЕЧАМИ. ОСОБЕННОСТИ И СПОСОБЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛЯ ЗАДАЧ АСУТП	12
1.1 Методология алгоритмизации металлургических объектов	14
1.2 Математические методы описания теплопередачи и задач с фазовыми переходами.....	17
1.3 Обзор программных средств для моделирования теплотехнических задач.....	28
ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ	34
ГЛАВА 2. УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМ БАЛАНСОМ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМИНИЯ	35
2.1 Получение алюминия	36
2.2 Существующие способы управления тепловым балансом электролизера. Фазовые переходы как нелинейная проблема	38
2.3 Моделирование поведения настыли в алюминиевом электролизере.....	44
2.4 Расчет начальных переменных футеровки алюминиевого электролизера .	50
2.5 Нульмерная (сосредоточенная) динамическая модель расчета поведения гарнисажа	54
2.6 Одномерная динамическая модель расчета поведения гарнисажа.....	56
2.7 Проведение исследований нульмерной и одномерной моделями и сравнительный анализ полученных результатов.....	64
2.8 Использование новой модели для расчета управляющих воздействий напряжением для энергоэффективных электролизеров	73
2.9 Стабилизация толщины бортовой настыли. Управление установкой рекупирации бортовых теплопотерь.....	77
ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ	83

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ НАГРЕВОМ МАТЕРИАЛОВ В ПЕЧАХ.....	84
3.1 Технология нагрева материалов в печах и обзор подходов к моделированию	84
3.2 Модель нагрева материалов в конвективных печах для АСУТП.....	88
3.3 Проведение исследований нагрева сляба разными расчетными методами и сравнительный анализ полученных результатов.....	94
3.4 Алгоритм управления печью на основе модели нагрева. Модернизация АСУТП печей нагрева	100
ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ	106
ГЛАВА 4. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТЕПЛОТЕХНИКИ.....	107
4.1 Понятия, характеристики и примеры применения автоматизированных систем научных исследований.....	108
4.2 Описание разработанного программного продукта	112
4.3 Автоматизированный подбор параметров и материалов футеровки металлургических аппаратов	115
4.4 Исследование переходных процессов при нагреве материалов в печи	120
4.5 Исследование динамики теплообмена с фазовыми переходами	122
4.6 Программа расчета изменения толщины гарнисажа в обыкновенных дифференциальных уравнениях	122
4.7 Программа расчета изменения толщины гарнисажа в частных производных по неявной четырехточечной схеме	124
4.8 Внедрение электронного обучающего курса «Виртуальная лаборатория теплотехники»	126
ВЫВОДЫ ПО ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ	129
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	130
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	131
ПРИЛОЖЕНИЕ А	145
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	149

ВВЕДЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена созданию моделей и алгоритмов управления процессами электролитического получения алюминия и нагрева слабов в конвективных печах, а также разработке автоматизированной системы научных исследований для повышения качества управления и снижения энергопотребления.

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, 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.Ј. 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 слэбов, 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°С меньше, чем у «свидетелей». По сопутствующему параметру КО у опытных электролизеров СКО на 0,02 единицы меньше, чем у «свидетелей». Подтверждается актом об использовании результатов исследования [Приложение А].

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 [Приложение А].

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 [Приложение А].

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 теплопотери 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, 2013 г.

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

VIII, X-ой Всероссийской научно-технической конференции студентов,

аспирантов и молодых учёных «МОЛОДЁЖЬ И НАУКА». Секция «Цветные металлы». – Красноярск, 2012 г., 2013 г., 2014 г.

Третья международная научная конференция "INDUSTRY 4.0"– Варна, Болгария, 2018 г.

Шестая всероссийская конференция "Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений", Уфа-Ставрополь, Россия, 2018г.;

На семинаре профессора Полякова П.В., а также на ежегодных научных семинарах кафедры Автоматизации производственных процессов в металлургии (2012 – 2018 гг.)

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ, в том числе 4 работы в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ для публикации основных научных результатов, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ и 8 публикаций в различных журналах и сборниках конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 141 наименование; содержит 144 страниц машинописного текста, 45 рисунков, 18 таблиц и 2 приложения на 16 страницах машинописного текста.

ГЛАВА 1. ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМИ ПЕЧАМИ. ОСОБЕННОСТИ И СПОСОБЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛЯ ЗАДАЧ АСУТП

Потребление энергоресурсов во всем мире стремительно растет. На фоне этого энергосбережение и энергетическая эффективность требуют все большего внимания со стороны производителей. Особую актуальность этот вопрос имеет в сфере металлургического производства, которое обычно является крайне энергозатратным. Данная проблема может быть решена за счет обновления оборудования, разработки энергосберегающих технологий, за счет внедрения алгоритмов управления. Так как обновление материальной базы требует больших вложений, не все производители имеют возможность полной модернизации и замены старого неэффективного оборудования. При этом алгоритмы управления позволяют снизить расход электроэнергии и обеспечить энергосбережение на старых устройствах при минимальных вложениях.

В настоящее время все более очевидной становится роль алгоритмов и компьютерных программ для решения комплекса технологических задач в области металлургии SCADA-уровня (Supervisory Control and Data Acquisition – сбор данных и диспетчерское управление) и MES-уровня (Manufacturing Execution Systems – системы управления технологией, производственными процессами) автоматизированных информационно-управляющих систем металлургических предприятий. Это определило потребность в разработке специализированного программного обеспечения, в основу которого может быть положен комплекс математических моделей, учитывающих как теорию тепло- и массообмена, законы сохранения энергии, физику и химию процесса, так и особенности влияния характеристик сырья на показатели производственного процесса. Одним из важнейших условий создания эффективных АСУ в металлургии является разработка содержательных математических моделей, которые должны строиться на основе понимания существа происходящих процессов, физики явлений,

имеющих место в том или ином процессе, при этом модели должны быть быстродействующими, чтобы осуществлять управление в реальном времени [1].

Пространственные модели зачастую не подходят для алгоритмов АСУТП, так как используемый математический аппарат настолько велик, что для расчетов необходимой переменной процесса требуется довольно длительное время, что в свою очередь исключает возможность использования таких моделей непосредственно в управлении. Поэтому разрабатываемые модели должны быть упрощены до пригодной точности определения переменных, а также должны разрабатываться различные численные и аналитические методы решения теплообменных задач для использования в АСУТП.

Основой построения энергосберегающих алгоритмов управления металлургическими печами следует считать понимание физики процесса, что включает в себя: знание конструкции и принципа работы печи; технологических требований и регламентов нагрева, свойств нагреваемых материалов, возможность химических реакций при нагреве.

При этом понимание зачастую приходит не только из изучения специальной литературы, но и при моделировании процесса, а также сравнении расчетов с экспериментами.

Составляющие эффективного управления следующие:

- Правильно подобранные и расставленные в нужных местах объекта датчики;
- Соответствующее задаче аппаратное обеспечение нижнего уровня (контроллер, промышленная сеть);
- Программное обеспечение верхнего уровня, включающее алгоритмы автоматического управления и интерфейс оператора.

При этом алгоритм управления может содержать модель внутри себя для постоянных предсказаний недостающей информации о процессе и для оптимизации решений, а также может быть записан в виде правил на основе предварительно проведенных расчетов.

1.1 Методология алгоритмизации металлургических объектов

Алгоритмизацией металлургических объектов для задач АСУТП является структурированное в виде схем или математических формул описание происходящих в объекте процессов, выделение зон управляемых реакций и параметров, определения взаимосвязей управляющих и управляемых параметров. Неотъемлемой составной частью алгоритмизации объекта является математическое моделирование.

Рассмотрим известные подходы к моделированию технологических процессов. Прежде всего, при постановке задачи следует определить техническую проблему, которую необходимо решить с помощью моделирования. Это может быть получение новых знаний о процессе, улучшение качества управления процессом, повышение его эффективности по конкретным параметрам.

Процесс постановки задачи часто бывает продолжительным и требует разносторонних знаний, не имеющих отношения к математике, т.е. знаний конструкции объекта, условий его эксплуатации, а также технологии самого процесса. Постановка задачи занимает половину всего времени создания модели. Выбор вида модели подразумевает, будет ли использоваться модель, основанная на законах физики, или модели, полученные на статистических зависимостях. Для задач оперативного управления считаем, что следует руководствоваться известной схемой академика Самарского, дополнив ее прикладными этапами, как в работе [2] (рисунок 1.1).

Необходимо, чтобы результаты расчетов сначала хотя бы качественно соответствовали измеренным значениям параметров. Количественного соответствия можно добиться корректировкой коэффициентов модели.

Зачастую возникают значительные трудности при проведении экспериментов на реальных объектах, поэтому при трактовке результатов, полезно опираться на «спор моделей» (использование моделей различного типа и сравнение расчетов по этим моделям), а также на экспертные оценки технологов.

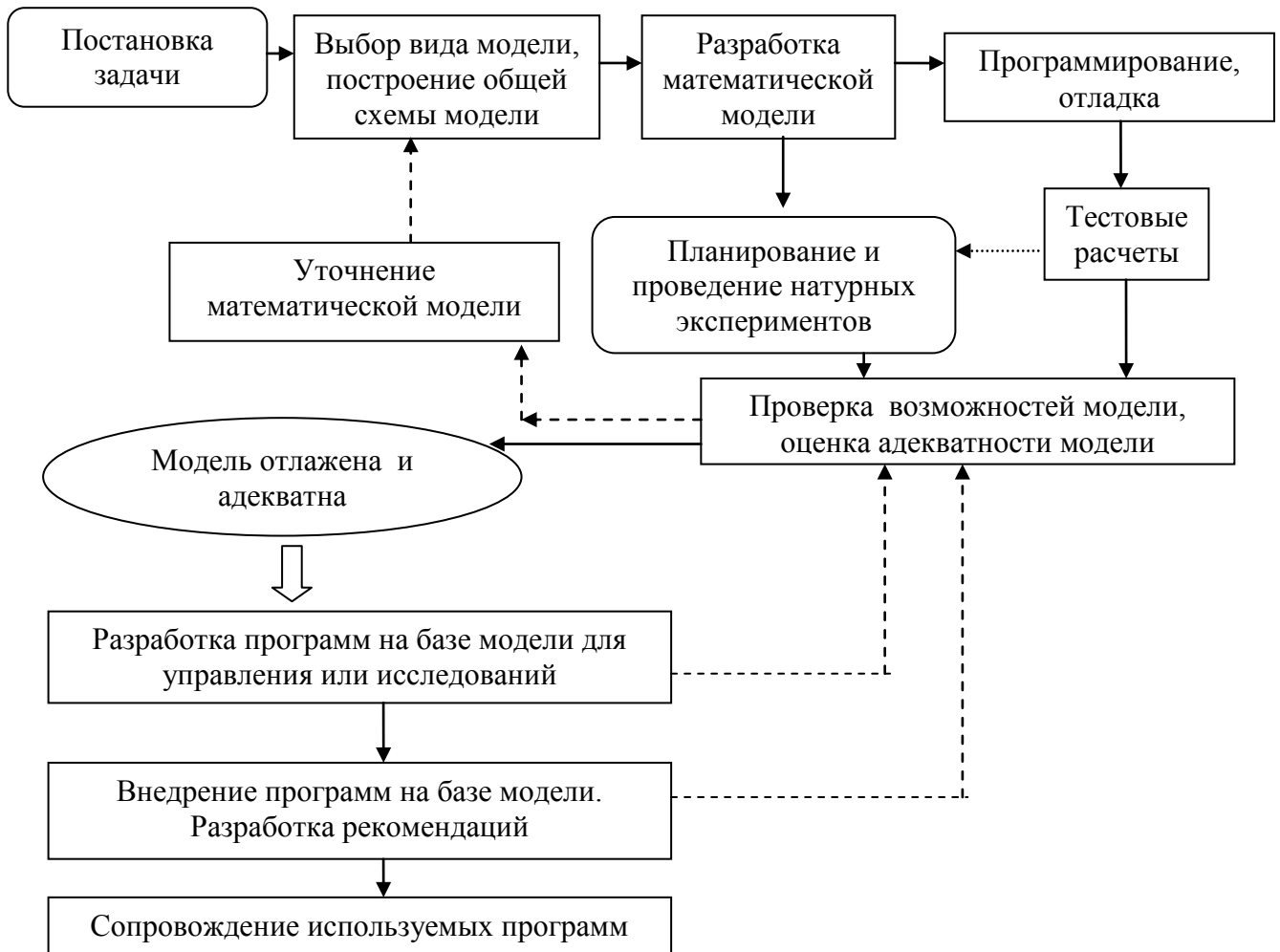


Рисунок 1.1 – Этапы разработки математической модели технологического процесса

После готовности модели происходит разработка программ, посредством которых модель будет использована. Это может быть интерфейс для проведения исследовательских расчетов на модели, программа для управления отдельными технологическими параметрами, расчетный комплекс для работы специалистов по моделированию разных вариантов ведения технологии. В любом случае после разработки и внедрения программ требуется их сопровождение как минимум на этапе опытной эксплуатации. Нельзя не согласиться с авторами [3], что только в процессе реализации рассчитанных рекомендаций или управляющих воздействий становится до конца ясным, насколько адекватной была модель, насколько обоснованы рекомендации.

При математическом моделировании энергетических установок академиками Мелентьевым Л.А. и Попыриным Л.С. был разработан системный подход [4, 5]. Как показано в работе, тепло-энергетические станции (ТЭС) могут являться предметом системного подхода, так как представляют собой технические системы, которые, с одной стороны, являются частью системы топливно-энергетического комплекса, определяющей цели и ограничительные рамки их сооружения и функционирования, с другой - сами объекты (ввиду технологического разнообразия отдельных установок) допустимо рассматривать как совокупность взаимосвязанных подсистем. Кроме того, расчетные теплоэнергетические задачи совпадают с целью системного подхода - выбрать наилучшие пути адаптации (приспособления) исследуемой системы к постоянно меняющимся и недетерминированным (не вполне определенно заданным) внешним условиям.

Основными этапами решения теплоэнергетических задач, положенных в основу проектных решений являются:

- выделение рассматриваемого объекта из общей системы топливно-энергетического комплекса;
- выявление внутренней структуры исследуемой ТЭС;
- формулирование в общем виде задачи математического моделирования;
- эквивалентирование (группировка) реальных элементов и связей объекта;
- определение состава задач применительно к каждой эквивалентной системе;
- выявление способов информационных взаимосвязей систем в рамках сконструированной иерархии объекта;
- построение комплекса математических моделей установок;
- установление соответствия достоверности результатов [6].

Методику моделирования теплотехнического объекта в металлургии для задач оперативного управления можно представить пятью шагами:

1. Схематизация трехмерного металлургического объекта на зоны, пригодные (выделенные по своим свойствам) для моделирования нульмерными или одномерными динамическими моделями;

2. Определение зон поглощения и выделения тепла, средств и способов теплопереноса, свойств футеровки;

3. Выделение объединяющего элемента в этом разложении в зависимости от задачи управления;

4. В соответствии с экспериментальными данными, экспертными мнениями и в зависимости опять же от задачи управления рассматривается теплообмен между всеми схематизированными областями или выделяются некоторые из них.

5. На основе принципов теплообмена в исследуемой зоне составляются уравнения динамического теплового баланса для систем обмена жидкость – газ, жидкость – жидкость, газ – твердое тело, расплав – твердое тело, твердое тело – твердое тело.

1.2 Математические методы описания теплопередачи и задач с фазовыми переходами

Как было отмечено выше, проблемы энергосбережения выходят на первое место в задачах управления. Энергосберегающий алгоритм можно построить только с пониманием теплообмена в управляемом объекте. Рассмотрим методы описания теплопроводности.

Выделяют следующие три основных способа переноса тепла:

1. теплопроводность – перенос, определяемый взаимодействием микрочастиц соприкасающихся тел;

2. конвекция – перенос, обусловленный пространственным перемещением вещества. Наблюдается в движущихся средах (жидкости, газы);

3. излучение – перенос энергии в виде электромагнитных волн.

Во многих технических системах процесс переноса тепла осуществляется различными способами (сложный теплообмен). При описании конвективных

переносов необходимо учитывать процессы теплопроводности между отдельными частями сплошной среды (тепло- и массоперенос). Радиационный теплообмен (излучение) может осложняться теплопроводностью, конвекцией и т.д. Примером такого сложного теплообмена могут служить процессы при фазовых превращениях, химических реакциях. При рассмотрении процессов теплопередачи в твердых телах большое значение могут приобретать эффекты, связанные с расширением тел при повышении температуры.

Для моделирования процессов плавления и затвердевания в качестве основной рассматривается классическая задача Стефана [7].

Основное положение теории теплопроводности, известное как закон Фурье, состоит в предположении пропорциональности теплового потока градиенту температуры в однородной неподвижной среде: $q = -k \cdot \text{grad}T$, где k – коэффициент теплопроводности [8 – 15].

Основное дифференциальное уравнение теплопроводности:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = -\text{div} \cdot (k \cdot \text{grad}T) + f. \quad (1.1)$$

Типичной в теплофизических исследованиях является ситуация, когда теплофизические свойства среды зависят от температуры, т.е. в уравнении (1.1) $c=c(T), \rho=\rho(T), k=k(T), f=f(T)$.

Если теплофизические свойства среды постоянные (однородная среда), то уравнение теплопроводности (1.2) упрощается и принимает вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a\Delta T + \frac{f}{c\rho}. \quad (1.2)$$

где $a=k/(c\rho)$ – коэффициент температуропроводности, $\Delta = \text{div}(\text{grad})$ – оператор Лапласа.

При моделировании теплопереноса в движущейся среде (движущейся системе координат) уравнение теплопроводности (1.1) соответствующим образом трансформируется. Переход основан на замене частной производной по времени $\partial/\partial t$ на полную производную по времени

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \text{grad} ,$$

где $\mathbf{v}$ – локальная скорость среды.

Распределение температуры в точках среды на различные моменты времени определяется из уравнения в частных производных (уравнения теплопроводности). Для однозначного определения температурного поля $T(x, y, z, t)$ помимо уравнения теплопроводности необходимо сформулировать дополнительные (замыкающие) соотношения, так как решения уравнений в частных производных определяются с точностью до некоторых произвольных функций. Для того, чтобы это исключить, и формулируются некоторые дополнительные соотношения: в некоторых точках известно само решение, производные от решения в некоторых направлениях и т.д. [16, 17]

Будем считать, для определенности, что исследуется процесс теплопередачи, начиная с момента времени $t=0$ до некоторого момента времени $t=t_{\max}>0$.

Обычно считается, что температурное поле задано на начальный момент времени, т. е.

$$T(\mathbf{r}, y, z, 0) = T^0(\mathbf{r}, y, z), \quad \mathbf{r}, y, z \in \Omega \quad (1.3)$$

При рассмотрении высокоинтенсивных температурных процессов на основе гиперболического уравнения теплопроводности необходимо задавать два условия по времени. Например, в начальный момент времени известна температура и скорость ее изменения во времени. Это позволяет задать помимо (1.3) и условие:

$$\frac{\partial}{\partial t} T(\mathbf{r}, y, z, t) = \mathcal{G}(\mathbf{r}, y, z), \quad \mathbf{r}, y, z \in \Omega, \quad t = 0. \quad (1.4)$$

Задание условий типа (1.3) требует при прикладном моделировании проведения прямых измерений температуры на некоторый фиксированный момент времени, либо получение этих температур из стационарной модели.

Среди граничных условий для уравнения теплопроводности выделяют основные граничные условия первого, второго и третьего рода. Наиболее простая

ситуация характеризуется заданием температурного поля на границе тела Ω (граничные условия первого рода):

$$T(\mathbf{r}, y, z, t) = g(\mathbf{r}, y, z, t), \quad (\mathbf{r}, y, z, t) \in \Gamma, \quad (1.5)$$

где Γ –поверхность Ω .

Условия первого рода (1.5) называются также условиями Дирихле.

Граничные условия второго рода (условия Неймана) соответствуют заданию на границе теплового потока. Для уравнения теплопроводности (1.1) оно записывается в виде:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = q(\mathbf{r}, y, z, t), \quad (\mathbf{r}, y, z, t) \in \Gamma, \quad (1.6)$$

где через $\partial/\partial n$ обозначена внешняя по отношению к области Ω нормаль к границе.

Граничное условие третьего рода моделирует конвективный теплообмен между поверхностью твердого тела с окружающей средой, которая имеет температуру T_c . Обычно считается, что тепловой поток пропорционален разности температур между поверхностью и окружающей средой и поэтому имеем

$$k \frac{\partial T}{\partial n} + \alpha(T - T_c) = 0, \quad (\mathbf{r}, y, z, t) \in \Gamma, \quad (1.7)$$

где α –коэффициент теплообмена.

Граничные условия третьего рода могут рассматриваться как наиболее общие из приведенных выше. Эти условия можно записать в форме

$$k \frac{\partial T}{\partial n} + \alpha(T - g) = q, \quad (\mathbf{r}, y, z, t) \in \Gamma. \quad (1.8)$$

Тогда при $\alpha \rightarrow 0$ из (1.8) мы получим условие второго рода (1.6) и, напротив, при $\alpha \rightarrow \infty$ следуют условия первого рода (1.5).

Важный класс нелинейных проблем теплообмена связан с процессами фазовых превращений. Остановимся на переходах твердое тело – жидкость. Для моделирования процессов плавления (кристаллизации) чистых веществ используется классическая модель Стефана, которая характеризуется заданием постоянной температуры на границе фазового перехода. Более общие модели

допускают образование пространственной зоны кристаллизации, в которой температура равна температуре кристаллизации, используются также модели с непостоянной температурой фазового перехода [7, 19].

Для численного решения задач с фазовыми переходами используются два основных подхода [19]. Прежде всего укажем методы с выделением границы раздела фаз [20]. Эти методы иногда называют *variable domain methods*. Второй класс образуют методы без выделения этой границы, т.е. методы сквозного счета [21, 24] (*fixed domain methods*). В работе [22] приводятся оценки точности наиболее употребительных приближенных методов решения задачи Стефана. Сравнительный анализ некоторых численных методов выполнен в работе [23].

К первой группе методов относятся методы, в которых положение свободной границы отслеживается на каждом временном слое. С этой целью используются численные методы, в которых свободная граница определяется положением соответствующих узлов. Это достигается за счет использования новых динамических независимых переменных или же согласованных динамических сеток в исходных переменных.

В одномерных задачах адаптация к границе раздела фаз может осуществляться за счет использования переменного шага по времени. Такой подход хорошо известен и используется (ловля фронта в узел пространственной сетки). В некоторых случаях можно использовать аналогичный подход с переменным шагом по пространству. Такие методы плохо приспособлены к решению многомерных задач.

К методам с выделением границы фазового перехода относятся методы с выпрямлением фронта, когда используется динамическая сетка постоянной структуры с закреплением узлов на границе раздела фаз. При изложении этих подходов следует ориентироваться на формулировку задачи в новых независимых переменных, в которых расчетная область регулярна. Для простоты изложения рассматривается однофазная задача Стефана [19, 25].

Для многомерных задач с фазовым переходом использование численных методов с явным выделением границы раздела фаз во многих случаях связано с

алгоритмическими сложностями и большими вычислительными затратами. Для приближенного решения таких задач широкое распространение получили методы сквозного счета. Для этого используется обобщенная формулировка классической задачи Стефана [18]. На основе методов решения квазилинейных задач теплопроводности строятся соответствующие численные методы решения задачи Стефана. В таких задачах используется и энтальпийная формулировка задачи Стефана, когда в качестве неизвестной выступает не температура, а энтальпия. Для решения многомерных задач используются экономичные разностные схемы.

Нелинейность задач с фазовыми переходами обусловлена, прежде всего, наличием неизвестной границы фазового перехода. Кроме того, как и в обычных задачах теплопроводности, нелинейность может быть связана с зависимостью теплофизических параметров от температуры.

Метод ловли фронта в фазовый узел

В качестве иллюстрации применения метода конечных разностей для решения задач теплопроводности с движущейся границей рассмотрим расчет нагрева тела, погруженного в расплав. В зависимости от условий теплообмена на межфазной поверхности нагрев тела сопровождается либо его плавлением, либо затвердеванием расплава [26].

Предположим для простоты, что тело представляет собой бесконечную пластину, теплофизические характеристики тела и расплава одинаковы и не зависят от температуры, и фазовое превращение (плавление тела, затвердевание расплава) происходит при определенной температуре T_1 . В процессе теплообмена толщина пластины δ изменяется: уменьшается при ее плавлении и увеличивается при затвердевании расплава.

Особенность математического описания нагрева тела в данном случае заключается в том, что искомое температурное поле $T(y,t)$ удовлетворяет уравнению теплопроводности

$$\partial T / \partial t = a \partial^2 T / \partial y^2 \quad (1.9)$$

в области с движущейся границей $0 < y < \delta(t)$, причем функция $\delta(t)$, описывающая движение границы раздела, заранее неизвестна, и сама подлежит определению в результате решения задачи.

В качестве начальных условий укажем исходное распределение температуры по сечению пластины $T_H(y)$ и исходное значение ее толщины δ_H

$$T|_{t=0} = T_H, \quad 0 \leq y \leq \delta_H, \quad \delta|_{t=0} = \delta_H. \quad (1.10)$$

Граничное условие при $y=0$ определяется характером теплообмена на левой поверхности пластины. Например, при фиксированном значении температуры этой поверхности, равном T_2

$$T|_{y=0} = T_2 \quad (1.11)$$

Специфический вид имеют граничные условия на движущейся межфазной поверхности (при $y=\delta(t)$). Первое условие отражает то обстоятельство, что фазовое превращение происходит при температуре T_1 .

$$T|_{y=\delta} = T_1 \quad (1.12)$$

Второе условие выражается уравнением теплового баланса на границе раздела твердое тело – расплав

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=\delta} = q_0 + Q'v, \quad (1.13)$$

где q_0 – абсолютная величина плотности теплового потока, подводимого к межфазной поверхности от расплава; Q' – удельная (объемная) теплота фазового превращения (плавления тела, затвердевания расплава), Дж/м³; v – скорость перемещения межфазной поверхности, м/с.

Для пояснения физического смысла уравнения (1.13) на рисунке 1.2 схематически показаны соотношения между плотностью теплового потока q_0 и плотностью теплового потока, равного по модулю $q_1 = \lambda |\partial T / \partial y|_{y=\delta}$, отводимого от межфазной поверхности внутрь тела.

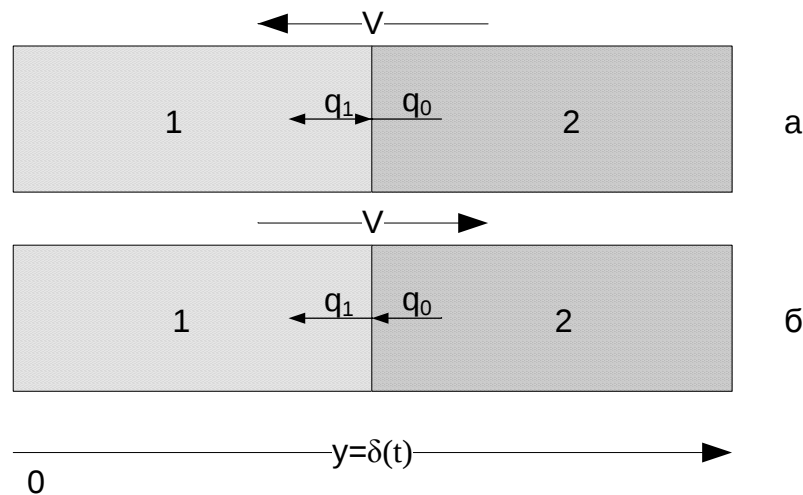


Рисунок 1.2 – Соотношения между плотностями тепловых потоков на границе раздела твердое тело (1) – расплав (2)

(а – при плавлении тела ($q_1 > q_0$); б – при затвердевании расплава ($q_1 > q_0$))

Если тепловой поток, подводимый к поверхности тела от расплава, не может быть полностью отведен внутрь тела, т.е. $q_1 < q_0$ (рисунок 1.2а), часть внешнего теплового потока поглощается на границе раздела в процессе плавления тела ($v < 0$). Если же для прогрева тела требуется тепловой поток, превышающий величину внешнего теплового потока, т.е. $q_1 > q_0$ (рисунок 1.2б), происходит затвердевание расплава ($v > 0$), при этом дефицит теплового потока покрывается за счет выделения на межфазной поверхности скрытой теплоты затвердевания.

Для того, чтобы записать граничное условие (1.13) в окончательном виде, предположим, что интенсивность внешнего теплообмена характеризуется коэффициентом теплоотдачи α , т.е. плотность внешнего теплового потока $q_0 = \alpha(T_0 - T_1)$, где T_0 – температура расплава; $T_0 - T_1$ – перегрев расплава над температурой затвердевания. Кроме этого, учтем, что $v = \partial\delta/\partial t$. Получим

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=\delta} = \alpha (T_0 - T_1) + Q' \frac{\partial \delta}{\partial t} \quad (1.14)$$

Уравнение (1.9) с крайевыми условиями (1.10) – (1.12), (1.14) выражает математическую постановку задачи теплопроводности с движущейся границей.

Один из способов учета движения межфазной границы в рамках метода конечных разностей основан на использовании сетки с переменным числом узлов.

Наиболее простой вариант разностной схемы получается, если считать, что в течение каждого шага по времени перемещение границы Δy . В этом случае, при переходе к очередному моменту времени, число шагов по координате n_k изменяется на единицу: при затвердевании расплава $\Delta\delta=\Delta y$ и $n_{k+1}=n_k+1$, при плавлении $\Delta\delta=-\Delta y$ и $n_{k+1}=n_k-1$.

Особенность такого подхода заключается в том, что при заданном элементарном перемещении межфазной границы $\Delta\delta=\pm\Delta y$ неизвестной, подлежащей определению, становится величина шага по времени $\Delta t_k=t_{k+1}-t_k$. По этой причине в данном случае целесообразно использовать безусловно устойчивые разностные схемы, сходимость которых не зависит от величины Δt_k , например, неявную четырехточечную разностную схему.

Авторы [26] предлагают следующую схему для решения задачи:

Для нахождения значений коэффициентов α_i и β_i при $i=2,\dots,n$ используем рекуррентные соотношения:

$$\alpha_i = \frac{f_k}{1 + f_k(2 - \alpha_{i-1})}; \beta_i = \frac{\theta_i^k + f_k\beta_{i-1}}{1 + f_k(2 - \alpha_{i-1})}. \quad (1.15)$$

$$f_k(d - \gamma_n) = K_0 + (1 - \theta_{n+1}^k), \quad (1.16)$$

где введено обозначение $\gamma_n = 1 - \alpha_n - \beta_n$, θ_i^k – безразмерная температура.

Проблема заключается в определении безразмерного шага по времени f_k из соотношения (1.16). Сложность этой задачи обусловлена тем, что от величины f_k зависит коэффициент γ_n . Следовательно, относительно f_k соотношение (1.16) представляет собой нелинейное уравнение, решение которого может быть получено каким-либо численным методом, например, методом итераций.

Для применения метода итераций преобразуем уравнение (1.16) к виду $f_k^* = \varphi(f_k)$, где f_k^* и f_k – последующие и предыдущие приближения для безразмерного шага по времени. Такое преобразование можно выполнить различными путями, получая уравнения, дающие различные итерационные последовательности. В каждом конкретном случае сходимость итераций проще всего установить путем пробных расчетов. Сходящуюся последовательность дает, например, формула

$$f_k^* = [\gamma_n f_k + Ko + (1 - \theta_{n+1}^k)] / d, \quad (1.17)$$

При использовании которой для нахождения коэффициента γ_n на каждом шаге итераций следует подставить приближенное значение f_k в рекуррентные соотношения и последовательно найти все прогоночные коэффициенты вплоть до α_n и β_n . Условием окончания итераций может служить неравенство $|1 - f_k/f_k^*| < \Delta$, где Δ – заданная величина, устанавливающая относительную погрешность расчета шага по времени.

После нахождения безразмерного шага по времени f_k и определения соответствующих ему значений коэффициентов α_i и β_i искомые значения температур θ_i^{k+1} вычисляются по формулам обратной прогонки. Далее число узлов уменьшается на единицу, толщина пластины полагается равной $\delta_{k+1} = \delta_k - \Delta y$, и производится переход к очередному шагу по времени.

Метод выпрямления фронта

Рассмотрим метод с выделением границы фазового перехода на примере простейшей одномерной однофазной задачи Стефана [27-29,31]. Рассмотрим отрезок $\Omega = (0, 1)$, который точкой $x = \eta(t)$ (граница фазового перехода), $\eta(0) > 0$ разбивается на две подобласти:

$$\Omega^+(t) = \{x | 0 < x < \eta(t)\}, \quad \Omega^-(t) = \{x | \eta(t) < x < l\}.$$

Будем считать температуру фазового перехода равной нулю ($u^* = 0$), поэтому в твердой фазе, которая занимает область Ω^- , положим $u(x, t) < 0$, а в жидкой (область Ω^+) — $u(x, t) > 0$. Для определения температуры в жидкой фазе рассматривается уравнение теплопроводности [30] (однородная среда)

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0, \quad x \in \Omega^+(t), \quad 0 < t \leq T. \quad (1.18)$$

Дополним уравнение (1.23) начальным условием

$$u(x, 0) = u_0(x) \geq 0, \quad x \in \Omega^+(t). \quad (1.19)$$

Пусть левый конец поддерживается при заданной температуре:

$$u(0, t) = g(x) > 0, \quad 0 < t \leq T. \quad (1.20)$$

На границе фазового перехода выполнены следующие условия:

$$u(x, t) = 0, \quad x = \eta(t), \quad 0 < t \leq T, \quad (1.21)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}(x, t) = -\lambda \frac{d\eta}{dt}, \quad x = \eta(t), \quad 0 < t \leq T. \quad (1.22)$$

Постоянная λ связана с энтальпией фазового перехода.

В силу сформулированных предположений о граничных и начальных условиях в однофазной задаче Стефана (1.18 – 1.22) скорость движения границы фазового перехода ($v_n = d\eta/dt$) положительна, т.е. область жидкой фазы постепенно расширяется [32]. Монотонное возрастание функции $\eta(t)$ следует из принципа максимума для параболических уравнений.

Для одномерной задачи (1.18 – 1.22) возможным является подход с использованием вместо x новой независимой переменной, такой, чтобы в новых переменных задача решалась в фиксированной области [33]. Простейшая такая замена для задачи (1.18 – 1.22) имеет вид

$$X = \xi\eta(t) \quad (1.23)$$

Новая переменная ξ изменяется в фиксированных пределах от 0 (на левом конце $x=0$) до 1 (на границе фазового перехода $x=\eta(t)$). При рассмотрении задач теплопроводности с фазовыми превращениями подходы с такими преобразованиями независимых переменных известны как методы выпрямления фронтов, так как в этом случае граница фазового перехода совпадает с фиксированной координатной линией.

Сформулируем задачу Стефана (1.18 – 1.22) в новых независимых переменных (ξ, t) .

Пусть

$$u(x, t) = v(\xi, t)$$

тогда с учетом (1.28) получим

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{\eta(t)} \frac{\partial v}{\partial \xi}, \quad \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{\xi}{\eta(t)} \frac{d\eta}{dt} \frac{\partial v}{\partial \xi}.$$

С учетом этого уравнение (1.18) примет вид

$$\eta^2(t) \frac{\partial v}{\partial t} - \xi \eta(t) \frac{d\eta}{dt} \frac{\partial v}{\partial \xi} - \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} = 0, \quad 0 < \xi < 1, \quad 0 < t \leq T. \quad (1.24)$$

Начальное условие (1.19) дает

$$v(\xi, 0) = u_0(\xi \eta(0)), \quad (1.25)$$

а граничные условия (1.20), (1.21) преобразуются следующим образом

$$v(0, t) = g(t) > 0, \quad (1.26)$$

$$v(1, t) = 0, \quad 0 < t \leq T, \quad (1.27)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \xi}(1, t) = -\lambda \eta(t) \frac{d\eta}{dt}, \quad 0 < t \leq T. \quad (1.28)$$

Полученная краевая задача (1.24 – 1.28) для определения $v(\xi, t)$ и $\eta(t)$ является нелинейной, но в отличие от исходной задачи (1.18 – 1.22) рассматривается в фиксированной расчетной области: $0 < \xi < 1$. Необходимо отметить присутствие в уравнении (1.24) члена с первой производной по переменной ξ , который отражает перенос тепла за счет движения расчетной области.

1.3 Обзор программных средств для моделирования теплотехнических задач

При выборе среды разработки программного комплекса был проведен обзор существующих программ для моделирования и решения теплотехнических задач.

Начнем с программного пакета ANSYS. Это сложный программный комплекс, имеющий много различных встроенных модулей для моделирования и расчета по различным критериям. Модуль ANSYS FLUENT представляет собой инструмент для оптимизации процесса проектно-конструкторской и технологической подготовки в области вычислительной динамики жидкостей и газов.

Программный модуль ANSYS FLUENT имеет широкий спектр возможностей моделирования течений жидкостей и газов для промышленных задач с учетом турбулентности, теплообмена, химических реакций. К примерам применения FLUENT можно отнести задачи обтекания крыла, горение в печах, течение внутри барботажной колонны, внешнее обтекание нефтедобывающих платформ, течение в кровеносной системе, конвективное охлаждение сборки полупроводника, вентиляция в помещениях, моделирование промышленных стоков.

Использование динамической сетки позволяет моделировать произвольное перемещение частей в сложных задачах, например, в двигателе внутреннего сгорания, клапанах, в движении корабля по волнам, запуске ракет. Динамическое создание сетки также совместимо с большим количеством других моделей, в том числе с моделями распада брызг и горения, многофазных потоков, потоков со свободной поверхностью и сжимаемых потоков. Скользящая сетка и сеточные модели позволяют описывать периодические движения внутри смесительных баков, насосов и в турбомашинах. Модели с движущейся сеткой совместимы со сложными моделями больших завихрений, реакций и многофазных потоков.

ANSYS FLUENT включает набор инструментов для моделирования конвективного, кондуктивного и лучистого теплообмена. Доступны модели для анализа излучений в оптически толстой (участвующей) среде, а также модель «поверхность-поверхность» (основанная на коэффициентах излучения) для прозрачной (не участвующей) среды. Модель дискретных ординат подходит для любой среды, в том числе для стекла. Модель тепловой нагрузки от солнечного излучения позволяет решать задачи управления микроклиматом в помещениях. Другие возможности, тесно связанные с теплообменом, включают в себя модели кавитации, модели сжимаемых жидкостей, теплообменников, оболочечной проводимости, реальных газов, влажного пара, таяния и застывания. Испарение капель или влажных частиц, выход летучих компонентов из угля можно моделировать при помощи модели дискретных фаз (DPM-модель) [34].

Примеров по моделированию межфазного перехода в рамках необходимого подхода с явным выделением фронта не найдено. Известны примеры использования этого пакета для 3D и 2D моделирования алюминиевых электролизеров в инженерно-технологическом центре компании «РУСАЛ», но в этих работах стационарную границу раздела фаз определяют по изотерме кристаллизации.

Далее рассмотрим программный пакет COMSOL Multiphysics.

Это единая платформа для моделирования тепловых явлений в производственных процессах и элементах промышленного оборудования.

Компания COMSOL предлагает инструмент для моделирования разных физических явлений. Например, сначала возможно рассчитать количество тепла на нагрев системы, потом – ее охлаждение воздухом, а затем температурные напряжения, возникшие в системе. Также, можно моделировать все эти процессы одновременно.

Теплопередача – явление, которое обычно сопровождает другие физические процессы, например температурные поля вызывают возникновение термических напряжений, а электромагнитные поля являются причиной резистивного, индукционного, микроволнового и радиочастотного тепловыделения. Течение жидкости в различных деталях и компонентах оказывает влияние на их охлаждение, а изменение температуры сказывается на физических свойствах веществ и их характеристиках при термообработке, например, при литье или сварке. Модуль теплопередачи в пакете COMSOL включает в себя ряд пользовательских интерфейсов для облегчения моделирования теплопередачи в сочетании с другими явлениями, и может интегрироваться другими модулями пакета.

COMSOL Multiphysics позволяет проводить расчет межфазовых переходов. Осуществление фазовых переходов существенно усложняет моделирование процессов теплообмена. При фазовых превращениях положение и форма границы раздела фаз меняются, и этот процесс довольно сложно рассчитать. Переход вещества из одного фазового (агрегатного) состояния в

другое сопровождается резким изменением физических свойств, в том числе теплопроводности, теплоемкости, плотности и вязкости. Значения названных величин для твердого, жидкого и газового фазовых состояний вещества могут отличаться на несколько порядков. Изменение агрегатного состояния вещества также сопровождается выделением или поглощением скрытой теплоты фазового перехода, и этот фактор должен быть учтен при расчете баланса тепла. Инструменты и физические интерфейсы, реализованные в пакете COMSOL Multiphysics и модуле «Теплопередача», позволяют учесть подобные превращения и рассчитать изменение объема системы с помощью метода подвижных сеток. Также, поддерживается автоматический расчет термодинамических свойств, позволяющий учесть изменение свойств вещества при фазовом превращении и обеспечить непрерывность решения [35].

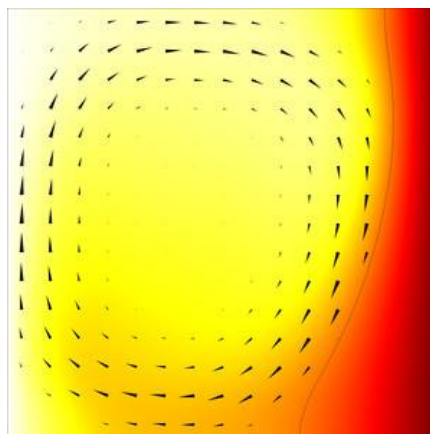


Рисунок 1.3 – Пример определения границы фазового перехода при задании граничных условий 1-го рода в программной среде COMSOL Multiphysics®

На рисунке 1.3 представлен пример застывания отливки металла. При этом граница определяется неявно.

В заключении рассмотрим программный пакет MatLab. Это высокоуровневый язык и интерактивная среда для программирования, численных расчетов и визуализации результатов. С помощью MatLab можно анализировать данные, разрабатывать алгоритмы, создавать модели и приложения.

MatLab по сравнению с самостоятельным программированием на различных языках (C/C++, Java, Pascal, FORTRAN) позволяет сократить время

решения типовых задач и значительно упрощает разработку новых алгоритмов, однако, при решении сложных задач время расчета может значительно превышать время выполнения той же задачи программой, написанной на C++ или других языках.

Язык MatLab включает в себя математические функции для инженерных и научных операций. Встроенные математические функции используют процессор, оптимизированные библиотеки, предназначенные для ускорения векторных и матричных вычислений.

Доступны следующие операции:

- интерполяция и регрессия;
- дифференцирование и интегрирование;
- системы линейных уравнений;
- Фурье анализ;
- собственные значения и сингулярные числа матриц;
- обыкновенные дифференциальные уравнения;
- разреженные матрицы.

Расширения MatLab предоставляют специализированный функционал в таких областях как статистика, оптимизация, обработка сигналов, машинное обучение.

MatLab предоставляет набор встроенных функций построения 2D и 3D графиков, а также функции объёмной визуализации, которые можно использовать как средство представления обрабатываемой информации. Графики могут быть созданы как интерактивно, так и программно. В галерее графиков MatLab есть примеры множества способов представления данных графически. Для каждого примера можно посмотреть и скачать исходный код для использования в приложениях MatLab [36].

Следует отметить, что появилась информация о возможности вызова управляющим контроллером Siemens серии S7-1500 среды MatLab, но практических примеров еще не известно.

Проведя обзор и изучив возможности сторонних продуктов, было принято решение реализовывать поставленные задачи в среде разработки C++ Builder, так как рассмотренные программные продукты не подходят по ряду причин:

1. Пакеты проводят расчеты быстро только при решении типовых задач, при решении сложных задач, время расчета может превышать сутки и более.

2. В рассмотренных пакетах нет возможности встраивать реализованные расчеты в процесс управления реальным объектом, не конвертируя и исправляя полученный код.

3. Для реализации поставленных целей важнее правильно описать технологический процесс для задач управления и достичь приемлемой точности при исследованиях простыми моделями, не требующими для своего решения специальных программных пакетов.

ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ

Для решения поставленных задач разработки энергосберегающих алгоритмов управления рассмотрены подходы к моделированию сложных теплотехнических объектов, определена методика алгоритмизации и моделирования металлургического объекта для задач АСУТП.

При выборе математического аппарата изучены способы теплопередачи, методы решения задач с фазовыми переходами. Как основа для дальнейшей разработки выбран метод «ловли фронта в фазовый узел», позволяющий явно выделить фронт плавления и базирующийся на неявной, безусловно устойчивой разностной схеме.

Рассмотрено известное программное обеспечение для решения теплообменных задач. Определена необходимость разработки собственного программного обеспечения в связи с решением узкоспециализированных задач для АСУТП.

В качестве инструмента реализации выбран язык программирования C++ и среда разработки Borland C++ Builder 6.0. Данная среда разработки позволяет создать программное обеспечение, полностью отвечающее требованиям по точности и при этом быстродействующее, а также использовать полученное ПО непосредственно в управлении.

ГЛАВА 2. УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМ БАЛАНСОМ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМИНИЯ

Процесс получения алюминия путем электролитического разложения глинозема является очень энергозатратным. Лучшие российские и зарубежные электролизеры и технологии имеют показатель 13 кВт·час/кг алюминия, на старых сериях этот показатель может достигать до 17 кВт·час/кг алюминия. При этом половина подводимой энергии расходуется в виде тепловых потерь в окружающую среду. В настоящее время во всем мире конкурентоспособность алюминиевых заводов в первую очередь определяется их возможностью снизить энергопотребление. Разрабатываемые способы энергосбережения в основном направлены на создание новых конструкций электролизеров. При этом совершенствование алгоритмов управления на уже работающих конструкциях также может внести значительный вклад в снижение расхода электроэнергии. Перспективными являются алгоритмы, использующие адекватные математические модели технологического процесса.

В настоящей главе рассматривается часть математической модели теплообмена в алюминиевом электролизере, рассматривающая теплопередачу через бортовую футеровку и процессы плавления – кристаллизации гарнисажа, имеющегося на внутренней поверхности стенки ванны и вносящего нелинейные аспекты в управление этим металлургическим аппаратом. Представлена новая численная одномерная модель поведения гарнисажа, позволяющая рассчитывать динамическое изменение температур по сечению борта электролизера и положение фронта кристаллизации. Модель использует динамическое одномерное уравнение теплопроводности, граничные условия 1 и 3 рода, условие Стефана и метод явного выделения фронта кристаллизации. С использованием разработанного программного обеспечения проведено сравнение расчетов динамики температур бортовой футеровки и толщины гарнисажа различными моделями.

2.1 Получение алюминия

Электролизный цех состоит из нескольких прямоугольных корпусов, протяженность которых зачастую превышает 1 км. Внутри рядами установлены сотни электролизных ванн, последовательно подключенных массивными проводами к электричеству. Постоянное напряжение на электродах каждой ванны находится в диапазоне всего 4 – 6 вольт, в то время как сила тока составляет 150 – 400 кА и более.

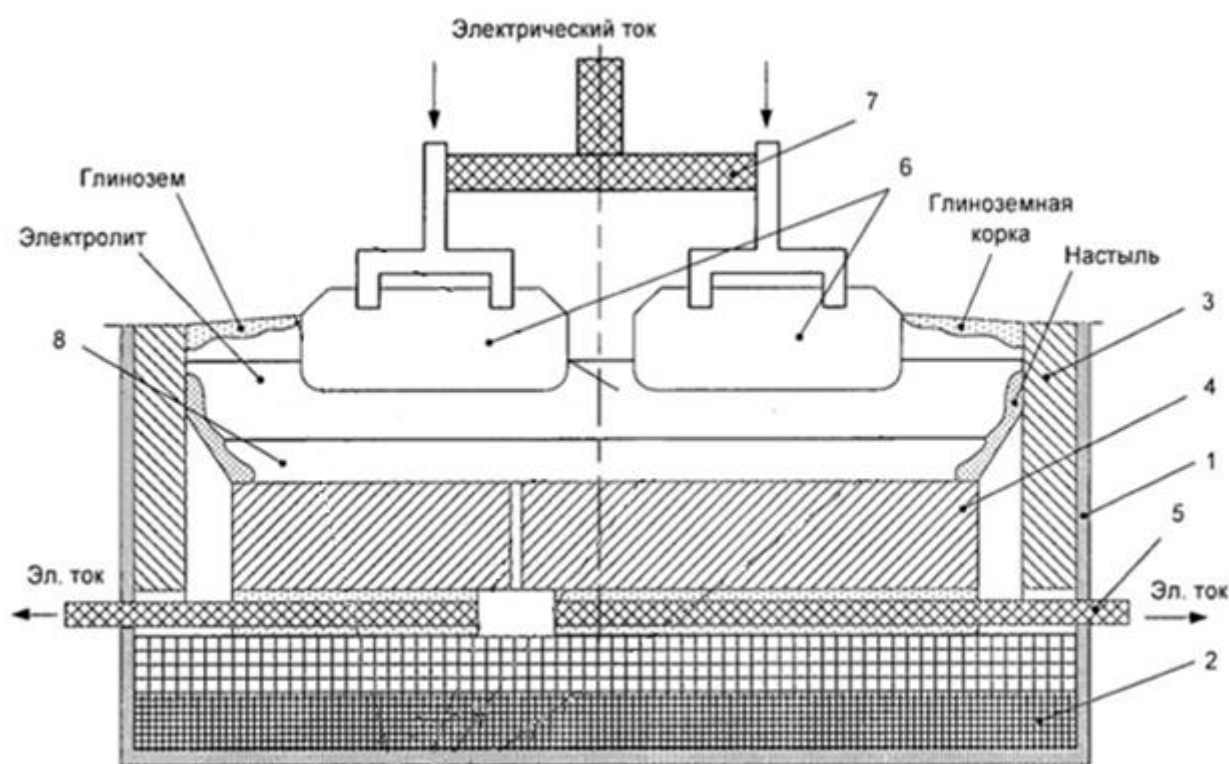


Рисунок 2.1 – Пример алюминиевого электролизера

(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)

При помощи автоматической системы подачи глинозема (АПГ) в ванну загружается новая порция сырья. Под воздействием электрического тока связь между алюминием и кислородом разрывается – алюминий осаждается на дне

ванны, образуя слой в 15 – 50 см, а кислород соединяется с углеродом, входящим в состав анодных блоков, и образует углекислый газ.

Раз в сутки алюминий извлекают из ванны при помощи вакуумных ковшей. В застывшей на поверхности ванны корке электролита пробивают отверстие, в которое опускают трубу. Жидкий алюминий по ней засасывается в ковш, из которого предварительно откачан воздух. В среднем, из одной ванны откачивается от 1 до 3 тонн металла в зависимости от производительности. Далее этот ковш отправляется в литейное производство [37].

На рисунке 2.2 представлена структурная схема современного управления алюминиевым электролизером [58].

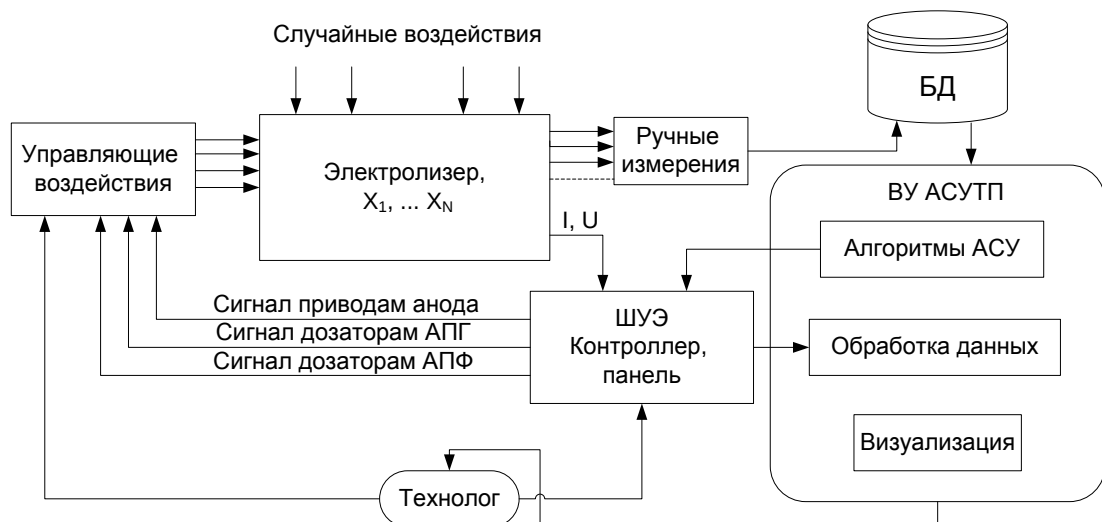


Рисунок 2.2 – Схема управления алюминиевым электролизером

Процесс не является полностью автоматизированным, этому препятствуют недостаточность измерений и нехватка знаний о поведении объекта управления. Шкаф управления электролизером (ШУЭ), основными компонентами которого являются контроллер и панель визуализации и управления, осуществляет управление междуполусным расстоянием (МПР) посредством движения анодного массива, управление подачей глинозема посредством передачи сигналов дозаторам АПГ, и также управление автоматической подачей фторсолей (АПФ). На электролизер могут оказываться дополнительные «ручные» воздействия,

назначаемые технологом, например, добавка криолита, слив электролита и др. Изменение силы тока также является управляющим воздействием, но оно осуществляется на серию электролизеров.

Из рисунка 2.2 видно, что для управления электролизером имеется три рычага воздействия – изменение напряжения на ячейке посредством движения анода, изменение концентрации фторида алюминия в расплаве путем изменения частоты срабатывания дозатора АПФ, изменение концентрации глинозема в расплаве путем изменения частоты срабатывания дозатора АПГ.

Имеется четвертый рычаг воздействия – изменение силы тока, но это воздействие может быть осуществлено только на серию электролизеров, и не является рычагом оперативного управления, в некоторых случаях его можно отнести к возмущениям.

2.2 Существующие способы управления тепловым балансом электролизера.

Фазовые переходы как нелинейная проблема

Все работы, касающиеся разработки алгоритмов управления тепловым балансом, можно разделить на две большие группы – это работы по исследованиям динамического и статического теплового баланса ванн, теплопередачи, массообмена, диагностики ванн; и работы, содержащие способы расчета управляющих воздействий. Второй класс работ конечно должен учитывать исследования, измерения и рекомендации первого класса.

Стоит отметить, что из-за наличия застывшего электролита (настыль) на внутренней поверхности электролизной ванны управление тепловым балансом электролизера неразрывно связано с управлением массовым балансом и представляет собой нелинейную проблему.

На рисунке 2.3 представлены основные направления исследований теплового баланса электролизеров

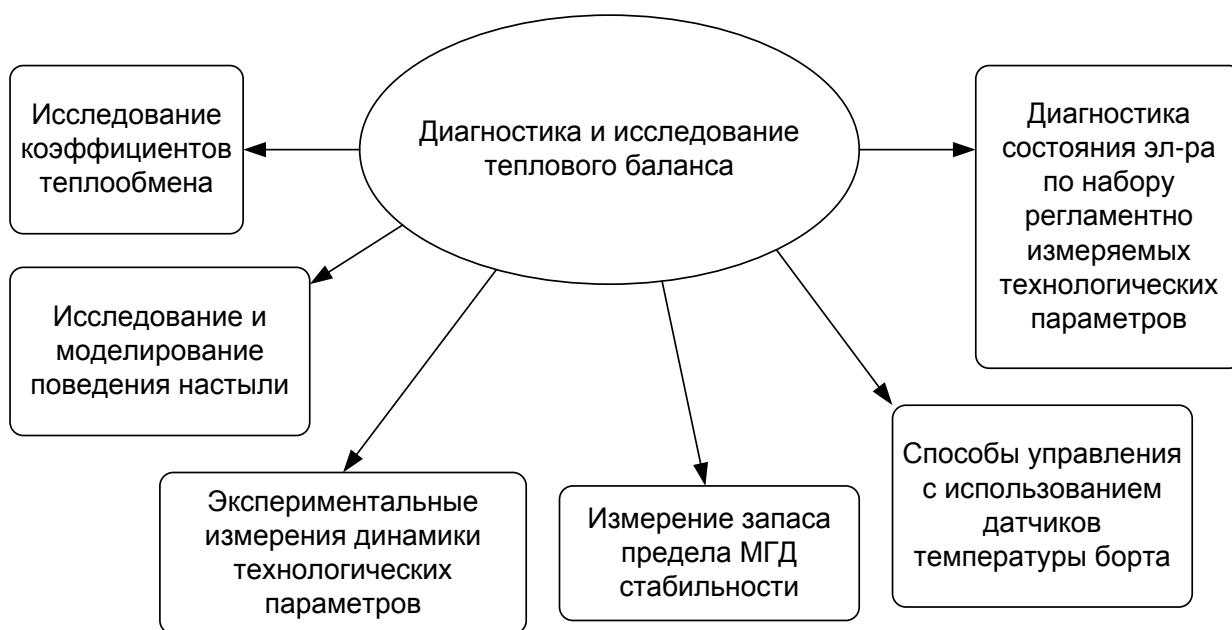


Рисунок 2.3 – Основные направления исследований теплового баланса электролизеров

Рассмотрим работы, относящиеся к каждому направлению.

Коэффициенты теплообмена от расплава к настыли и между расплавами имеют прямое отношение к потерям тепла электролизером в окружающую среду. В работе [38] приводится методика расчета этих коэффициентов теплообмена, основанная на термальном законе пограничного пристеночного слоя Кадера, расчете поля скоростей электролита с учетом движения газов, поля скоростей металлов, а также с учетом предполагаемой пленки электролита между металлом и настылью. Получается поле рассчитанных коэффициентов. Но идентификацию среднего значения авторы [38] осуществляют по измеренным наружным тепловым потокам отдельно в зонах электролита и в зонах металла.

В работе [39] проводится сравнение двух численных методов для предсказания формирования бортовой настыли.

Участие динамических изменений настыли в тепло- массообмене до сих пор обсуждается. В работе [42] содержатся мнения авторов о ее значительном влиянии на теплообмен, однако, также описываются проведенные экспериментальные измерения, показывающие ее незначительное влияние. Проводились измерения ФРП с назначенной частотой после активных

воздействий на электролизер, где использовался специальный датчик измерений профиля настыли.

В работах [40 – 41] Solheim исследует новые аспекты теплообмена через бортовую настыль.

Методики стационарных измерений тепловых и электрических балансов электролизеров разработаны достаточно давно, однако, измерения динамического поведения электролизера начали проводиться сравнительно недавно, первые работы о комплексных измерениях в динамике температуры электролита, состава электролита, уровней расплавов, ФРП появились около 20 лет назад. Эти работы проводились как для проверки динамических моделей тепло- и массообмена [43], так и для изучения процесса электролиза [42], [44]. Отсутствие ранее проводимых измерений динамики переменных электролиза связано как со сложностью этих измерений, так и с тем, что необходимость понимания динамических процессов в электролизере появилась только в последние 20 лет в связи с интенсификацией процесса электролиза.

Высокие температуры и химическая агрессивность расплава делают очень затруднительным непрерывное измерение температуры электролита. Тем не менее, на ОАО «КрАЗ» были проведены такие измерения [45, 46]. В первом случае было получено около 200 ч. измерений стационарной термопарой в электролите, во втором – около 150 ч. Максимальное время нахождения термопары в электролите – 2 суток. Из литературы нам известна только одна работа [44] с подобными измерениями, но в ней проведено гораздо меньше часов измерений. В большинстве представленных работ температура электролита измеряется периодически.

Непрерывные измерения состава электролита и уровней расплавов в настоящее время невозможны. Проводились работы по созданию датчиков автоматического измерения уровней расплавов, массы металла, но промышленный результат не был получен.

Существует несколько работ, где управление криолитовым отношением (КО) предполагается осуществлять по температуре электролита. Да, между этими

параметрами существует зависимость, но в работе [47] простым алгебраическим способом показано, что связь между температурой и КО может быть разная, может отсутствовать совсем при отсутствии настыли.

Измерения запаса МГД-стабильности проводятся в различных компаниях для определения предела снижения напряжения. В работе [48] приведена методика и примеры таких измерений, а также значения измеренных пределов МГД-стабильности по напряжению в компании РУСАЛ.

Работы [49, 50] позиционируются авторами как способы управления тепловым балансом электролизера на основании измерений теплового потока прикрепленным к борту электролизера датчиком и измерений температуры внутри бортового угольного блока специально введенной туда термопарой. В этих работах нет указаний, как использовать получаемые данные в алгоритмах управления.

Диагностике электролизеров посвящено некоторое число работ, в том числе работа [52], которая вобрала в себя опыт многих работ по диагностике и отражает основные тенденции в этом направлении. Данная работа будет рассмотрена ниже, при рассмотрении работ по перегреву.

Работа [51] посвящена общим тенденциям и успехам алюминиевых компаний в деле снижения напряжения на ванне и расхода энергии. В работе [51] отмечается о значительном снижении напряжения, но при этом КО оставалось достаточно высоким 2.4 – 2.6. Выход по току не был высоким, меньше 93%. Далее рабочей группой было снижено и КО до 2.3, но напряжение при этом пришлось повысить в среднем на 100 мВ. Но расход энергии снизился и на этом этапе за счет повышения выхода по току.

Многообразие алгоритмов управления тепловым и массовым балансами обусловлено, в том числе, различным динамическим поведением параметров разных типов электролизеров и одного электролизера в разных условиях.

Задача управления теплоэнергетическим режимом электролизера является очень актуальной, так как поддержание заданных температур областей

электролизера в совокупности с возможно меньшим расходом энергии обеспечит высокие технико-экономические показатели.

Существуют разные подходы к решению этой задачи, основанные на измерениях температуры электролита [53], на поддержании постоянной величины МПР [54] и другие. При любом подходе необходимо осуществлять автоматический выбор заданного напряжения электролизера. В настоящее время на большинстве заводов заданное напряжение выбирает технолог.

На рисунке 2.4 собраны и обобщены все известные способы управления тепловым балансом электролизера [56]. Также на этом рисунке содержатся и способы управления массовым балансом, но как уже упоминалось ранее, массовый баланс ванны неразрывно связан с тепловым балансом. Следует отметить, что некоторые способы, имеющиеся в представленной структуре, как например, оптимальное управление вольт – добавками и добавками сырья на основе рассчитываемого моделью тренда продекларированы в некоторых работах [55], но их реализация в настоящее время не осуществлена.

Многообразие способов как раз и связано с недостаточной изученностью процесса в целом и в частности теплообмена через систему борт – настиль.

В настоящее время появляются работы, которые предлагают забирать тепло с горячих бортов алюминиевого электролизера с помощью специальных теплообменников, а также сохранять тепло в электролизере при снижении тока серии в то время суток, когда действуют повышенные тарифы на электроэнергию.

Это несомненно перспективное направление энергосбережения тормозит не только сложность технического устройства рекупирации бортовых теплопотерь, но и отсутствие понимания как управлять этой установкой для стабилизации температуры расплавов и толщины бортовой настыли. Алгоритм управления установкой бортового теплообмена обязательно должен включать в себя динамическую модель расчета теплопередачи с учетом фазового перехода.

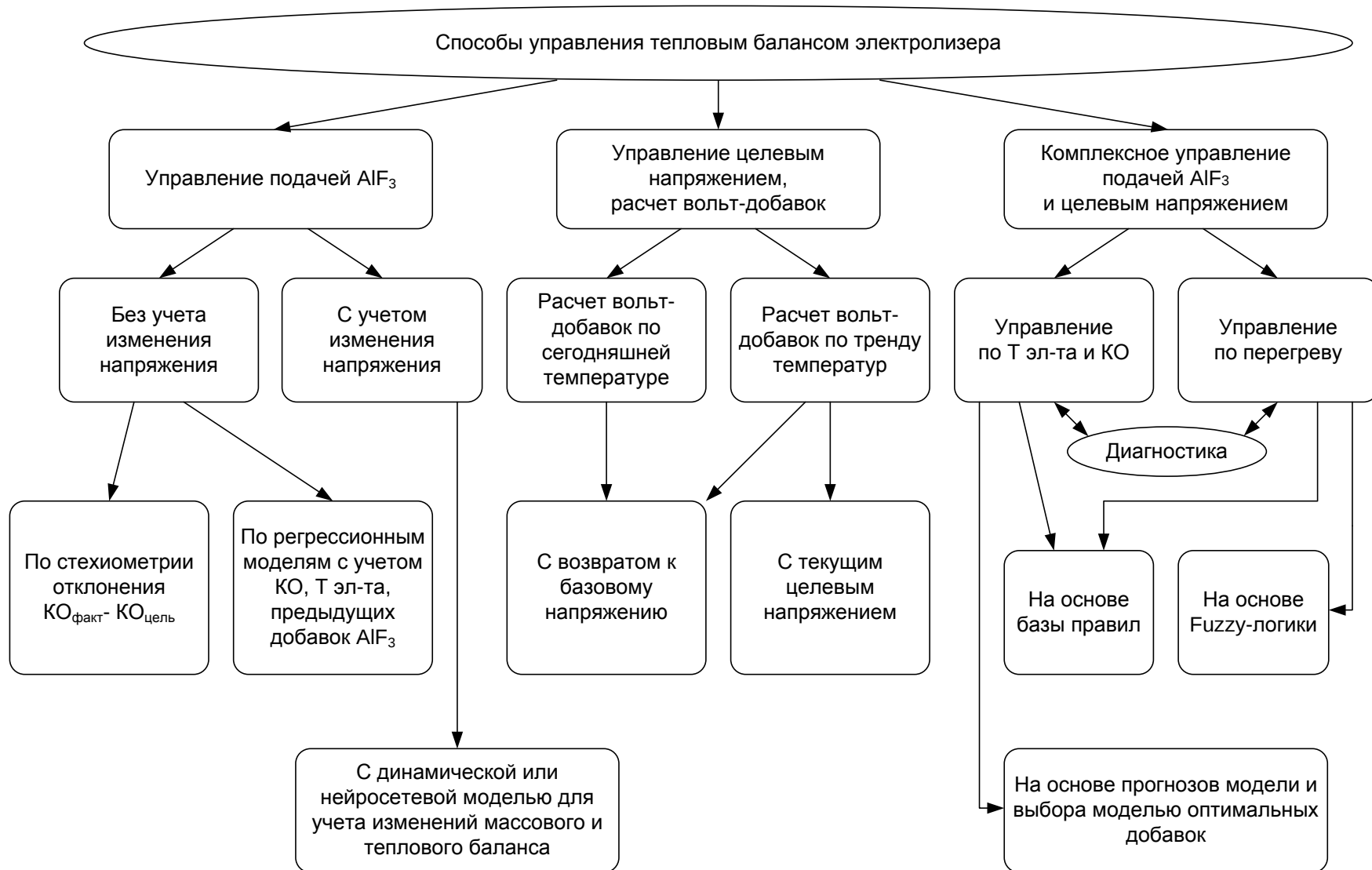


Рисунок 2.4 – Способы управления тепловым балансом электролизера с расчетом управляющих воздействий

2.3 Моделирование поведения настыва в алюминиевом электролизере

Теплопотери алюминиевого электролизера в окружающую среду распределяются следующим образом – примерно 10% днищем, 50% верхом электролизера (анодами и укрытием) и 40% бортами электролизера. При этом при оперативных воздействиях, которые в том числе осуществляет АСУТП, 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.

На заводах РУСАЛа в составе АСУТП эксплуатируется программа «Стабилизация состава электролита на базе динамической модели» и программа «Виртуальный электролизер», которые имеют в своем составе сосредоточенную модель теплопередачи через борт и определения динамического изменения толщины застывшего слоя. Опыт эксплуатации этих программ показал недостатки данной модели. Поэтому первой задачей настоящей главы было разработать распределенную модель теплопередачи через борт алюминиевого электролизера с учетом фазового перехода и сравнить расчеты одномерной и сосредоточенной модели для выводов об использовании их в АСУТП. Второй задачей было предложить алгоритм регулирования бортового теплообмена и стабилизации толщины гарнисажа на основе новой разработанной модели.

Модели теплообмена в алюминиевом электролизере, рассматривающие процессы плавления и кристаллизации гарнисажа, позволяют снизить энергопотребление за счет точного определения толщины и прогнозирования поведения гарнисажа. В свою очередь получаемые выходные данные по модели, дают возможность корректировать режимы работы электролизеров заблаговременно, снижая потребление энергии в целом за счет своевременной подачи правильных корректирующих воздействий.

На сегодняшний день на производстве имеется проблема по определению поведения гарнисажа в печах. Гарнисаж (франц. garnissage), твердый защитный слой, образующийся при плавке на рабочей поверхности стенок некоторых металлургических агрегатов в результате физико-химического взаимодействия шихты и газов (а в печах с футеровкой – и огнеупорных материалов). Иногда гарнисаж специально наплавляют для защиты рабочей поверхности стенок. В печах с охлаждаемой футеровкой гарнисаж в основном получается в результате физико-химического взаимодействия шихты, газов и материала охлаждаемых стенок; в печах без футеровки из расплавленных или размягченных продуктов шихты на металлических (обычно медных или стальных) холодильниках, что является следствием их интенсивного охлаждения водой. При этом образуются тонкие корки застывших продуктов, толщина которых зависит от условий плавки и особенно от скорости охлаждения печи. Застывший электролит на стенках ванны разделяется российскими технологами на две расчетные области – в зоне электролита (гарнисаж), и в зоне металла (настыль), так как в этих областях разные условия теплообмена, возможен разный химический состав настыли и гарнисажа, и соответственно разные температуры плавления, коэффициенты теплопроводности.

Например, на рисунке 2.5 изображен поперечный разрез алюминиевого электролизера, в котором имеется гарнисаж (настыль):

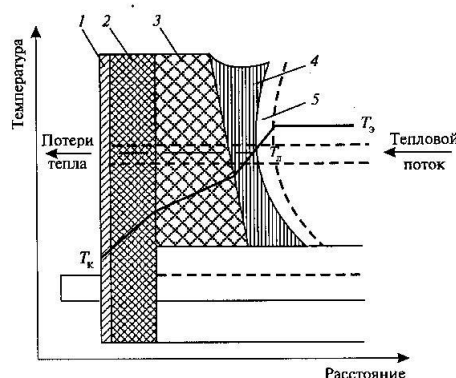


Рисунок 2.5 –Пример гарнисажа в печи для производства алюминия

1– кожух; 2 – теплоизоляция; 3 – бортовой блок; 4 – гарнисаж (настыль); 5 – пограничный слой электролита; T_k – температура кожуха; T_l – температура ликвидуса; T_e – температура электролита.

Гарнисаж (настыль) играет важную роль в работе печи для производства алюминия. Отметим наиболее важные пункты участия настыли в процессе:

- защищает блоки от разрушения; растворенный в электролите или жидкий металлический алюминий реагирует с углеродом с образованием карбида (Al_4C_3), который растворяется в электролите. Гарнисаж (настыль) является единственной надежной защитой бортовых блоков;
- служит естественным регулятором температуры электролиза. При повышении температуры гарнисаж растворяется, что приводит к уменьшению теплового сопротивления, увеличению тепловых потерь, падению температуры и наоборот;
- растворение настыли или ее кристаллизация – одна из причин изменения состава электролита в связи с разным химическим составом электролита и настыли;
- надлежащая настыль формирует форму рабочего пространства (ФРП), определяет небольшую скорость циркуляции металла, при которой достигается высокий выход по току;
- в районе раздела металл – электролит всегда наблюдается самый тонкий гарнисаж [57].

Вследствие коррозионной активности расплавленного электролита технология предусматривает присутствие в ванне настыли из застывшего расплава, которая защищает бортовую футеровку. Стабильность этой настыли определяется величиной теплового потока, переносимого через футеровку [58].

Тепловой поток определяется разностью температур между температурой электролита и температурой ликвидуса электролита, то есть химическим составом последнего, а также коэффициентом теплообмена между жидким электролитом и застывшей настылью α_1 :

$$Q_{э-н} = S_{э-н} \cdot \alpha_1 (T_{э} - T_{лик}).$$

Вследствие такого взаимодействия между химическим составом электролита, толщиной гарнисажа и уносом тепла из ванны застывший

электролит обеспечивает электролизеру существование защитного буфера, который смягчает воздействие кратковременных флуктуаций в подводимой к электролизеру энергии.

Примерно половина тепловых потерь электролизера происходит через верх электролизера (укрытые аноды или анод Содерберга, корка), половина тепла рассеивается катодом. Большая часть тепловых потерь катода алюминиевых электролизеров проходит через борта. Это связано с конструкцией электролизера – значительной теплоизоляцией днища. Кроме того, катоды специально проектируются так, чтобы на внутренних боковых стенках образовывался слой застывшего электролита, поскольку он предохраняет угольные борта от разъедания агрессивным электролитом. Также настыль не проводит ток, и оптимальная форма настыли обеспечивает вертикальное прохождение тока в электролизере, исключает горизонтальные токи.

Настыль представляет собой застывший электролит, но её химический состав отличается от состава расплава, из которого она образовалась. Настыль содержит значительно меньше AlF_3 , при кристаллизации это вещество остается в расплаве. Точных сведений о содержании глинозема в настыли нет, ссылки по этому поводу противоречивы, но в основном концентрация глинозема в настыли выше, чем в расплаве.

Управление электролизером рассматривается как нелинейная проблема в частности из-за того, что плавление и образование бортовой настыли связывает между собой энергетический и массовый составы электролита.

Проблематичным является также определение коэффициентов теплообмена расплавов и настыли. Измерить экспериментально их никак невозможно, разные литературные источники оценивают их по измерению наружных тепловых потоков с бортовой стенки, измеренной температуре электролита, рассчитанной по химическому составу расплава температуре ликвидуса, например [59], или, как в работе [60], значение этих коэффициентов находят по рассчитанным полям скоростей движения расплавов.

В описаниях динамических моделей различных авторов тепловой поток из расплавов в настывль определяется аналогично формуле теплового потока электролит – гарнисаж. В противоположность настывли, контактирующей с электролитом, настывль на уровне металла представляет проблему с теоретической точки зрения. В работе [61] показано, что в зоне металла нельзя использовать указанную формулу для описания теплообмена. Автор говорит о том, что при изменениях подачи энергии в электролизере, плавления настывли не наблюдалось, однако, экспериментальные измерения [58], а также измерения авторов [62] говорят об обратном. Конечно, в связи с отмеченными проблемами, динамическое поведение настывли в зоне металла будет сложнее, чем в зоне электролита. Многие авторы считают, что отмеченные проблемы: наличие пленки, задерживающей теплообмен настывль – металл; другая температура кристаллизации – можно решить и в рамках классической теории теплопередачи.

Авторы работы [63] рассчитывали изменение толщины настывли классическими методами, при этом моделировали массоперенос между расплавом и настывлью с учетом диффузии в пограничном слое, расчетом концентрации компонент в этом пограничном слое. Но существует проблема в определении коэффициента диффузии в полученном ими законе - авторы брали его от 0,1 до 0,000001 и получали разное плавление настывли. Разумеется, в последнем случае настывль не менялась вообще. Авторы работы [60] предлагают учитывать наличие пленки через понижение коэффициента теплообмена металл – настывль и представляют методику расчета такого коэффициента.

Рассмотрим работы, посвященные определению поведения гарнисажа. В работах [64 – 66] представлены различные термоэлектрические модели с 1990 года. Большая часть численных исследований, проведенных с такими концептуальными моделями, направлены на прогнозирование поведения электролизера в стационарном состоянии. Следовательно, подавляющее большинство из них пренебрегают накоплением тепла [65].

В статье Marois M.A. [67], посвященной сравнению двух различных численных методов для прогнозирования формирования боковой настывли в

алюминиевом электролизере, говорится об анализе различных моделей на основе изменения твердой и жидкой фазы. В первом подходе, называемом однофазным методом, изменение фазы не моделируется в явном виде. Во втором подходе, изменение фазы моделируется с помощью метода энтальпий, где теплоперенос рассчитывается во всех фазах, и изменение фазы учитывается через жидкую фракцию для расплава. Оба метода проверены и сравнены для различных переходных случаев. Несмотря на то, что оба метода довольно надежны и точны для прогнозирования установившегося состояния, только метод энтальпии может предсказать изменяющуюся во времени форму боковой настыли в таких ситуациях, как охлаждение электролизера во время прерывания питания электролизной серии.

Очень немногие термоэлектрические модели электролизёра для получения алюминия являются динамическими. Большинство из них являются 1-D моделями, разработанными для оценки реакции процесса Эру-Холла в электролизере при изменении различных параметров и переменных, например замена анода, выплавка металла, и так далее.

Некоторые авторы [68, 69] разработали 1-D модели для изучения динамического поведения электролизера без учета скрытых эффектов тепла. Энтальпия фазового изменения рассмотрена в 1-D динамической модели боковой стенки электролизера, разработанной Wei и соавторами [70]. На основе метода конечных разностей движущейся сетки их модель была использована для прогнозирования поведения электролизера, при подаче различных воздействий, таких как подача глинозема или анодного эффекта. В статье [71] описана сосредоточенная 1-D модель, которая учитывает скрытую теплоту плавления настыли.

В статье автора Solheim [72] приводится общее описание теплообмена между ванной и бортовой настылью. Основной темой, однако, является проблема прогнозирования скорости замерзания или плавления, в ситуации связанной с тепло- и массообменом.

Статья [73] посвящена коэффициенту теплопередачи. Коэффициенты

теплопередачи между ванной и металлом являются важными параметрами для правильных тепловых расчетов поведения электролизера. Традиционно, коэффициенты переноса тепла стенки корректируются с помощью тепловых измерений, проведенных в действующих ячейках.

В работе представлены численные методы оценки коэффициентов теплопередачи, на основе локальных скоростей жидкости и физических свойств. В области ванны, модель Computational Fluid Dynamics (CFD) построена так, чтобы учесть движение пузырькового слоя, таким образом, коэффициенты получаются по классической теории теплопередачи в плоской стеке и реализуются в коммерческом коде ANSYS CFX.

2.4 Расчет начальных переменных футеровки алюминиевого электролизера

Для моделирования объект на рисунке 2.5 преобразован в структурную модель, представленную на рисунке 2.6:

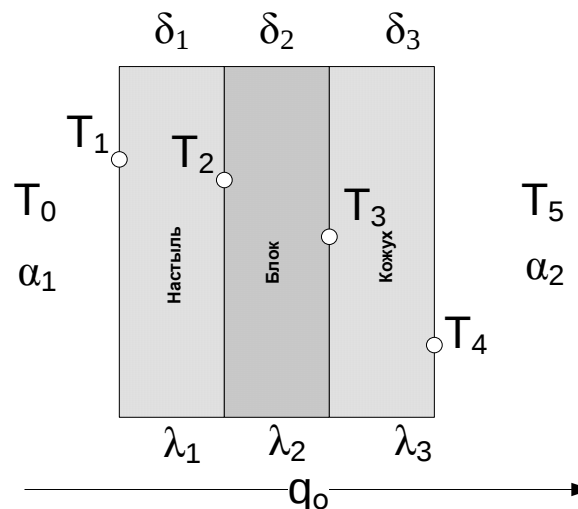


Рисунок 2.6 – Структурная модель многослойной стенки

δ_n – толщину слоев; λ_n – коэффициенты теплопроводности слоев; α_1 – коэффициент внутренней теплоотдачи; α_2 – коэффициент внешней теплоотдачи; q_0 – удельный тепловой поток; T_{1-4} – температуры на поверхности и границах слоев; T_0 – температура внутренней среды; T_5 – температура внешней среды.

Задача по расчету начальных значений температур начинается с определения теплового потока, проходящего через твердое тело при стационарных условиях, величина которого зависит от толщины слоев многослойной стенки и их теплопроводности. Температура на поверхности стенка-воздух находится из решения квадратного уравнения (2.1), полученного из равенства потоков.

$$(T_0 - T_1) \cdot \alpha_1 = (T_4 - T_5) \cdot \alpha_2$$

$$0,062 \cdot T_4^2 + (8,257 + 0,062 \cdot T_5) \cdot T_4 - (8,257 \cdot T_5 + (T_0 - T_1) \cdot \alpha_1) = 0 \quad (2.1)$$

Находим корни данного уравнения. Один из корней будет всегда отрицательным, как следствие не будет удовлетворять условию решения задачи. Оставшийся положительный корень будет являться температурой на поверхности стенка-воздух.

Определив температуры на границах слоев по «холодным» сопротивлениям, рассчитываются коэффициенты теплопроводности по уравнению, полученному при аппроксимации таблицы коэффициентов суммарной теплоотдачи и удельных тепловых потоков в окружающую среду с температурой 20°C [74]. По полученным результатам вычисляются температуры по «горячим» сопротивлениям и начальная толщина гарнисажа. Далее в программе запускается блок итерации для уточнения всех температур с точностью до 0.001°C, блок-схема которого приведена на рисунке 2.7.



Рисунок 2.7 – Блок-схема итерационной процедуры для уточнения температур стенки

Задача по определению начальной толщины гарнисажа сводится к правильному расчету температур на поверхностях и границах слоев многослойной стенки. Тем самым, определив тепловые сопротивления всех слоев стенки, рассчитывается толщина слоя гарнисажа в начальный момент времени по уравнению (2.2):

$$\delta_1 = \left(\frac{T_0 - T_4}{q} - \frac{1}{\alpha_1} - \frac{\delta_2}{\lambda_2} - \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right) \cdot \lambda_1 \quad (2.2)$$

где δ_1 – толщина гарнисажа в начальный момент времени; α_1 – коэффициент внутренней теплоотдачи; T_0 – температура внутренней среды; T_4 – температура поверхности стенки; δ_2, δ_3 – толщины второго и третьего слоев стенки; q – удельный тепловой поток; λ_1 – теплопроводность гарнисажа; λ_2, λ_3 – теплопроводность слоев стенки. Подробная блок-схема приведена на рисунке 2.8.



Рисунок 2.8 – Блок-схема расчета толщины гарнисажа в стационарных условиях

2.5 Нульмерная (сосредоточенная) динамическая модель расчета поведения гарнисажа

Рассмотрим подробнее нульмерную (сосредоточенную) динамическую модель расчета поведения гарнисажа. Расчет толщины гарнисажа в динамике при задании граничных условий третьего рода, подробно описан на рисунке 1 в приложении Б, при начальных условиях [58]:

$$\overline{T}_n(0) = \overline{T}_0,$$

$$T_1 = T_{лик},$$

$$q_{0-1} = \alpha_1 \cdot (T_0 - T_1).$$

Расчет средних температур слоев осуществляется по балансовому уравнению (2.3)

$$m \cdot c \cdot \frac{d\overline{T}}{dt} = Q_{вх} - Q_{вых}, \quad (2.3)$$

при этом средние температуры в слоях рассчитываются следующим образом:

$$\begin{aligned} m_1 \cdot c_1 \cdot \frac{d\overline{T}_1}{dt} &= S \cdot k_1 \cdot (T_0 - \overline{T}_1) - S \cdot k_2 \cdot (\overline{T}_1 - \overline{T}_2), \\ m_2 \cdot c_2 \cdot \frac{d\overline{T}_2}{dt} &= S \cdot k_2 \cdot (\overline{T}_1 - \overline{T}_2) - S \cdot k_3 \cdot (\overline{T}_2 - \overline{T}_3), \\ m_3 \cdot c_3 \cdot \frac{d\overline{T}_3}{dt} &= S \cdot k_3 \cdot (\overline{T}_2 - \overline{T}_3) - S \cdot k_4 \cdot (\overline{T}_3 - T_5), \end{aligned} \quad (2.4)$$

где T_0 – температура расплава; $Q_{вх}$ – входные тепловые потоки; $Q_{вых}$ – выходные тепловые потоки; m_n – масса слоев стенки; $c_{1,2,3}$ – удельная теплоемкость соответствующих материалов стенки; $\frac{d\overline{T}}{dt}$ – скорость изменения средней температуры слоя; S – площадь поверхности стенки; $\overline{T}_{1,2,3}$ – средние температуры соответствующих слоев; α_1 – коэффициент теплоотдачи во внешнюю среду; T_5 – температура внешней среды; $k_{1,2,3,4}$ – коэффициенты теплопередачи.

Далее определяем коэффициенты сопротивления, которые рассчитываются по формулам [58]:

$$k_1 = \frac{1}{\left(\frac{\delta_1/2}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_1}\right)}, \quad k_2 = \frac{2}{\left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}\right)},$$

$$k_3 = \frac{2}{\left(\frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}\right)}, \quad k_4 = \frac{1}{\left(\frac{\delta_3/2}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2}\right)}.$$

здесь $\lambda_{1,2,3}$ – коэффициент теплопроводности материала соответствующего слоя;
 $\delta_{1,2,3}$ – толщина соответствующего слоя.

Далее определяем площадь стенки, массы и теплоемкости слоев. Рассчитываем коэффициент внешней теплоотдачи при температуре внешней стенки на текущем шаге по времени по уравнению:

$$\alpha_2 = 8.257 + 0.062 \cdot T_4.$$

Используя средние температуры слоев, рассчитанные при стационарных условиях, определяем тепловые потоки между слоями по следующим формулам:

$$Q_{1[n]} = S \cdot k_1 \cdot (T_0 - \overline{T_{1[n]}}),$$

$$Q_{2[n]} = S \cdot k_2 \cdot (\overline{T_{1[n]}} - \overline{T_{2[n]}}),$$

$$Q_{3[n]} = S \cdot k_3 \cdot (\overline{T_{2[n]}} - \overline{T_{3[n]}}),$$

$$Q_{4[n]} = S \cdot k_4 \cdot (\overline{T_{3[n]}} - T_5).$$

где $Q_{1-4[n]}$ – тепловые потоки между слоями на текущем шаге по времени; S – площадь стенки; $\overline{T_{1-3[n]}}$ – средние температуры слоев на текущем шаге по времени; n – шаг по времени.

Получив тепловые потоки, рассчитываем средние температуры слоев на следующем шаге по времени:

$$\overline{T_{1[n+1]}} = \overline{T_{1[n]}} + \frac{dt \cdot (Q_{1[n]} - Q_{2[n]})}{m_{1[n]} \cdot c_{1[n]}},$$

$$\overline{T_{2[n+1]}} = \overline{T_{2[n]}} + \frac{dt \cdot (Q_{2[n]} - Q_{3[n]})}{m_2 \cdot c_{2[n]}},$$

$$\overline{T_{3[n+1]}} = \overline{T_{3[n]}} + \frac{dt \cdot (Q_{3[n]} - Q_{4[n]})}{m_3 \cdot c_{3[n]}},$$

$$T_{4[n+1]} = \overline{T_{3[n]}} - \frac{Q_{4[n]} \cdot \delta_3 \cdot \lambda_3}{S \cdot 2}.$$

где $c_{1-3[n]}$ – удельные теплоемкости слоев на текущем шаге; $T_{4[n+1]}$ – температура на поверхности стенки на следующем шаге по времени.

Определяем температуры на границах слоев стенки и по полученным результатам определяем толщину гарнисажа на следующем шаге по уравнению (2.5) [58]:

$$\delta_{n+1} = 0,5 \cdot \left(\delta_n - \frac{dt \cdot \alpha_1 \cdot (T_0 - T_1)}{\rho_n \cdot L_n} \right) + \sqrt{0,25 \cdot \left(\delta_n - \frac{dt \cdot \alpha_{\text{внут}} \cdot (T_0 - T_1)}{\rho_n \cdot L_n} \right)^2 + \frac{dt \cdot \lambda_n \cdot (T_1 - T_2)}{\rho_n \cdot L_n}} \quad (2.5)$$

Далее переходим к определению скорости плавления при подаче различных воздействий.

Значения температур на границах слоев определяются из условий равенства температур и потоков на границе раздела слоев.

На разработанном программном обеспечении по нульмерной модели были проведены исследования поведения гарнисажа при различных воздействиях, подробно описанные в Приложении Б.

2.6 Одномерная динамическая модель расчета поведения гарнисажа

Для повышения точности определения изменений толщины гарнисажа и распределения температур по сечению стенки разработана и реализована одномерная модель. На рисунке 2.9 представлена структурная модель стенки с гарнисажем для модели в частных производных:

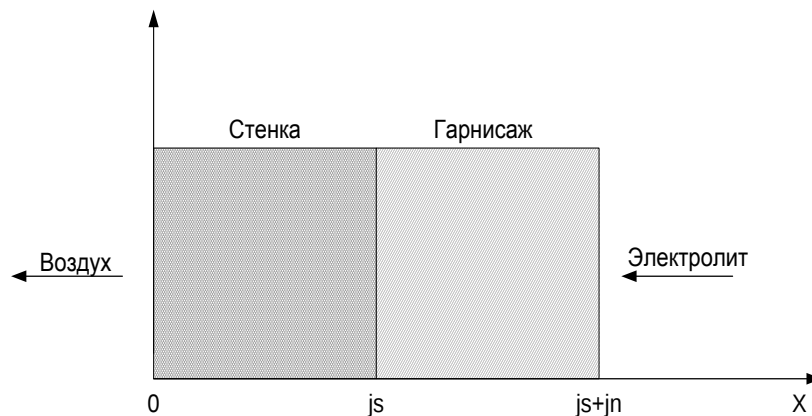


Рисунок 2.9 – Структурная схема стенки с гарнисажем для модели в частных производных

Будем считать жидкую и твердую фазы однородными средами с постоянными теплофизическими характеристиками.

Рассмотрим внутри каждого слоя уравнения теплопроводности:

стенка –

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; \quad a_1 = \frac{\lambda_1}{c_1 \cdot \rho_1}; \quad (2.6)$$

гарнисаж –

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; \quad a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}; \quad (2.7)$$

где a, a_1 – коэффициенты температуропроводности слоев.

При построении неявной четырехточечной разностной схемы для внутренних узлов настыли и стенки запишем [75]:

стенка –

$$\frac{T_j^{k+1} - T_j^k}{\Delta t} = a_1 \cdot \frac{T_{j+1}^{k+1} - 2T_j^{k+1} + T_{j-1}^{k+1}}{(hx)^2}; \quad (2.8)$$

гарнисаж –

$$\frac{T_j^{k+1} - T_j^k}{\Delta t} = a \cdot \frac{T_{j+1}^{k+1} - 2T_j^{k+1} + T_{j-1}^{k+1}}{(hx)^2}. \quad (2.9)$$

где $T_j^{k+1} = T(t_{k+1}, x_j); t_{k+1} = t_k + \Delta t; x_j = x_{j-1} + hx; hx$ – шаг по координате; Δt – шаг по времени.

Приведем к виду, пригодному для прогонки:

$$-f_1 T_{j-1}^{k+1} + (1 + 2f_1) T_j^{k+1} - f_1 T_{j+1}^{k+1} = T_j^k; \quad j = \overline{1; js-1} \quad (2.10)$$

$$-f T_{j-1}^{k+1} + (1 + 2f) T_j^{k+1} - f T_{j+1}^{k+1} = T_j^k; \quad j = \overline{js+1; jn+js-1} \quad (2.11)$$

здесь $f_1 = a_1 \cdot \Delta t / (hx)^2; f = a \cdot \Delta t / (hx)^2$.

Рассмотрим граничные условия теплообмена стенки и гарнисажа с окружающей средой. На границе катодный кожух - воздух традиционно рассматривается граничное условие с учетом лучистого теплообмена:

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x}(0, t) = \alpha_{air} (T(0, t) - T_{air}) + \xi \cdot ((T(0, t)/100)^4 - (T_{air}/100)^4) \quad (2.12)$$

Преобразуем условие (2.12) к граничному условию третьего рода, так как это улучшает сходимость итерационных последовательностей:

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x}(0, t) = h_1(T) \cdot (T(0, t) - T_{air}), \quad (2.13)$$

$$\text{где } h_1(T) = \alpha_{air} + \frac{\xi \cdot [(\frac{T(0, t)}{100})^4 - (\frac{T_{air}}{100})^4]}{T(0, t) - T_{air}}.$$

Рассмотрим в первом приближении $h_1 \approx \text{const}$, используя для определения некоего среднего h_1 данные статьи [76]. Таким образом, условие (2.13) приводится к линейному уравнению:

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x}(0, t) = h_1(T(0, t) - T_{air}). \quad (2.14)$$

Полагая, что теплоотдача с кожуха происходит по закону (2.14), запишем условие теплового баланса на сетке при $j=0$:

$$\lambda_1 \frac{T_1^{k+1} - T_0^{k+1}}{h_x} - h_1(T_0^{k+1} - T_{air}) = \frac{1}{2} c_1 \rho_1 h_x \frac{T_0^{k+1} - T_0^k}{\Delta t}, \quad (2.15)$$

то есть разность количества тепла, подведенного к стенке кожуха теплопроводностью и отведенного от стенки воздушным потоком, идет на нагрев (охлаждение) стенки кожуха.

Преобразуем (2.15) к выражению для прогонки:

$$2 f_1 T_1^{k+1} + T_0^{k+1} (-1 - 2 f_1 b - 2 f_1) = -T_0^k - 2 f_1 b T_{air}, \quad (2.16)$$

$$\text{где } b = \frac{h_1 h_x}{\lambda_1}.$$

На границе раздела стенка – гарнисаж ($j=j_s$) должны выполняться условия сопряжения:

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

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

$$\text{теплового потока.} \quad (2.17)$$

Второе условие можно представить как:

$$\lambda_1 \frac{T_{js}^{k+1} - T_{js-1}^{k+1}}{hx} = \lambda \frac{T_{js+1}^{k+1} - T_{js}^{k+1}}{hx}; \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} \frac{\lambda_1}{\lambda} (T_{js}^{k+1} - T_{js-1}^{k+1}) &= T_{js+1}^{k+1} - T_{js}^{k+1}; \\ -\frac{\lambda_1}{\lambda} T_{js-1}^{k+1} + \left(\frac{\lambda_1}{\lambda} + 1\right) T_{js}^{k+1} - T_{js+1}^{k+1} &= 0. \end{aligned} \quad (2.19)$$

Выпишем по порядку координат полученные для прогонки уравнения внутри стенки и настyli и на границах кожух-воздух, стенка – гарнисаж. Для отыскания прогоночных коэффициентов уравнение (2.16) необходимо записать в виде:

$$\begin{aligned} T_0^{k+1} &= \alpha_0 T_1^{k+1} + \beta_0; \\ T_0^{k+1} &= \frac{2f_1}{1+2f_1(1+b)} T_1^{k+1} + \frac{2f_1 b T_{air} + T_0^k}{1+2f_1(1+b)}. \end{aligned}$$

Тогда прогоночные коэффициенты определяются формулами:

$$\alpha_0 = \frac{2f_1}{1+2f_1(1+b)}; \beta_0 = \frac{2f_1 b T_{air} + T_0^k}{1+2f_1(1+b)}. \quad (2.20)$$

Внутри стенки:

$$-f_1 T_{j-1}^{k+1} + (1+2f_1) T_j^{k+1} - f_1 T_{j+1}^{k+1} = T_j^k; \quad j = \overline{1; js-1}$$

Уравнение (2.10) нужно привести к виду $T_j^{k+1} = \alpha_j T_{j+1}^{k+1} + \beta_j$, для этого заменим T_{j-1}^{k+1} на $\alpha_{j-1} T_j^{k+1} + \beta_{j-1}$, получаем:

$$T_j^{k+1} = \frac{f_1}{1+f_1(2-\alpha_{j-1})} T_{j+1}^{k+1} + \frac{T_j^k + f_1 \beta_{j-1}}{1+f_1(2-\alpha_{j-1})}.$$

Прогоночные коэффициенты внутри стенки равны:

$$\alpha_j = \frac{f_1}{1+f_1(2+\alpha_{j-1})}; \beta_j = \frac{T_j^k + f_1 \beta_{j-1}}{1+f_1(2+\alpha_{j-1})}; \quad j = \overline{1; js-1}. \quad (2.21)$$

Граница стенка – гарнисаж:

в (2.19) аналогично предыдущему заменяем T_{js-1}^{k+1} на $\alpha_{js-1} T_{js}^{k+1} + \beta_{js-1}$

$$-\frac{\lambda_1}{\lambda} \alpha_{js-1} T_{js}^{k+1} - \frac{\lambda_1}{\lambda} \beta_{js-1} + \left(\frac{\lambda_1}{\lambda} + 1\right) T_{js}^{k+1} - T_{js+1}^{k+1} = 0;$$

$$T_{js}^{k+1} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_1}{\lambda} (1 - \alpha_{js-1})} T_{js+1}^{k+1} + \frac{\frac{\lambda_1}{\lambda} \beta_{js-1}}{1 + \frac{\lambda_1}{\lambda} (1 - \alpha_{js-1})}.$$

Прогоночные коэффициенты равны:

$$\alpha_{js} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_1}{\lambda} (1 + \alpha_{js-1})}; \quad \beta_{js} = \frac{\frac{\lambda_1}{\lambda} \beta_{js-1}}{1 + \frac{\lambda_1}{\lambda} (1 - \alpha_{js-1})}. \quad (2.22)$$

Аналогично (2.21) внутри настели прогоночные коэффициенты для $j = \overline{js+1; js+jn-1}$ равны:

$$\alpha_j = \frac{f}{1 + f(2 + \alpha_{j-1})}; \quad \beta_j = \frac{T_j^k + f\beta_{j-1}}{1 + f(2 + \alpha_{j-1})}. \quad (2.23)$$

Разностная схема для стенки с гарнисажем записывается в виде:

$$\begin{aligned} \lambda_1 \frac{T_1^{k+1} - T_0^{k+1}}{hx} - h_1(T_0^{k+1} - T_{air}) &= \frac{1}{2} c_1 \rho_1 hx \frac{T_0^{k+1} - T_0^k}{\Delta t}; \\ \frac{T_j^{k+1} - T_j^k}{\Delta t} &= a_1 \frac{T_{j+1}^{k+1} - 2T_j^{k+1} + T_{j-1}^{k+1}}{hx^2}; \quad j = \overline{1, js-1}; a_1 = \frac{\lambda_1}{c_1 \rho_1}; \\ \lambda_1 \frac{T_{js}^{k+1} - T_{js-1}^{k+1}}{hx} &= \lambda \frac{T_{js+1}^{k+1} - T_{js}^{k+1}}{hx}; \\ \frac{T_j^{k+1} - T_j^k}{\Delta t} &= a \frac{T_{j+1}^{k+1} - 2T_j^{k+1} + T_{j-1}^{k+1}}{hx^2}; \quad j = \overline{js+1; jn+js}; a = \frac{\lambda}{c\rho}; \end{aligned}$$

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

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

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

Граница стенки:

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

Стенка:

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

Граница стенка – гарнисаж:

$$\alpha_{js} = \frac{1}{1+\frac{\lambda_1}{\lambda}(1+\alpha_{js-1})}; \quad \beta_{js} = \frac{\frac{\lambda_1}{\lambda} \beta_{js-1}}{1+\frac{\lambda_1}{\lambda}(1-\alpha_{js-1})}.$$

Гарнисаж:

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

Теперь распишем итерационную процедуру, определяемую нелинейным условием Стефана:

$$\rho Q \frac{d\delta_n}{dt} = \lambda \frac{\partial T}{\partial x}(x_{cm} + \delta_n(t), t) - \alpha_{bath}(T_{bath} - T_{liq}). \quad (2.24)$$

Q – удельная теплота плавления, $\delta_n(t)$ – толщина гарнисажа на каждом шаге по времени.

Это условие говорит о том, что разница в количестве тепла, подведенного к гарнисажу от электролита и количества тепла, отведенного внутрь гарнисажа теплопроводностью, должно компенсироваться за счет поглощения избыточного тепла при плавлении настыва или выделения недостающего тепла при затвердевании настыва.

Также на поверхности настыва всегда выполняется условие:

$$T(x_{cm} + \delta_n(t), t) = T_{liq}(t). \quad (2.25)$$

Отметим, что T_{liq} и T_{bath} зависят от времени.

Выберем для определения положения фронта плавления метод «ловли фронта в фазовый узел». Обзор метода был представлен ранее в главе 1.

Далее, рассмотрим прирост настыва на основании уже рассчитанных температур:

$$\rho Q \frac{\Delta \delta_n}{\Delta t} = -\alpha_{bath} (T_{bath}^k - T_{liq}^k) + \frac{\lambda}{hx} (T_{js+jn}^k - T_{js+jn-1}^k); \quad (2.26)$$

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

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

$$\Delta t = \frac{\rho Q hx}{\left[-\alpha_{bath} (T_{bath}^k - T_{liq}^k) + \frac{\lambda}{hx} (T_{liq}^k (1 - \alpha_{js-jn-1}) + \beta_{js+jn-1}) \right]} \quad (2.27)$$

На рисунке 2.10 представлен порядок расчета, разработанного для определения динамических изменений толщины застывшего слоя и температурного распределения в слоях. Алгоритм реализован на языке программирования C++, выполнены расчеты, представленные ниже.

На рисунке видно, что расчет начинается с задания начальных условий, далее выполняется блок статики. В данном блоке определяются такие переменные как: удельный тепловой поток, температура поверхности на границе стенка-воздух, начальная толщина гарнисажа (настыли), температуропроводности слоев, количество шагов по координате и времени, начальное распределение температуры на координатной сетке. Далее запускается программный цикл, в котором рассчитываются прогоночные коэффициенты, размер шага по времени, необходимый для изменения настыли на один координатный шаг и выполняется обратная прогонка. По полученным данным определяем кристаллизуется или плавится гарнисаж. В случае если гарнисаж кристаллизуется то размер координатной сетки увеличивается, и наоборот, в случае если гарнисаж плавится. Полученный результаты выводятся в интерфейсе программы.



Рисунок 2.10 – Порядок расчета по программе для определения поведения гарнисажа методом конечных разностей

2.7 Проведение исследований нульмерной и одномерной моделями и сравнительный анализ полученных результатов

По программам, реализованным в обыкновенных дифференциальных уравнениях и в частных производных по неявной четырех точечной схеме методом конечных разностей, произведен сравнительный анализ двух методов при подачи различных воздействий.

Воздействия выполнялись мгновенным изменением температуры ликвидуса расплава и температурой самого расплава. В реальной технологии воздействия осуществляются добавками сырья, изменениями напряжения или силы тока на ячейке, однако указанные воздействия температурами также могут иметь место, например, при анодном эффекте. Кроме того, необходимо сравнить два различных расчетных алгоритма, не привязываясь жестко к технологии. Результаты сравнительных расчетов представлены в таблицах 1 – 6.

В таблице 1 воздействие осуществлялось повышением температуры ликвидуса на 5°C . Таким образом, уменьшается входной поток в гарнисаж в уравнении (2.26).

Из таблицы 1 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°C , 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 таблицах 2 – 5 также прослеживаются одинаковые тенденции:

– увеличение толщины гарнисажа от 5% до 9% и снижение температуры наружной поверхности борта электролизера в случаях повышения температуры

ликвидуса или понижения температуры расплава на 5 °С, при расчетах по модели УЧП относительно модели ОДУ;

– уменьшение толщины гарнисажа от 6% до 33% и повышение температуры наружной поверхности борта электролизера в случаях снижения температуры ликвидуса на 3 °С или повышения температуры расплава на 5 °С, при расчетах по модели УЧП относительно модели ОДУ;

– увеличение времени переходных процессов от 20% до 65% при расчетах по модели УЧП относительно модели ОДУ.

В таблице 6 воздействие осуществлялось повышением температуры расплава на 5°С, то есть увеличением входного потока в гарнисаж. При этом по модели УЧП гарнисаж расплавился полностью в случае с угольным блоком, и время переходного процесса оказалось меньше, чем у модели в ОДУ. В случае карбидкремниевых блока гарнисаж расплавился не полностью, но больше чем в модели ОДУ, и время переходного процесса у модели УЧП оказалось больше, чем в ОДУ. Противоположные тенденции времени стабилизации при данном воздействии требуют дополнительной проверки, но 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 может быть потеряна в окружающую среду.

Таблица 1 – Результаты сравнения моделей ОДУ и УЧП при подаче воздействия путем изменения температуры ликвидуса на плюс 5°С

Метод	ОДУ	УЧП	ОДУ	УЧП	Коэффициент теплоотдачи
Материалы стенки	Гарнисаж №1, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №1, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №1, карбидокремниевый блок, стальной кожух	Гарнисаж №1, карбидокремниевый блок, стальной кожух	$\alpha_1 = 1000 \text{ Вт/ м}^2 \cdot \text{К}$
<i>Переменная</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Размерность</i>
Начальная толщина гарнисажа	0,031	0,031	0,052	0,052	м
Конечная толщина гарнисажа	0,114	0,125	0,135	0,146	м
Время переходного процесса	66,7	104,6	65,2	103,3	ч
Температура поверхности	237,9	188,3	237,91	188,2	°С
Материалы стенки	Гарнисаж №2, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №2, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №2, карбидокремниевый блок, стальной кожух	Гарнисаж №2, карбидокремниевый блок, стальной кожух	$\alpha_1 = 1000 \text{ Вт/ м}^2 \cdot \text{К}$
Начальная толщина гарнисажа	0,062	0,062	0,103	0,103	м
Конечная толщина гарнисажа	0,229	0,25	0,27	0,291	м
Время переходного процесса	104,2	187,1	115,3	179,8	ч
Температура поверхности	237,9	188,2	238	189,3	°С

Таблица 2 – Результаты сравнения моделей ОДУ и УЧП при подаче воздействия путем изменения температуры ликвидуса на минус 3°C

Метод	ОДУ	УЧП	ОДУ	УЧП	Коэффициент теплоотдачи
Материалы стенки	Гарнисаж №1, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №1, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №1, карбидокремниевый блок, стальной кожух	Гарнисаж №1, карбидокремниевый блок, стальной кожух	$\alpha_1 = 1000 \text{ Вт/ м}^2 \cdot \text{К}$
<i>Переменная</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Размерность</i>
Начальная толщина гарнисажа	0,031	0,031	0,052	0,052	м
Конечная толщина гарнисажа	0,012	0,01	0,033	0,03	м
Время переходного процесса	40,9	48,3	26,4	35,3	ч
Температура поверхности	407,4	452,7	407,4	452,1	°С
Материалы стенки	Гарнисаж №2, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №2, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №2, карбидокремниевый блок, стальной кожух	Гарнисаж №2, карбидокремниевый блок, стальной кожух	$\alpha_1 = 1000 \text{ Вт/ м}^2 \cdot \text{К}$
Начальная толщина гарнисажа	0,062	0,062	0,103	0,103	м
Конечная толщина гарнисажа	0,025	0,019	0,067	0,06	м
Время переходного процесса	48,6	60,2	33,4	49,4	ч
Температура поверхности	407,4	453,6	407,4	453,2	°С

Таблица 3 – Результаты сравнения моделей ОДУ и УЧП при подаче воздействия путем изменения температуры расплава на плюс 2°C

Метод	ОДУ	УЧП	ОДУ	УЧП	Коэффициент теплоотдачи
Материалы стенки	Гарнисаж №1, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №1, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №1, карбидокремниевый блок, стальной кожух	Гарнисаж №1, карбидокремниевый блок, стальной кожух	$\alpha_1 = 1000 \text{ Вт/ м}^2 \cdot \text{К}$
<i>Переменная</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Размерность</i>
Начальная толщина гарнисажа	0,031	0,031	0,052	0,052	м
Конечная толщина гарнисажа	0,018	0,016	0,038	0,036	м
Время переходного процесса	37,5	44,6	26,9	33,8	ч
Температура поверхности	389,7	419,5	389,7	418,9	°C
Материалы стенки	Гарнисаж №2, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №2, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №2, карбидокремниевый блок, стальной кожух	Гарнисаж №2, карбидокремниевый блок, стальной кожух	$\alpha_1 = 1000 \text{ Вт/ м}^2 \cdot \text{К}$
Начальная толщина гарнисажа	0,062	0,062	0,103	0,103	м
Конечная толщина гарнисажа	0,036	0,031	0,077	0,073	м
Время переходного процесса	44,4	59,1	31,9	49,7	ч
Температура поверхности	389,7	420,3	389,7	420	°C

Таблица 4 – Результаты сравнения моделей ОДУ и УЧП при подаче воздействия путем изменения температуры расплава на минус 2°C

Метод	ОДУ	УЧП	ОДУ	УЧП	Коэффициент теплоотдачи
Материалы стенки	Гарнисаж №1, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №1, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №1, карбидокремниевый блок, стальной кожух	Гарнисаж №1, карбидокремниевый блок, стальной кожух	$\alpha_1 = 1000 \text{ Вт/ м}^2 \cdot \text{К}$
<i>Переменная</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Размерность</i>
Начальная толщина гарнисажа	0,031	0,031	0,052	0,052	м
Конечная толщина гарнисажа	0,051	0,054	0,072	0,075	м
Время переходного процесса	39,4	46	34,7	44,3	ч
Температура поверхности	311	288,9	311	288,9	°C
Материалы стенки	Гарнисаж №2, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №2, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №2, карбидокремниевый блок, стальной кожух	Гарнисаж №2, карбидокремниевый блок, стальной кожух	$\alpha_1 = 1000 \text{ Вт/ м}^2 \cdot \text{К}$
Начальная толщина гарнисажа	0,062	0,062	0,103	0,103	м
Конечная толщина гарнисажа	0,102	0,109	0,143	0,15	м
Время переходного процесса	54,1	76,5	48,6	72,3	ч
Температура поверхности	311	288,4	311	288,4	°C

Таблица 5 – Результаты сравнения моделей ОДУ и УЧП при подаче воздействия путем изменения температуры расплава на минус 5°C

Метод	ОДУ	УЧП	ОДУ	УЧП	Коэффициент теплоотдачи
Материалы стенки	Гарнисаж №1, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №1, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №1, карбидокремниевый блок, стальной кожух	Гарнисаж №1, карбидокремниевый блок, стальной кожух	$\alpha_1 = 1000 \text{ Вт/ м}^2 \cdot \text{К}$
<i>Переменная</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Размерность</i>
Начальная толщина гарнисажа	0,031	0,031	0,052	0,052	м
Конечная толщина гарнисажа	0,113	0,124	0,134	0,145	м
Время переходного процесса	66,7	103,8	65,3	102,5	ч
Температура поверхности	237,9	188,3	237,9	188,3	°C
Материалы стенки	Гарнисаж №2, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №2, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №2, карбидокремниевый блок, стальной кожух	Гарнисаж №2, карбидокремниевый блок, стальной кожух	$\alpha_1 = 1000 \text{ Вт/ м}^2 \cdot \text{К}$
Начальная толщина гарнисажа	0,062	0,062	0,103	0,103	м
Конечная толщина гарнисажа	0,226687	0,247590	0,267744	0,288533	м
Время переходного процесса	106,9	185,5	113,8	178,3	ч
Температура поверхности	237,9	188,2	237,9	188,3	°C

Таблица 6 – Результаты сравнения моделей ОДУ и УЧП при подаче воздействия путем изменения температуры расплава на плюс 5°C

Метод	ОДУ	УЧП	ОДУ	УЧП	Коэффициент теплоотдачи
Материалы стенки	Гарнисаж №1, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №1, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №1, карбидокремниевый блок, стальной кожух	Гарнисаж №1, карбидокремниевый блок, стальной кожух	$\alpha_1 = 1000 \text{ Вт/ м}^2 \cdot \text{К}$
<i>Переменная</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Размерность</i>
Начальная толщина гарнисажа	0,031	0,031	0,052	0,052	м
Конечная толщина гарнисажа	0,005	0,001	0,026	0,021	м
Время переходного процесса	58,3	53,6	26,9	93,6	ч
Температура поверхности	440,9	519,9	440,9	519,3	°C
Материалы стенки	Гарнисаж №2, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №2, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №2, карбидокремниевый блок, стальной кожух	Гарнисаж №2, карбидокремниевый блок, стальной кожух	$\alpha_1 = 1000 \text{ Вт/ м}^2 \cdot \text{К}$
Начальная толщина гарнисажа	0,062	0,062	0,103	0,103	м
Конечная толщина гарнисажа	0,01	0	0,051	0,042	м
Время переходного процесса	61,1	52,18	31,9	43,9	ч
Температура поверхности	440,931	520	440,978	520	°C

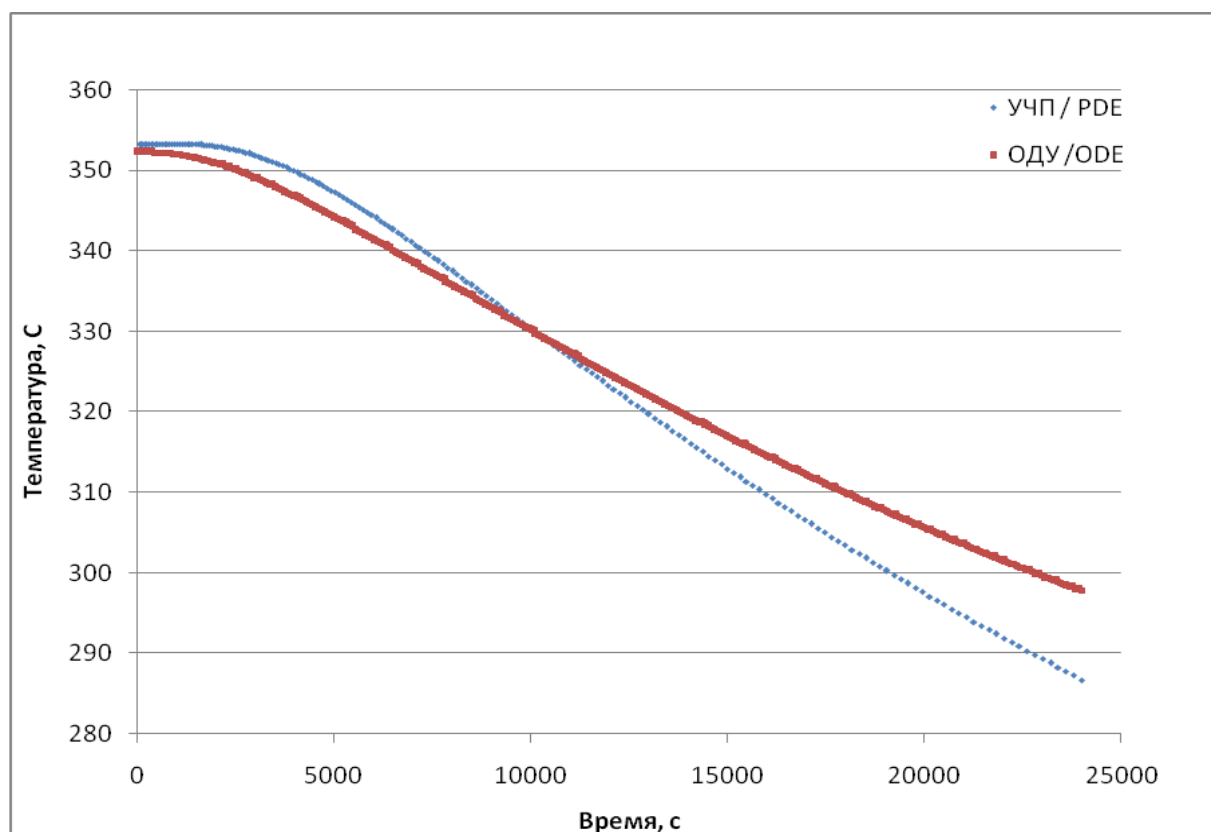


Рисунок 2.11 – Результаты сравнения моделей ОДУ и УЧП с футеровкой Гарнисаж №1, угольный блок, стальной кожух, при подаче воздействия путем изменения температуры ликвидуса на плюс 5°C на участке до 67 часов

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 2.11 приведено сравнение графиков снижения температур наружной поверхности футеровки, то есть по сути графиков изменения теплотер в окружающую среду. Видно, что модель в частных производных дает начальный участок длиной примерно в полтора часа, в котором температура наружной стенки не меняется. Это очень важный момент, так как при потере энергии (например, в случае аварии на подстанции) расплав охлаждается медленнее, чем рассчитано ранее по ОДУ. В монографии [59] приведены данные о том, что программа «Виртуальный электролизер», использующая модель ОДУ, рассчитывает более раннее замерзание электролизера, чем имеющиеся фактические измерения температур на аппаратах,

в случае такой аварии. Включение новой разработанной модели в алгоритмы управления улучшит расчет подачи энергии для поддержания стабильного теплового баланса электролизера.

2.8 Использование новой модели для расчета управляющих воздействий напряжением для энергоэффективных электролизеров

Выше было неоднократно отмечено, что тепловой и массовый баланс имеют связь между собой через изменение химического состава расплава при плавлении и кристаллизации настыли. В рамках НИР «Разработка связанного алгоритма стабилизации состава электролита и управления тепловым балансом для энергоэффективных электролизеров» для проекта «Энергоэффективные электролизеры» ИТЦ РУСАЛ разрабатывался и реализовывался разделенный алгоритм управления, состоящий в предварительном составлении правил управления заданным напряжением на основе моделирования, а затем передаче этого воздействия как в АСУТП, так и в алгоритм верхнего уровня, который моделирует массовый баланс и рассчитывает добавки сырья. Для составления правил управления заданным напряжением была использована новая модель.

Подведем итоги сравнения двух моделей. Была рассмотрена многослойная стенка, имитирующая борт алюминиевого электролизера, состоящая из слоя настыли и слоя угольного или карбидокремниевого блока.

Были разработаны и запрограммированы два вида математических моделей:

- Сосредоточенная модель в обыкновенных дифференциальных уравнениях с учетом фазового перехода, аналогичная моделям расчета настыли, входящим в состав ПО «Виртуальный электролизер» (модель ОДУ).
- Распределенная одномерная модель в частных производных, использующая для учета фазового перехода метод «ловли фронта в фазовый узел» и специально разработанную разностную схему (модель УЧП).

Обе модели не учитывали изменение химического состава расплава при плавлении или кристаллизации настыли.

Вторая модель является эталонной для первой модели с точки зрения математического моделирования и численных методов.

Далее на стенку осуществлялось воздействие изменением температуры ликвидуса расплава или температуры расплава и сравнивался отклик этих моделей. Рассматривались настывы теплопроводности 1 Вт/(м·К) и теплопроводности 2 Вт/(м·К) в сочетании с разной футеровкой.

Результаты расчетов в виде таблиц приведены выше. Здесь отметим следующие важные моменты:

Различия в расчетах заключаются в 10 – 15 % итоговой (намерзшей или расплавившейся) толщины настыва после воздействия и во времени стабилизации.

Эталонный метод (УЧП) всегда показывает большее расплавление или большее намерзание гарнисажа, то есть более значительный отклик системы на воздействие.

Время отклика у эталонной модели почти всегда значительно больше, чем у модели ОДУ, в случае снижения перегрева на 5°C в 1,8 раза. Но при увеличении температуры расплава на 5°C эталонная модель быстрее сожгла весь гарнисаж в случае угольного борта и низкотеплопроводной настыва.

Новая модель была интегрирована в ПО "Виртуальный электролизер" и расчеты выполнялись модернизированной программой. При реализации новой модели в ПО "Виртуальный электролизер" имелась проблема, связанная с тем, что в ПО "Виртуальный электролизер" шаг по времени фиксированный, а в разработанной новой модели он переменный и связан со скоростью плавления гарнисажа.

Схема решения этой проблемы приведена на рисунке 2.12 и заключается в сравнении расчетного на одну ячейку по координатной сетке (dt) с периодом цикла расчета технологических параметров и переменных объекта программой "Виртуальный электролизер" (dT) при каждом изменении координатной сетки.

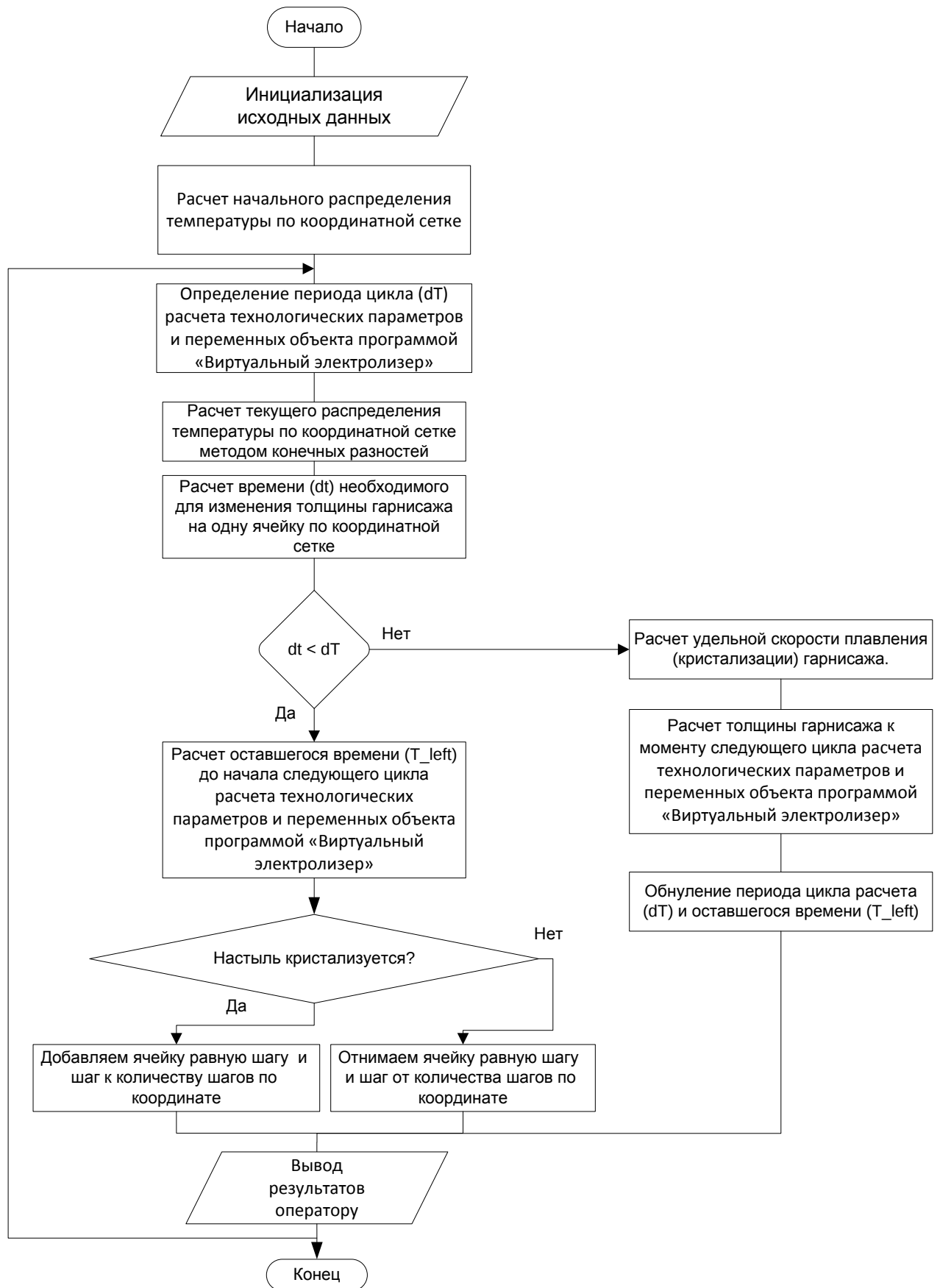


Рисунок 2.12 – Блок схема интегрированной модели в ПО "Виртуальный электролизер"

В случае если время для изменения толщины гарнисажа меньше периода расчета технологических параметров и переменных, рассчитывается оставшееся время до начала следующего цикла (T_{left}), определяется плавится или кристаллизуется гарнисаж и выполняется блок изменения координатной сетки, после чего переопределяется период цикла (dT) и выполняются расчет текущего распределения температуры и времени (dt) необходимого для следующего изменения толщины гарнисажа на одну ячейку по сетке. В случае если же время для изменения толщины гарнисажа больше периода расчета технологических параметров и переменных, то выполняется расчет удельной скорости плавления (кристаллизации) гарнисажа, относительно которой рассчитывается толщина гарнисажа которая будет к моменту следующего цикла расчета технологических параметров и переменных объекта программой, после чего вновь происходит переопределение периода (dT) и цикл повторяется.

Моделирование для матриц, приведенных ниже, выполнено в концепции максимальной работы напряжением. Каждая ячейка рассматривалась как начальная точка, и подавалось воздействие либо только указанной вольт-добавкой, либо вольт – добавкой и приведенной в нижней матрице добавкой фторида алюминия.

Результат отслеживался (и достигался) через 2 – 3 виртуальных суток. Достижение результата оценивалось не как попадание в целевую точку, а как попадание в выделенный зеленым целевой квадрат. Это было сделано для учета описанной в выше погрешности модели ОДУ входящей в состав ПО "Виртуальный электролизер".

На рисунке 2.13 интересующая нас матрица вольт-добавок находится сверху, нижняя матрица вспомогательная, и указывает применяющуюся в комплексном воздействии суточную добавку AlF_3 .

На рисунке 2.13 представлены, полученные вольт-добавки для электролизера С-175ЭС при среднем суточном расходе AlF_3 . Видно, что при снижении напряжения в ячейках нижней матрицы обнулена или значительно

уменьшена подача фторида алюминия по сравнению с традиционно применяемой в этих ячейках.

975	-60	-80	-100	-120	-120	-120	-120
970	-40	-60	-80	-80	-80	-60	-60
965	0	0	0	0	-20	-30	-30
960	0	0	0	0	0	0	0
955	0	0	0	0	0	0	0
950	80	60	60	40	0	0	0
945	160	120	80	80	60	0	0
	2,2	2,25	2,3	2,35	2,4	2,45	2,5
	БР=21кг						
975	0	0	0	0	0,8 БР	БР	1,5БР
970	0	0	0	0,5 БР	БР	2 БР	2 БР
965	0	0	0,5 БР	БР	1,5БР	2 БР	2,5 БР
960	0	0	0,5 БР	БР	1,5БР	2 БР	2 БР
955	0	0	0,5 БР	БР	1,5БР	1,5БР	1,5БР
950	0	0	0,5 БР	БР	БР	БР	БР
945	0	0	0,5 БР	0,5 БР	БР	БР	БР
	2,2	2,25	2,3	2,35	2,4	2,45	2,5

Рисунок 2.13 – Матрица для С175ЭС

Аналогичные управляющие правила были рассчитаны для различных типов электролизеров компании и применяются в АСУТБ для электролизеров ОА – 120, РА – 180 на ОАО КРАЗ.

2.9 Стабилизация толщины бортовой настыли. Управление установкой рекупирации бортовых теплопотерь

Для сверхмощных электролизеров актуальной становится проблема стабилизации толщины гарнисажа на минимальном значении. То есть с одной стороны он необходим, так как защищает бортовые блоки от разрушения, с другой стороны он занимает рабочее пространство ванны и по этому должен быть минимален.

Потери тепла в современных массовых электролизерах с обожженными анодами можно разделить на три основные части [77]: потери через верхние части, в основном уходящие с горячими испарениями, составляют более чем 50%

производимого тепла. Эту часть теряемого тепла трудно утилизировать, потому что температура газов довольно низкая $100 - 180^{\circ}\text{C}$; потери тепла с боков кожуха электролизера составляет около 35 % всего производимого тепла, и температура поверхности составляет $250\sim 350^{\circ}\text{C}$, которая еще не достаточно высока для прямого теплообмена; остальное тепло теряется через днище электролизера и катодные бляхи, которые также трудно утилизировать.

Проведя обзор в области исследования тепловых балансов электролизера, было выделено перспективное направление для управления поведением настыва. Это направление [78] рассматривает метод рекуперации тепла из внутри боковых оболочек, расположенных внутри бортовых блоков. В то же время, теплообменная система способна контролировать боковые «настыли» путем регулирования скорости теплообмена. Этот эффект очень важен и должен быть рассмотрен, потому что форма рабочего пространства в электролизере очень сильно влияет на тепловой баланс электролизера и его выход по току. Примеры конструкций теплообменника алюминиевого электролизера разработанных различными компаниями представлены на рисунках 2.14, 2.15.

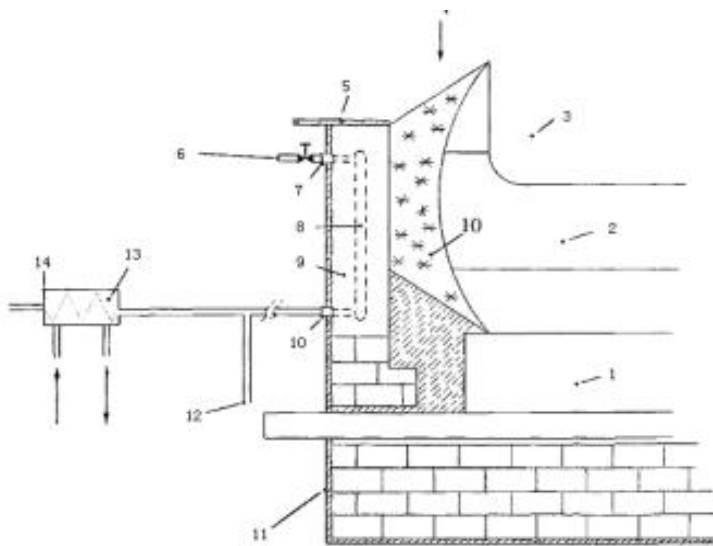


Рисунок 2.14 – Вариант теплообменника алюминиевого электролизера разработанного Hydro Aluminum:

1 – катод, 2 – ванна, 3 – анод, 4 – настывь, 5 – стальной кожух, 6 – воздушный клапан, 7 – соединение, 8 – термотрубка, 9 – SiC теплоизолятор, 10 – соединение, 11 – стальной кожух, 12 – манометр, 13 – радиатор, 14 – теплообменник.

Многие организации, включая Hydro Aluminum, Pechiney Aluminum и Alcoa занимаются исследовательскими работами по утилизации тепла с боковой поверхности электролизера с 1980-х. Однако, эти технологии не применяются широко на промышленных электролизерах. Ole-Jacob и др. [79] из Hydro предлагает метод для утилизации теплового излучения с боковой поверхности катода, путем установки охлаждаемого литого SiC теплопреобразователя от внутренней поверхности кожуха. Lamaze Airy-Pierre и Laucournet Richard [80] из Pechiney разработали другой метод: путем монтирования слоя пористого материала на наружной стороне катодного кожуха, и теплоносителем через пористый слой был выбран воздух и металлический пар.

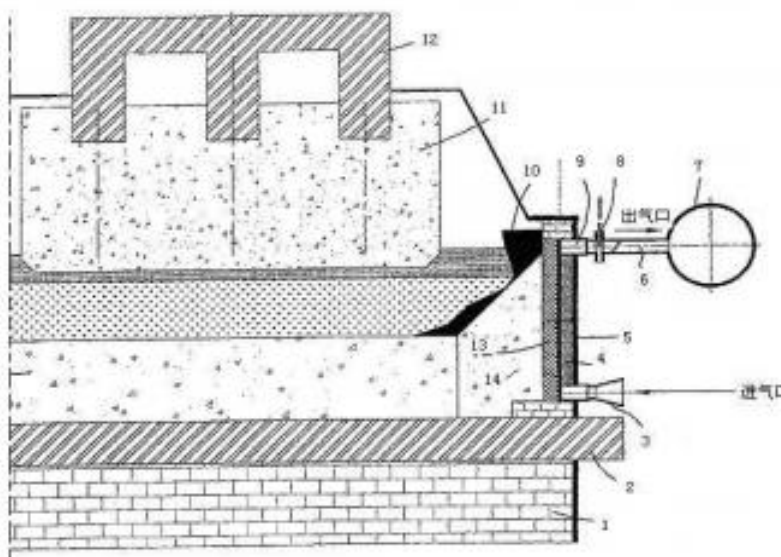


Рисунок 2.15 – Вариант теплообменника алюминиевого электролизера разработанного Pechiney Aluminum:

1 – огнеупорный кирпич, 2 – катодный блюмс, 3 – ввод воздуха, 4 – пористый материал, 5 – контейнер, 6 - вывод воздуха, 7 - теплообменник, 8 – клапан, 9 – соединитель, 10 – гарнисаж, 11 - анод, 12 – анодный кронштейн, 13 – теплоизоляция SiC, 14 – катодная набойка.

Рассмотрим разницу между этими двумя методами. Наружно установленный теплообменник удобен для работы и обслуживания, и обычно имеет простую конструкцию, но зато имеет относительно низкий коэффициент теплопередачи из-за низкой температуры катодного кожуха. И наоборот, встроенный теплообменник использует высокую температуру поверхности, что

приносит более высокую эффективность теплопередачи. Но температура и коррозионная активность требует применения более совершенной конструкции и применения ограниченного выбора материалов.

Также в последнее время появились исследовательские работы, рассматривающие применимость теплообменников на бортах электролизера для поддержания теплового баланса при значительном изменении силы тока, подаваемом на серию [78].

ANSYS моделирование было сделано для 300 кА электролизера с обожжённым анодом. Оно подтвердило, что предел флуктуации тока для обычного 300 кА промышленного электролизера составляет примерно 0 – 10% при флуктуации температуры электролита менее чем 10°C, однако его величина значительно увеличивается до 20 – 40 % для электролизера с теплообменником, предлагаемым в этой статье.

Также предлагается новая технология («Сдвиг теплового баланса»), направленная на сдвиг каждого электролизера в серии на величину одновременных регулировок тепловых потерь через теплообменники и подвод энергии, определяемый силой тока описанная в статье [81].

Основываясь на описанных исследованиях, можно предложить алгоритм автоматической стабилизации гарнисажа на базе представленных в диссертации моделей и идеи «Сдвига теплового баланса». Так как, если добавить дополнительное управляющее воздействие в виде температуры или скорости подачи воды, охлаждающей борт, или скорости подачи воздуха в систему теплообменник – борт, то мы получаем дополнительное управляющие воздействие, не использовавшейся ранее.

Предлагаемая схема модернизации представлена на рисунке 2.16:

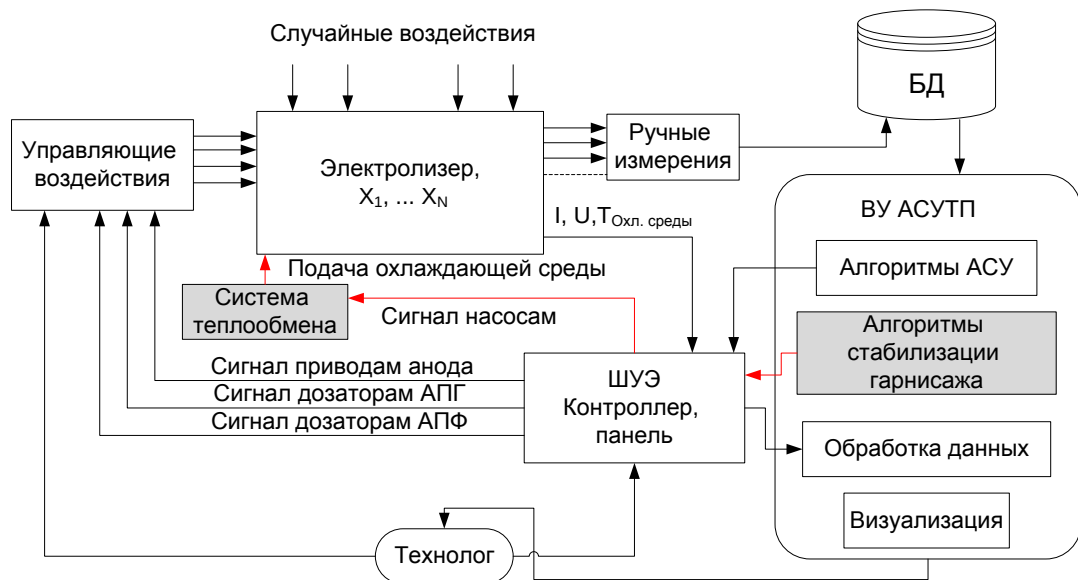


Рисунок 2.16 – Модернизированная схема управления алюминиевым электролизером

Алгоритм стабилизации гарнисажа методом сдвига теплового баланса с использованием новой одномерной модели представлен на рисунке 2.17:

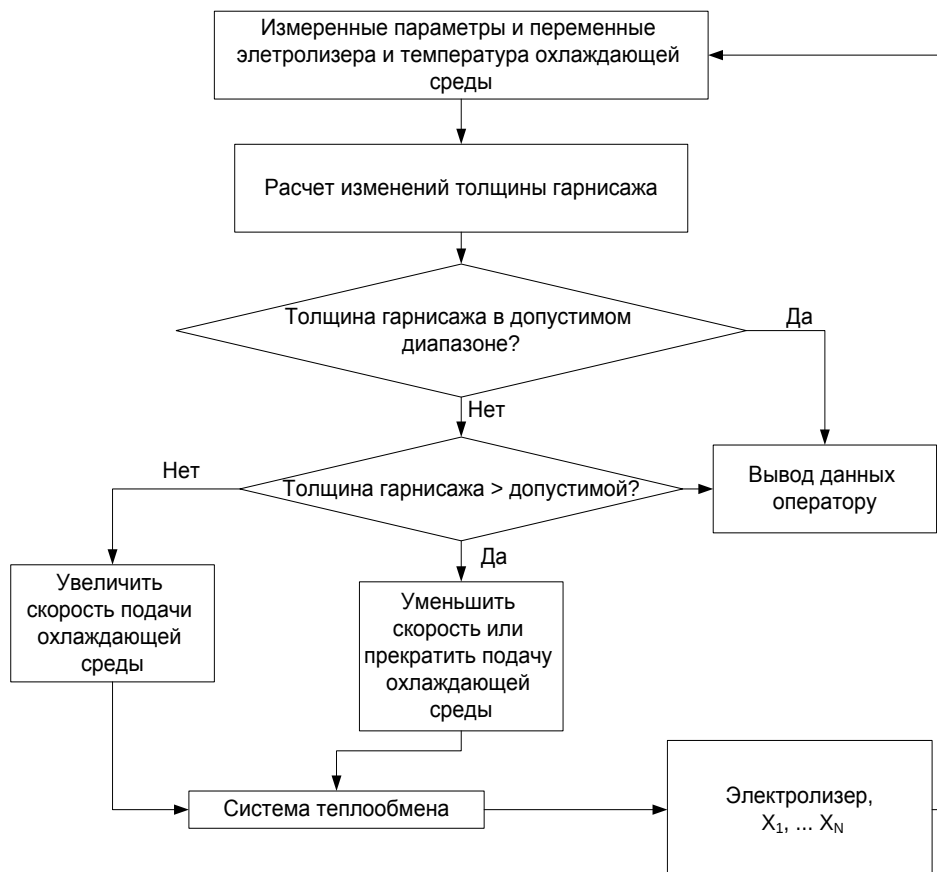


Рисунок 2.17 – Алгоритм стабилизации гарнисажа

Исходя из всего выше перечисленного, можно сделать вывод о том, что модель по определению поведения гарнисажа при переменных управляющих воздействиях не только применима для реализации изложенных идей, но и поднимет качество управления стабилизацией гарнисажа и в целом тепловым балансом электролизера. Авторская модель и алгоритм стабилизации толщины гарнисажа позволяют определять текущую толщину гарнисажа, и в случае, если текущая толщина отлична от оптимальной, даёт возможность оператору заблаговременно принимать решения, либо автоматически управлять толщиной гарнисажа.

ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ

В настоящее время не существует непрерывных методов измерения температур расплава, бортов, толщины гарнисажа, поэтому уверенно идентифицировать можно только стационарные расчеты моделей. Динамические же расчеты возможно идентифицировать либо путем специально организованных затратных экспериментов – например, установка датчиков тепловых потоков на борта, ежечасный отбор проб химического состава и измерение температур расплава в течение 2 – 3 суток. Измерение толщины гарнисажа регламентно проводится раз в сутки не очень надежным ручным способом. Более частое измерение позволит выявить нам тенденцию, а не точное значение. Но правильность рассчитанных переходных процессов можно оценивать по косвенным признакам, таким как химические анализы состава, мнение экспертов, опыт работы с уже действующими алгоритмами на базе ранее разработанных моделей, поведение аппаратов при авариях. Опыт практической работы показывает, что представленная численная 1-D модель правильнее оценивает время переходных процессов и задержку отклика на воздействие.

Таким образом, первым результатом главы является новая одномерная динамическая модель теплопередачи через бортовую футеровку электролизера с учетом фазового перехода для использования в алгоритме управления тепловым балансом электролизера.

Вторым результатом главы является использование новой модели для расчета управляющих воздействий напряжением на электролизере. Вольт-добавки были промоделированы на модернизированном ПО "Виртуальный электролизер" и переданы заказчику. Разработанная матрица вольт-добавок внедрена на электролизерах ОА – 120, РА – 180.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ НАГРЕВОМ МАТЕРИАЛОВ В ПЕЧАХ

3.1 Технология нагрева материалов в печах и обзор подходов к моделированию

В современных системах управления техническими объектами регулирование по отклику (ПИД – регулирование) меняется на упреждающее регулирование с целью ресурсосбережения и повышения качества управления. В связи с этим требуются математические модели для управления металлургическими печами, позволяющие в режиме реального времени прогнозировать распределение температуры нагреваемых материалов в зависимости от изменения подаваемой мощности, время нагрева тел, режимов нагрева. В алгоритмах АСУТП удобно использовать либо статистические модели, либо упрощенные модели, описываемые обыкновенными дифференциальными уравнениями, как например, в работах [82 – 84]. При этом встает вопрос о корректности использования таких моделей для исследования теплообменных процессов.

Металл нагревают, чтобы придать ему определенные пластические свойства, необходимые для обработки давлением, или чтобы провести определенные изменения в его кристаллической решетке [85]. От условий нагрева зависит качество, количество и себестоимость готовой продукции.

Как известно, термическая обработка слитков или литых деталей дает возможность улучшения их механических свойств или даже коррозионной стойкости. Существует несколько видов термической обработки, например: отжиг, стабилизирующий отпуск, гомогенизация, упрочнение старением.

К примеру, отжиг алюминиевых слитков проводят для устранения или уменьшения дендритной ликвации компонентов, снятия остаточных напряжений, возникающих в процессе литья, и формирования структуры, обеспечивающей

наилучшие технологические свойства. Отжиг проводят при температурах 350 – 430°C в течение 2-х часов.

Режимы гомогенизации плоских слитков должны обеспечивать достаточную технологическую пластичность при прокатке и необходимый уровень свойств. Гомогенизацию слитков основных алюминиевых сплавов проводят при температуре 480 – 630°C продолжительностью от 6 до 36 часов.

Широко используемым является конвективный нагрев материала в печах, осуществляемый за счет горячего воздуха, перемещаемого вентиляторами в электрической печи или газовой смеси, выделяющейся при горении топлива [86].

Электрические печи сопротивления обычно используют для термической обработки изделий, которые должны изменять свою температуру в соответствии с заданным режимом обработки. На рисунке 3.1 представлена простая структурная схема управления, используемая в большинстве эксплуатируемых на металлургических предприятиях печах. Эта схема не всегда может обеспечить качество нагрева материалов.

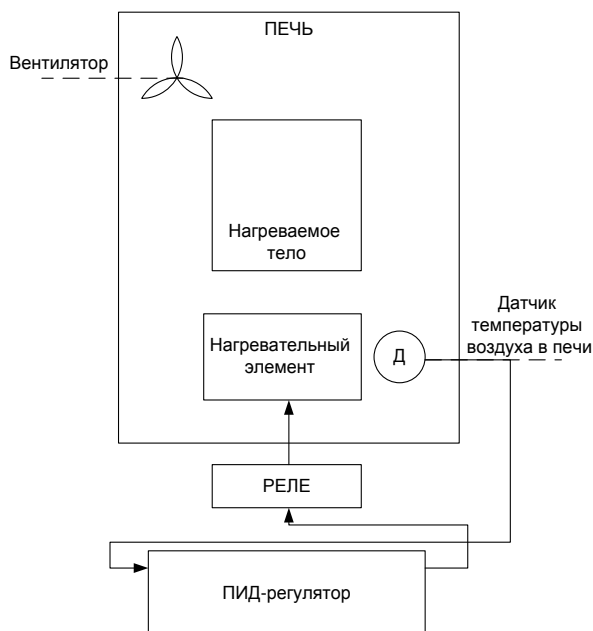


Рисунок 3.1– Структурная схема автоматического управления электрической конвективной печью для гомогенизации алюминиевых слэбов

С одной стороны, нагревать нужно быстро, так как с уменьшением времени нагрева повышается производительность печи и снижается угар металла, но с другой стороны, необходимо избегать перегрева поверхностей и разрушения металла под действием температурных напряжений.

Также важным показателем является равномерность нагрева – разность температур поверхности и центра металла при выдаче из печи. В зависимости от вида дальнейшей обработки заготовок предъявляются определенные требования к этому показателю. Выравнивание температур требует изменения режимов нагрева, используется естественное выравнивание после выхода из печи. В практических условиях температуру внутри металла измеряют лишь в порядке эксперимента и время нагрева заготовок с требуемой равномерностью подбирают опытным путем [87, 88].

Например, прокатка листов и лент из титана и его сплавов имеет ряд специфических особенностей, обусловленных высокой химической активностью и технологическими свойствами этого металла. Круглые титановые слитки, изготовленные из менее пластичных сплавов, перед прокаткой подвергают ковке с целью разрушения крупнозернистой структуры. Металл перед ковкой нагревают до 850 – 1000 °С в газовых или электрических печах с защитной или восстановительной газовой средой. Ковку ведут на прессах при малых скоростях и степени деформации, с промежуточными подогревами. Ковкой получают прямоугольные заготовки (сутунки), которые направляют на прокатку.

Плоские слитки из пластичных сплавов подвергают непосредственно прокатке. Титановые слитки и сутунки перед прокаткой нагревают до 850 – 1050 °С. Температура в конце прокатки должна быть не ниже 700 – 800°С, в противном случае делается повторный нагрев. Для улучшения качества поверхности листов из титана и его сплавов и получения заданных механических свойств горячая прокатка дополняется холодной или теплой при 200 – 400 °С, а для снятия наклепа предусматривают промежуточные отжиги при 600 – 815°С. Прокатанные листы получают толщиной от 0,3 мм и выше при ширине до 1220 мм [89].

Горячая прокатка алюминиевых слитков также имеет определенные требования к температурным режимам. Перед прокаткой слиток нагревают до 450 – 580°C в зависимости от состава сплава и толщины. При повторной прокатке со скоростью 180 – 300 м/мин и при более высокой скорости на прокатной линии прокатку осуществляют с использованием стабильной эмульсии, начальная концентрация которой составляет 2 – 6%, а температура на входе 35 – 60°C; температура металла при последнем проходе находится в пределах от 230 до 280 °C. Для получения требуемого профиля горячей полосы необходим тщательный контроль температуры [86].

Основным направленно изменяемым параметром при управлении нагревом металла является температура рабочего пространства печи. Задачей локальной системы является обеспечение заданной температуры рабочего пространства в зоне отопления путём соответствующего изменения ее тепловой нагрузки.

На самом же деле, важнейшим параметром, характеризующим режим нагрева, является температура металла. Существенной является не только температура поверхности заготовки, но и её распределение по толщине. Однако, непрерывный замер этого распределения для всех нагреваемых заготовок в процессе нормальной эксплуатации печи невозможен. Ещё более сложная задача возникает при переходе от систем регулирования температуры печного пространства к системе регулирования непосредственно температуры металла в процессе его нагрева. Автор работы [90] предложил распределенные измерения в зонах печи температуры среды и поверхности металла. Непрерывное определение распределения температур по толщине заготовки может быть выполнено только расчётами с периодическим уточнением получаемых результатов путем измерения действительных температур на поверхности и внутри контрольной заготовки с помощью специальных термопар.

Авторы работы [91] используют нейросети для предсказания температуры нагрева плиты в печи Roller Hearth Normalizing. В работе [92] описаны возможности применения искусственных нейронных сетей (ANN), которые могут быть использованы в будущем для прогнозирования оптимальной температуры

термообработки стали без сложных металлургических и математических моделей, описывающих эволюцию микроструктуры во время закалки и отпуска.

В статье [93] представлена новая система управления Level – 2 – Computer, разработанная для тепловой печи в линии термообработки листовой стали, которая включает в себя систему контроля Level-2, сетевую структуру для Level – 2, разработанное программное обеспечение и некоторые расчетные формулы математической модели тепловой печи, а также блок-схему основной программы для математической модели. Экспериментальные данные показывают, что предложенная система повышает не только эффективность работы печи, но и сокращает потребляемую объектом энергию.

В статье [94] осуществляется расчет температуры прогрева плиты на основании одномерного уравнения теплопроводности и измеренной температуры воздуха в печи.

В работе [95] предлагается решение для температурного моделирования и управления в туннельной печи термической обработки, используемой в металлургии. Математическая модель нагрева является системой обыкновенных дифференциальных уравнений и решается аналитически. На основании полученной математической модели простой ПИД – регулятор настраивается с использованием теории нелинейных систем. Для получения ограничительных контрольных характеристик, наложенных процедурой термообработки, PID-регулятор модифицируется с использованием теории систем дробного порядка. Результаты моделирования системы температурного контроля представлены сравнением расчетов с использованием контроллера целочисленного порядка и контроллера дробного порядка.

3.2 Модель нагрева материалов в конвективных печах для АСУТП

Расчет работы печи и нагрева материалов может состоять из нескольких блоков:

- расчет изменения температуры греющей среды в зависимости от изменения мощности в печи;
- расчет самого изменения мощности, расчет теплотерь футеровкой печи;
- расчет нагрева материалов;
- выделение или поглощение тепла при сопутствующих реакциях или испарении влаги.

В целом теплообмен нагреваемых материалов с воздухом печи, а также стенок печи с внутренней и внешней средой, может быть при некоторых допущениях записан следующей системой обыкновенных дифференциальных уравнений, приводимой, например, в работе [95]:

$$m_a c_a \frac{dT_a}{dt} = Q - k_a(T_a - T_w) - k_{a-m}(T_a - T_m), \quad (3.1)$$

$$m_m c_m \frac{dT_m}{dt} = k_{a-m}(T_a - T_m), \quad (3.2)$$

$$m_w c_w \frac{dT_w}{dt} = k_{a-w}(T_a - T_w) - k_{w-e}(T_w - T_e), \quad (3.3)$$

где T_a – средняя температура воздуха в печи; Q – приход тепла от электронагревателей или сгорания топлива; T_w – средняя температура стенок печи; T_m – средняя температура материала в садке; T_e – температура воздуха в цехе; m_i , c_i – массы и теплоемкости указанных сред; k_{i-j} – коэффициенты теплопередачи, включающие в себя коэффициенты теплообмена «поверхность – воздух» и теплопроводности твердых слоев.

С помощью этой системы можно определить среднюю скорость нагрева всей садки, скорость изменения температуры воздуха при изменении мощности нагревателей, суммарные теплотери печью в окружающую среду. Но как уже было отмечено выше, актуальным является вопрос определения скорости и температур прогрева садки внутри и прогрева отдельных элементов садки по толщине.

Этот вопрос может быть решен с помощью одно- или двухмерного нестационарного уравнения теплопроводности. В настоящее время в системах управления становится возможным использовать и многомерные модели, соединив их с алгоритмами управления и сосредоточенными моделями, например, на платформе SimInTech [96]. Но, получение простых аналитических решений, легких в отладке и удобных для занесения в контроллер при использовании локальных АСУТП нижнего уровня, по-прежнему, актуально.

Целью работы является создание модели для использования в алгоритмах АСУТП, которая позволит управлять скоростным конвективным нагревом металлических слитков. Для тестирования и определения границ применения, расчеты по разработанной модели в обыкновенных дифференциальных уравнениях сравнивались с расчетами по эталонной модели, основанной на нестационарном уравнении теплопроводности. Рассматривался нагрев материалов с высокой и низкой теплопроводностью.

В настоящей работе проведен сравнительный анализ различных математических моделей и расчетов нагрева материала в печи конвективного теплообмена. Газовоздушная среда приводится в движение различными способами, например, работой вентиляторов, или за счет использования современных топливосжигающих устройств с высокой скоростью истечения струи [83]; коэффициенты теплообмена достигают значений 300 – 400 Вт/(м²К).

В качестве эталонной модели взята модель конвективного нагрева сляба из книги [26], основанная на одномерном нестационарном уравнении теплопроводности и граничных условиях 1 и 3 рода. Модель имеет численное и аналитическое решения и принимается за эталонную для проверки предложенной в работе модели. Динамическое распределение температуры по сечению сляба описывается уравнением теплопроводности (3.4) и краевыми условиями (3.5 – 3.7):

– уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, 0 < y < \delta; \quad (3.4)$$

где $a = \lambda / c\rho$ – коэффициент температуропроводности

– начальное условие

$$T(y, 0) = T_i, 0 \leq y \leq \delta; \quad (3.5)$$

– граничное условие при $y=0$ (середина сляба) является следствием симметрии температурного поля

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = 0; \quad (3.6)$$

– граничное условие 3-го рода при $y=\delta$, соответствующее постоянной температуре окружающей среды T_0 и постоянному, не зависящему от температуры, коэффициенту теплоотдачи α

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=\delta} = \alpha \cdot (T_0 - T|_{y=\delta}). \quad (3.7)$$

Сляб нагревают в течение 480 с в печи скоростного конвективного нагрева. Половина толщины сляба δ равна 0,08 м, начальная температура сляба $T_n = 1100\text{K}$. Температура газа $T_0 = 2000\text{K}$, коэффициент теплоотдачи $\alpha = 350\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$. Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности соответственно равны: $\lambda = 28\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$ и $a = 6,4 \cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$.

В литературе [84 – 86] приводится аналитическое решение этой задачи, полученное методом разделения переменных:

$$T_{(y,t)} = T_0 - (T_0 - T_i) \sum_{m=1}^{\infty} C_m \exp(-\mu_m^2 \frac{at}{\delta^2}) \cos(\mu_m \frac{y}{\delta}), \quad (3.8)$$

где $C_m = 2 \sin \mu_m / (\mu_m + \sin \mu_m \cos \mu_m)$, $\mu_m (m=1, 2, \dots)$ представляют собой характеристические числа, удовлетворяющие уравнению $\text{ctg} \mu = \mu / Bi$, $Bi = \alpha \delta / \lambda$ – критерий Био.

Задача (3.4 – 3.7) [26] решалась авторами также численными методами с помощью явной и неявной разностных схем. Результаты расчетов при задании $\Delta y = 0,016\text{ м}$, $\Delta t = 16\text{ с}$ через 480 секунд с начала нагрева приведены в таблице 7.

Аналогичные численные алгоритмы реализованы в работе на языке программирования C++.

Как видно из таблицы 7, погрешность расчетов по разностным схемам, по сравнению с точным решением, незначительная, поэтому в дальнейшем для сравнений других моделей с эталоном в качестве эталона следует использовать расчеты по явной разностной схеме.

Таблица 7 – Сопоставление результатов расчета по явной (вариант 1) и неявной (вариант 2) разностным схемам с точным решением задачи (вариант 3)

Вариант	Температура (К), при y/δ						Максимальная погрешность (К)
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	
1	1295,0	1305,4	1336,3	1386,7	1455,5	1540,6	1,6
2	1292,6	1303,0	1333,6	1383,9	1452,6	1538,0	1,9
3	1294,4	1304,8	1335,4	1385,8	1454,2	1539,0	–

Для нагрева тел простейшей формы (бесконечная пластина, бесконечный цилиндр, шар) при граничных условиях третьего рода имеются аналитические решения, подобные (3.8), но они слишком громоздки для инженерных расчетов. Поэтому в металлургической теплотехнике для определения температур поверхностей и центра слябов используются наборы специальных графиков для безразмерных температур в зависимости от критериев Bi и Fo [85]. 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 в связи с возможным изменением режимов нагрева.

Рассмотрим упрощенную модель нагрева материалов, учитывающую теплопроводность нагреваемого материала, удобную к использованию в АСУТП. Также предложенная модель позволяет оценивать разницу температур поверхности и середины сляба – в металлургической практике это называется «равномерностью нагрева».

Сляб по сечению (половина сечения) разбит на 2 зоны, основная (толстый слой) и пограничная (тонкий слой) (рисунок 3.2).

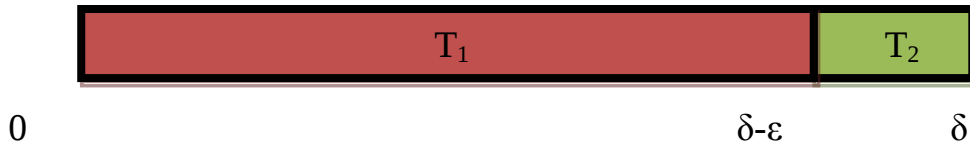


Рисунок 3.2 – Схематичный рисунок сляба, разбитого на участки $0 \leq y \leq \delta - \varepsilon$ (толстый слой) и $\delta - \varepsilon \leq y \leq \delta$ (тонкий слой)

Уравнения (3.9–3.10) определяют средние температуры в областях $0 \leq y \leq \delta - \varepsilon$, $\delta - \varepsilon \leq y \leq \delta$ и среднюю температуру всего тела:

$$\begin{cases} (\delta - \varepsilon) \cdot c \cdot \rho \cdot \frac{d\bar{T}_1}{dt} = k_{1-2} \cdot (\bar{T}_2 - \bar{T}_1) \\ \varepsilon \cdot c \cdot \rho \cdot \frac{d\bar{T}_2}{dt} = \alpha \cdot (T_0 - \bar{T}_2) - k_{1-2} \cdot (\bar{T}_2 - \bar{T}_1) \end{cases}; \quad (3.9)$$

$$\bar{T}_{cp} = \frac{(\delta - \varepsilon) \cdot \bar{T}_1 + \varepsilon \cdot \bar{T}_2}{\delta}. \quad (3.10)$$

$$\bar{T}_1(0) = \bar{T}_1^0, \quad \bar{T}_2(0) = \bar{T}_2^0 \quad (3.11)$$

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.

Уравнения (3.9) с начальными условиями (3.11) решались аналитически.

Аналитическое решение получено путем сведения уравнений (3.9) к неоднородному уравнению второго порядка с постоянными коэффициентами (3.12)

$$\frac{d^2 \bar{T}_1}{dt^2} + b_1 \frac{d\bar{T}_1}{dt} + b_2 \bar{T}_1 = b_2 T_0, \quad (3.12)$$

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

Решение запишется в виде (3.13):

$$\begin{cases} \overline{T}_1 = A \cdot e^{\lambda_1 t} + B \cdot e^{\lambda_2 t} + T_0 \\ \overline{T}_2 = \overline{T}_1 + \frac{a_1}{k_{1-2}} \cdot (\lambda_1 \cdot A \cdot e^{\lambda_1 t} + \lambda_2 \cdot B \cdot e^{\lambda_2 t}) \end{cases} \quad (3.13)$$

где

$$\begin{aligned} \lambda_{1-2} &= \frac{b_1 \pm \sqrt{b_1^2 + 4b_2}}{2}, \\ A &= \frac{\frac{k_{1-2}}{a_1} \cdot (\overline{T}_2^0 - \overline{T}_1^0) - \lambda_2 \cdot (T_0 + \overline{T}_1^0)}{\lambda_1 - \lambda_2}, \\ B &= \overline{T}_1^0 - T_0 - A. \end{aligned} \quad (3.14)$$

В предельном случае $\varepsilon=0$ решение задачи имеет вид

$$\overline{T}_1 = T_0 + A \cdot e^{-\mu t}, \quad (3.15)$$

где $\mu = \frac{\alpha \cdot k_{1-2}}{c\rho\delta(\alpha + k_{1-2})}$, $A = \overline{T}_1^0 - T_0$.

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

Для случая изменения условий нагрева $T^0 = T^0(t)$ задача (3.9 – 3.11) решается численно.

3.3 Проведение исследований нагрева сляба разными расчетными методами и сравнительный анализ полученных результатов

Эталонная модель [26] и разработанная автором в предыдущем параграфе реализованы методами конечных разностей и аналитическими методами. По разработанным компьютерным программам проведена серия расчетов и выполнен сравнительный анализ полученных результатов. Исходные данные для первого расчета приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Исходные данные тестового расчета

Переменная	Значение переменной	Единицы измерения
c_p	4375000	Дж·кг/(К·м ³)
α	350	Вт/(м ² ·К)
δ_1	0,064	м
ε	0,016	м
δ	0,08	м
k_{1-2}	700	Вт/(м ² ·К)
t	4800	с
dt	16	с
T_0	2000	К
λ	28	Вт/(м·К)
a	0,0000064	м ² /с
$T_{\text{нач}}$	1100	К

На рисунке 3.3 приведены расчеты средней температуры сляба отмеченными выше способами при исходных данных из таблицы 8. Введены обозначения: Модель УЧП – (3.3 – 3.7), модель ОДУ – (3.9 – 3.11).

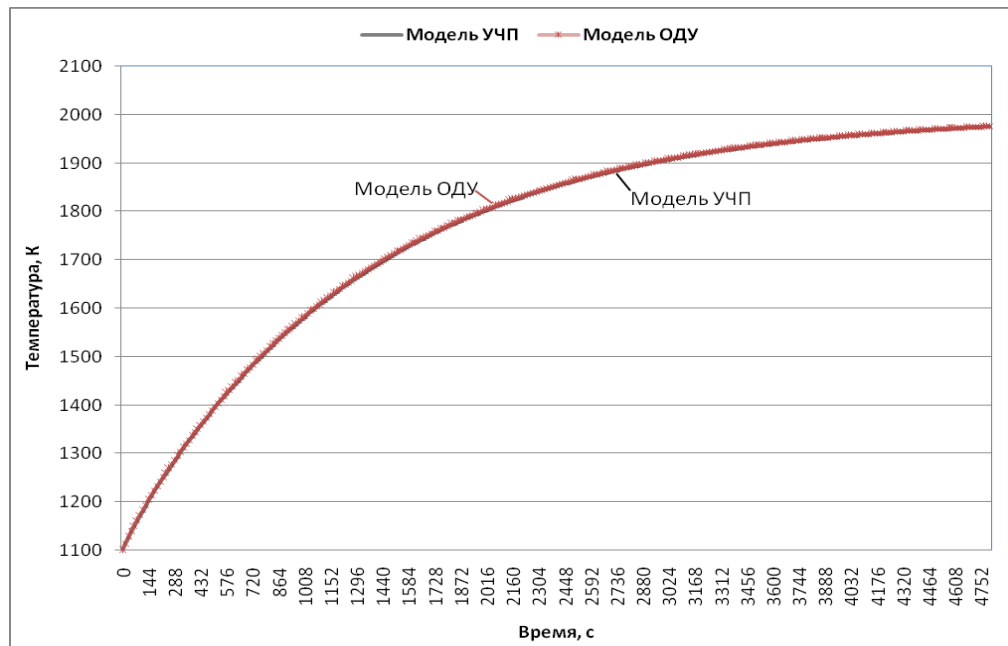


Рисунок 3.3 – Результаты расчетов средней температуры сляба при высокой теплопроводности материала по эталонной модели (модель УЧП) и по модели (модель ОДУ)

Как видно из рисунка 3.3, решения практически совпадают, имеют отличия не более 3-х °С. На 480 секунде с начала нагрева средняя температура сляба по эталонной модели составляет 1380,34К, по предложенной модели составляет 1382,22К, при $\varepsilon=0,016$.

Это позволяет сделать вывод о том, что модель (3.9 – 3.11) ОДУ хорошо применима к объектам, обладающим достаточно высокой теплопроводностью, каковыми являются все металлы.

Проведены исследования зависимости средней температуры по всей толщине сляба от толщины тонкого слоя. Результаты исследования представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Результаты расчета по определению средних температур слоев по модели ОДУ при задании теплопроводности 28 Вт/(м·К), шага по времени 16 с и времени нагрева 480 с

Толщина тонкого слоя, м	Средняя температура толстого слоя, К	Средняя температура тонкого слоя, К	Средняя температура сляба, К	Средняя температура сляба по явной разностной схеме, К
0,0160	1343,01	1539,06	1382,22	1380,34
0,0100	1344,41	1549,52	1370,05	
0,0050	1345,91	1557,58	1359,14	
0,0045	1346,07	1559,88	1348,11	
0,0040	1346,24	1559,12	1337,75	

По полученным результатам видно, что при уменьшении толщины тонкого слоя скорость нагрева падает по всей толщине сляба. Оптимальная толщина тонкого слоя $\varepsilon=0,016$ м.

Проведем аналогичные расчеты нагрева материалов с низкой теплопроводностью, исходные данные для второго расчета отличаются от исходных данных в таблице 8 теплопроводностью 1 Вт/(м·К) и шагом по времени 16 с, результаты расчетов приведены на рисунке 3.4.

В отличие от предыдущего случая (рисунок 3.3), наблюдается разница в расчетах эталонной моделью и предложенной. На 480 секунде нагрева эталонная модель дает температуру 1224,95 К, а предложенная модель температуру 1274,82 К. Рисунок 3.4 показывает, что за расчетное время 4800 с нагрев еще не вышел на стационарный режим, но уже наблюдается схождение расчетов по двум моделям. Тело разогревается до максимальной температуры, нагрев выходит на стационарный режим через 14 часов работы.

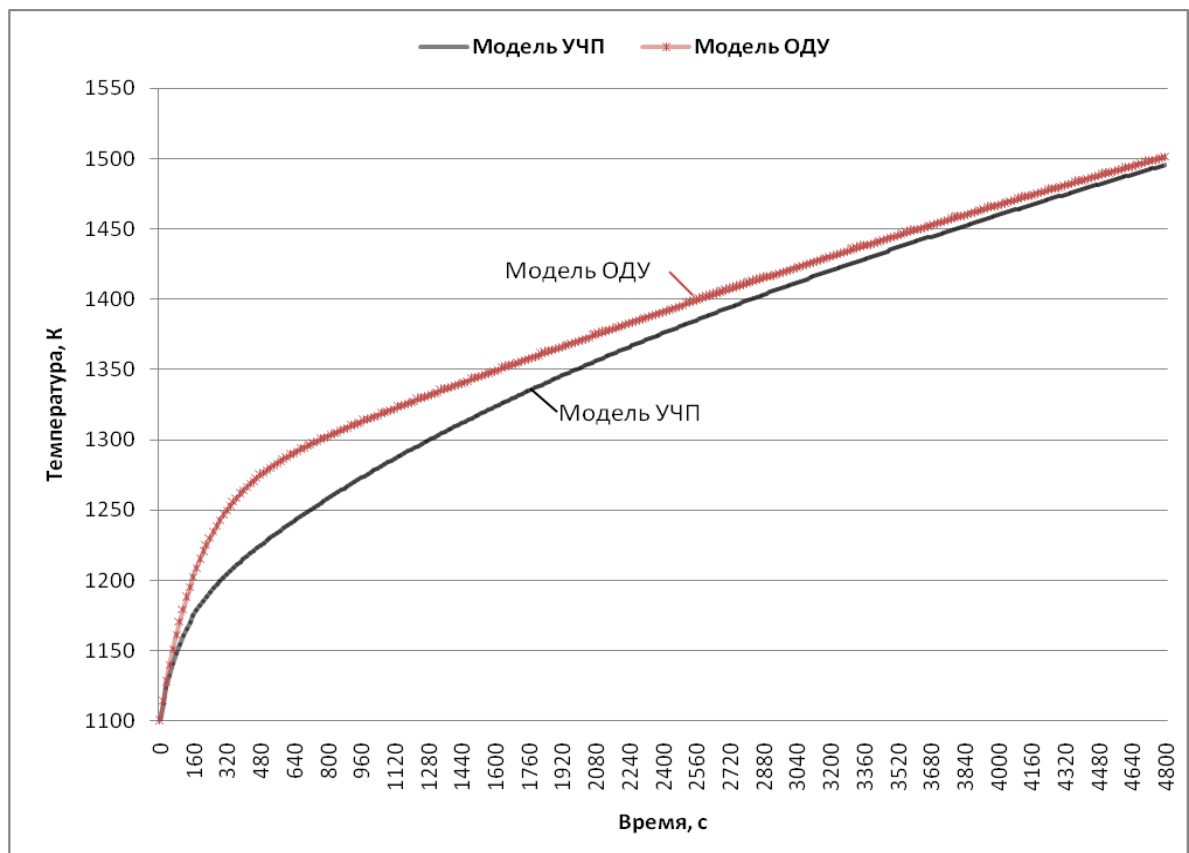


Рисунок 3.4 – Сравнение результатов расчета между эталонной моделью (модель УЧП) и моделью ОДУ по определению средней температуры тела при низкой теплопроводности нагреваемого материала, $\epsilon=0,016$ м

Проведены исследования зависимости средней температуры по всей толщине нагреваемого тела от толщины тонкого слоя. Результаты исследования представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Результаты расчета по определению средних температур слоев по модели ОДУ при задании теплопроводности 1 Вт/(м·К), шага по времени 16 с и времени нагрева 480 с

Толщина тонкого слоя, м	Средняя температура толстого слоя, К	Средняя температура тонкого слоя, К	Средняя температура температура сляба, К	Средняя температура сляба по явной разностной схеме, К
0,016	1122,6	1883,72	1274,82	1224,949
0,013	1123,55	1911,34	1251,56	
0,010	1124,64	1931,1	1225,44	
0,005	1126,59	1941,47	1177,52	

По полученным результатам видно, что при уменьшении толщины тонкого слоя скорость нагрева падает по всей толщине тела. Оптимальная толщина тонкого слоя $\varepsilon=0,01$ м. для равенства температур, рассчитанных по предложенной и эталонной моделям на 480 секунде расчетного нагрева.

Следует отметить, что на рисунках 3.3 и 3.4 представлен разогрев металлического сляба или нагреваемого тела до значительных температур, редко достигаемых в промышленных печах, также и теплопроводности металлов не бывают ниже значения 15 Вт/(м·К). Не совсем реальные значения температур и теплопроводностей взяты для выяснения границ применения модели.

Из таблиц 9 и 10 следует, что модель ОДУ требует правильного определения толщины тонкого слоя при расчете нагрева различных материалов. При использовании модели в АСУТП печи нагрева — это можно сделать один раз, путем сравнения с эталонной моделью или при сравнении с экспериментальными данными, при известном диапазоне теплопроводностей греющихся в печи материалов. Обычно на производственном участке в печи технологической линии греют один вид продукции. Предполагается, что при выборе правильной толщины тонкого слоя будет возможно скорректировать модель ОДУ с низкой теплопроводностью на этапе разогрева.

На рисунках 3.5 и 3.6 приведены примеры такого подбора для материала с низкой теплопроводностью и исходными данными для расчета из таблицы 9.

Видно, что при снижении толщины ε , разница температур предложенной и эталонной модели уменьшается в выбранной контрольной точке 480 сек, но при этом увеличивается отличие температур в точке 4800 сек. При достаточно больших временах, при выходе на стационарный режим результаты расчетов совпадают. Поэтому для правильного определения ε необходимо при нагреве материалов ориентироваться на времена выдержки материала в печи и заданные температуры нагрева соответствующих материалов.

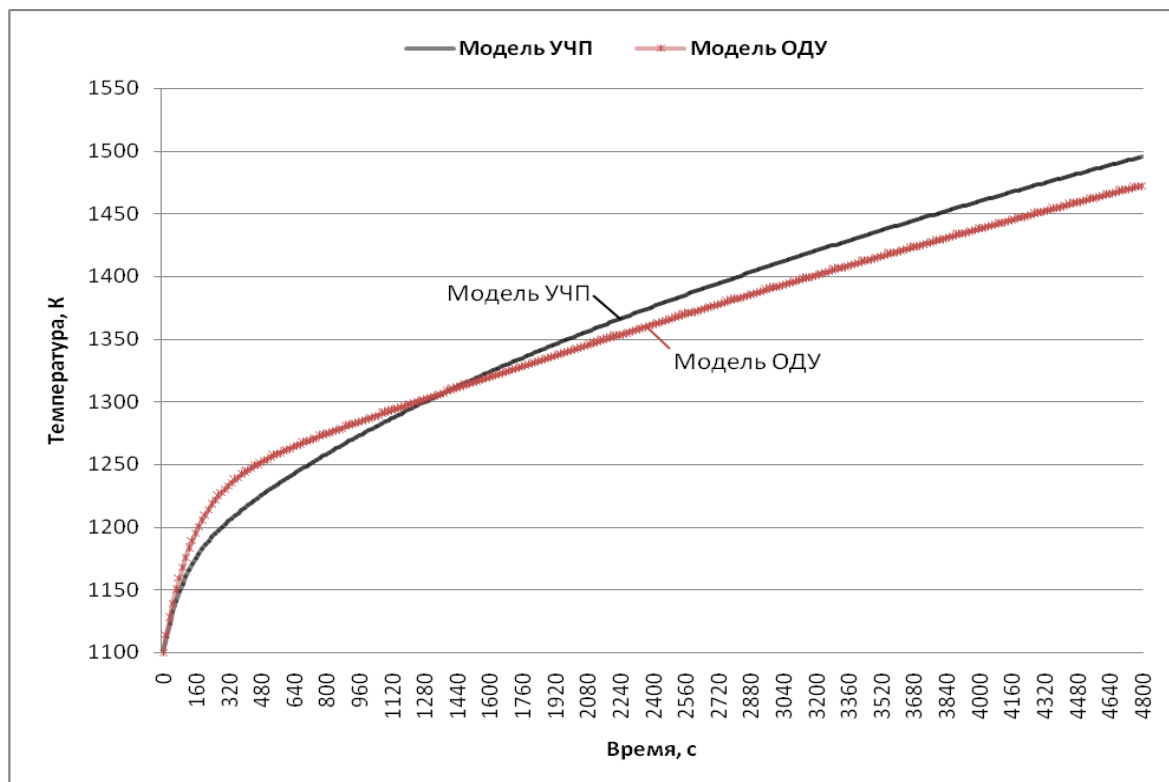


Рисунок 3.5 – Сравнение результатов расчета между эталонной моделью (модель УЧП) и моделью ОДУ по определению средней температуры тела при низкой теплопроводности нагреваемого материала, $\varepsilon=0,013$ м

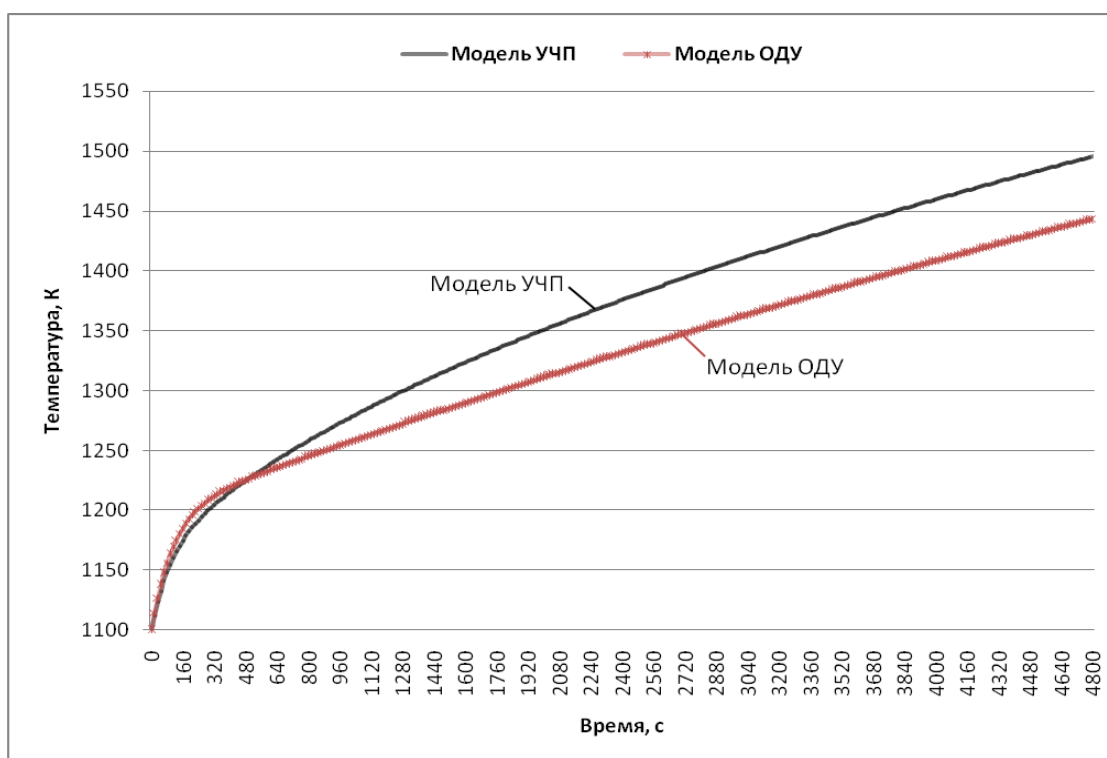


Рисунок 3.6 – Сравнение результатов расчета между эталонной моделью (модель УЧП) и моделью ОДУ по определению средней температуры тела при низкой теплопроводности нагреваемого материала, $\epsilon=0,01$ м

3.4 Алгоритм управления печью на основе модели нагрева. Модернизация АСУТП печей нагрева

На производстве скорости нагрева и охлаждения газовой среды в печи чаще всего определяются экспериментально и обусловлены конструкцией печи и мощностью нагревателей. Также их можно определить из системы (3.1 – 3.3).

Для разработки алгоритма управления проведены численные эксперименты. При реализации расчетов был запрограммирован экспериментальный закон изменения температуры воздуха в печи (показан на верхних графиках рисунка 3.7), 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. В таблице 11 приведены данные для алюминиевого сляба, для других материалов в расчете отличались теплоемкость, теплопроводность и плотность.

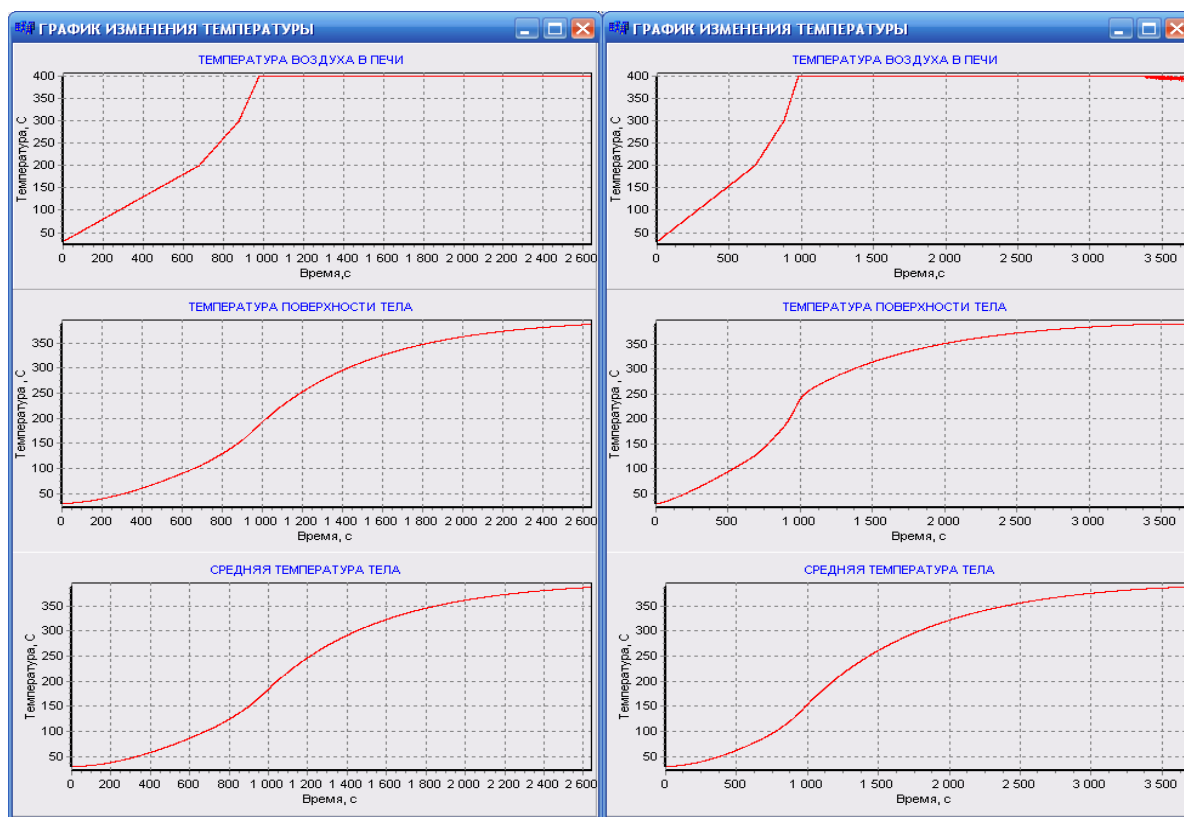
Таблица 11 – Данные для расчета нагрева алюминиевого сляба

Название	Значение	Размерность
Толщина тела	0,16	м
Толщина тонкого тела	0,013	м
Плотность	2712	кг/м ³
Теплоемкость	904	Дж/(кг·К)
Температуропроводность	$9,38 \cdot 10^{-5}$	м ² /с
Коэффициент теплопроводности	230	Вт/(м·К)
Коэффициент теплоотдачи	350	Вт/(м ² ·К)
Начальная температура тела	30	°С
Начальная температура среды	30	°С
Заданная температура поверхности тела, $T_{з.п.}$	389	°С
Заданная температура центра тела, $T_{з.ц.}$	387	°С

При исходных данных из таблицы 11 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 3.7.

Как видно из рисунков, температура воздуха в печи менялась программно с заданными скоростями 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°С. А при нагреве титанового сляба, переходные процессы которого показаны на рисунке 3.7б, максимальный перепад температур составлял около 50°С и постепенно снижался до 5°С. Это можно объяснить 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.



а

b

Рисунок 3.7 – Расчеты изменения температур в разных точках объекта (а – алюминиевый сляб, b – 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.

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, основанный на экспериментальном законе, который прерывается, когда расчетная температура

середины тела ($T_{з.ц.}$) достигнет заданного значения, обусловленного показателями качества для готового продукта.

На рисунке 3.8 представлен алгоритм управления нагревом слэбов, основанный на расчетных температурах поверхности и середины слэбов.



Рисунок 3.8 – Алгоритм управления нагревом материалов в печи

Предлагаемый алгоритм управления, представленный на рисунке 3.8, позволяет регулировать температуру воздуха в печи, исходя из заданных значений поверхности и середины слэба.

Можно предложить модернизацию АСУТП действующей печи без затрат на установку распределенной системы измерений. Предложенная схема улучшений отображена на рисунке 3.9.

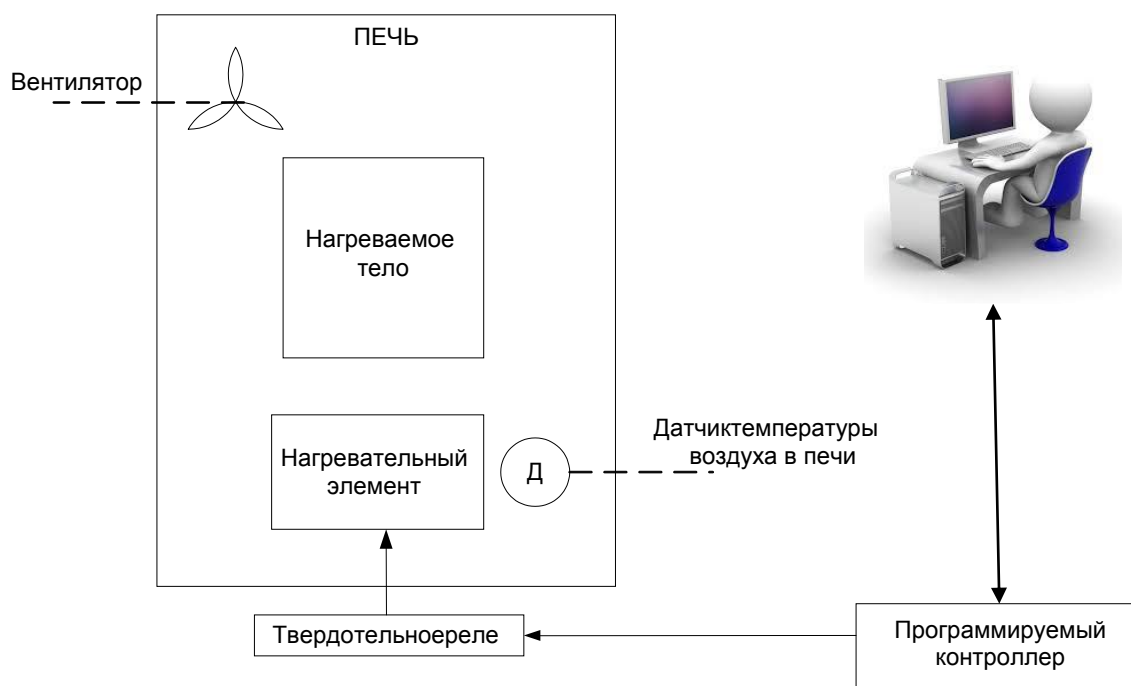


Рисунок 3.9 – Предлагаемая модернизированная структурная схема автоматического управления электрической конвективной печью для гомогенизации алюминиевых слэбов

Как видно из рисунка 3.9, предлагаемая схема управления включает в себя ПК и программируемый контроллер (или только контроллер) с предустановленным алгоритмом управления, содержащим модель, которая позволяет определять температуру на поверхности слэба и в его центре, что в свою очередь значительно повышает качество продукции. Контроллер может служить просто для передачи сигнала от датчика в компьютер и от компьютера на реле нагревателя, но может и заменить собой компьютер при наличии в нем возможностей для программирования сложных алгоритмов и подключения панелей визуализации процесса.

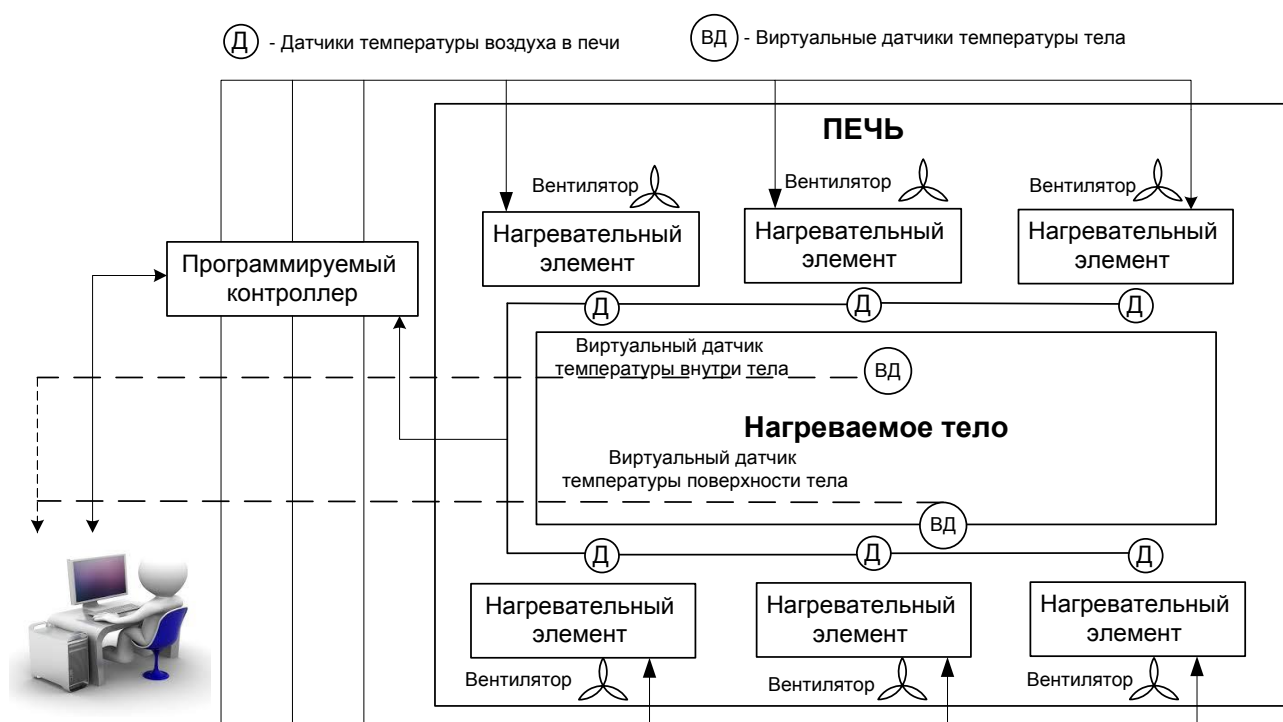


Рисунок 3.10 – Многоканальное регулирование

Следует отметить, что программа позволяет рассчитывать температуру тела и регулировать температуру воздуха в различных точках объекта, показанного на рисунке 3.10. Это обусловлено тем, что модель опирается на показания датчика температуры воздуха в печи, как следствие при наличии нескольких нагревателей и датчиков, алгоритм может параллельно рассчитывать прогрев тела в разных точках и управлять температурой каждой зоны отдельно. Эта возможность позволяет рассчитывать поле распределения температуры нагреваемых материалов по всему объему садки и экономить на нагреве. Например, при открытии дверцы, когда температура воздуха в печи резко падает в ближайших к дверце зонах, мощность нагревателей будет распределяться неравномерно: так, нагреватели у дверцы поднимут мощность, а нагреватели у противоположной стенки оставят подаваемую мощность без изменений.

ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ

При решении задачи прогрева материалов использовались аналитические и численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений, аналитическое и конечно-разностное решение третьей краевой задачи для уравнения теплопроводности.

Предложена модель нагрева материалов в печи скоростного конвективного нагрева, построенная на обыкновенных дифференциальных уравнениях и позволяющая при работе в составе АСУТП рассчитывать скорости и режимы нагревов, оценивать равномерности нагревов слитков для предоставления этих данных оператору или для автоматического изменения подводимой мощности или изменении времени нагрева. Предложен алгоритм управления на основе модели в АСУТП печи взамен традиционного ПИД – регулирования. Разработанная модель и программное обеспечение также могут быть использованы в компьютерных тренажерах для отладки АСУТП и обучения операторов прокатных линий, подобных описанным в работах [97 – 100].

Глава 4. Автоматизированная система научных исследований для решения задач теплотехники

Современные теплоэнергетические установки (котлоагрегаты, электролизеры, печи и др.) состоят из большого количества взаимосвязанных элементов, в каждом из которых протекают сложные физические процессы. Закономерности, описывающие эти процессы, сложны и многообразны и с трудом поддаются математическому описанию. Эти трудности значительно возрастают при комплексном исследовании всей системы [101, 102]. Сложность процессов создает нелинейные проблемы при управлении объектами, что в свою очередь создает сложности при понимании обслуживающим персоналом поведения аппарата. Поэтому необходимо развивать системы исследования и моделирования металлургических объектов.

Исследование таких объектов может быть проведено экспериментальными методами, методами физического и математического моделирования. Вообще теоретическом плане моделирование означает осуществление каким-либо способом отражения или воспроизведения действительности для изучения имеющихся в ней объективных закономерностей. Экспериментальные способы исследования имеют первостепенное значение в качестве основы для построения теории процесса и являются критерием для оценки точности знаний об объекте [81]. Однако эти способы не всегда могут служить эффективным рабочим методом получения информации о свойствах теплоэнергетических установок. Экспериментальные данные не могут использоваться для оценки свойств проектируемого оборудования, особенно новых типов, поскольку в этом случае требуются значительное обобщение и экстраполяция результатов, носящих конкретный характер. Физическое моделирование ограничивалось частными задачами отдельных процессов и устройств, а для всей системы не нашло применения [103].

Для исследования теплоэнергетических процессов и установок как сложных систем в настоящее время широкое применение находят методы математического моделирования с применением вычислительной техники [104 – 117].

Отметим некоторые достоинства вычислительного эксперимента по сравнению с натурным. Он, как правило, дешевле физического. В этот эксперимент можно легко и безопасно вмешиваться, многократно повторять и прерывать в любой момент. В ходе этого эксперимента можно смоделировать условия, которые нельзя создать в лаборатории.

Целью настоящей главы является создание программного комплекса для решения исследовательских задач в теплотехнике.

Программный комплекс позволяет с помощью цветowych анимационных иллюстраций и графического интерфейса наглядно представлять полученные результаты, предусматривает возможность интерактивного взаимодействия между пользователем и элементами программы. Данный комплекс может быть использован не только для проведения исследований, но и для подготовки специалистов металлургической отрасли.

Программное обеспечение реализовано в среде объектно-ориентированного программирования C++ Builder. При создании программы использованы: теория теплопередачи, численные и аналитические методы для решения обыкновенных дифференциальных уравнений, уравнений в частных производных и другие.

4.1 Понятия, характеристики и примеры применения автоматизированных систем научных исследований.

Основная функция автоматизированных систем научных исследований (АСНИ) состоит в получении результатов научных исследований (комплексных испытаний) путем автоматизированной обработки экспериментальных данных и другой информации, получения и исследования моделей объектов, явлений и процессов на основе применения математических методов, автоматизированных процедур, планирования и управления экспериментом.

Автоматизированные процедуры в АСНИ состоят в том, что исследования (испытания) объектов, явлений и процессов, получение и исследование математических моделей осуществляется путем взаимодействия пользователя с АСНИ в режиме диалога.

В АСНИ могут осуществляться автоматические процедуры, при которых обработка данных, идентификация или построение математических моделей производятся без участия человека.

В АСНИ могут применяться также процедуры планирования и управления экспериментом, при которых использование моделирования корректирует условия эксперимента, а экспериментальная информация используется для выбора математической модели из некоторого заданного множества таких моделей.

Результатом функционирования АСНИ является подтверждение (отклонение) гипотез или совокупность законченных математических моделей, удовлетворяющая заданным требованиям, а также обработанные результаты исследований, наблюдений и измерений.

Функционирование АСНИ должно обеспечивать получение выходных документов, выполненных в заданной форме и содержащих результаты научных исследований или испытаний, а также рекомендации по использованию этих результатов для прогнозирования, управления или проектирования.

Основными структурными звеньями АСНИ являются подсистемы. Подсистемой АСНИ называется выделенная по некоторым признакам часть АСНИ, обеспечивающая выполнение определенных автоматизированных процедур исследований (испытаний) и получение соответствующих выходных документов [118].

Рассмотрим некоторые работы, посвященные разработке программ для проведения научных исследований.

Большое количество работ представляют собой электронные учебники и методические указания, например, работа [119], в составе которой три работы по технической термодинамике и три – по теплопередаче. По мнению авторов,

использование разработанной ими виртуальной лаборатории позволяет проводить исследования в области теплотехнических процессов. Стоит заметить, очевидным недостатком таких работ является их малая функциональность, в основной своей массе это справочные материалы, учебники, видео или аудио презентации и др.

Однако существуют крупные автоматизированные системы научных исследований, например в работе [82] описан программный комплекс на базе динамической математической модели процесса – учебно-консультационная программа «Виртуальный электролизер» представляет собой программу для расчета и отображения взаимосвязанных изменений технологических параметров при изменении условий процесса. Выбор осуществляется специалистом, работающим с программой, как путем экспертного просмотра результатов имитаций различных вариантов, так и сравнением рассчитанных значений частных критериев эффективности. Имитационные расчеты осуществляются встроенной в программу математической динамической моделью процесса.

Статья [120] посвящена разработке автоматизированных информационно-советующих систем, используемых для исследования металлургических процессов и обучения оперативного персонала навыкам управления технологическими процессами металлургических предприятий.

АСНИ разрабатываются на базе компьютерных тренажеров, основой функционирования которых являются имитационные математические модели (построенные на основе знаний экспертов). По словам авторов, система включает в себя следующие режимы работы: обучение, контроль знаний, советчик, и отвечает требованиям: наглядности, информативности, многофункциональности.

Также в данной работе разработаны модели и алгоритмы, положенные в основу автоматизированных информационно-советующих систем для обучения плавильщиков рудно-термических печей и операторов процесса конвертирования медных штейнов, позволяющие отрабатывать различные ситуации, возникающие на реальном технологическом оборудовании.

АСНИ «Рудотермическая печь» позволяет на модели проверить эффективность различных способов интенсификации производства и в

зависимости от полученных результатов рекомендовать на практике наиболее приемлемый в данных условиях способ интенсификации, обоснование которого осуществляется выбором критерия оптимальности с позиции системного анализа.

Автоматизированная система конвертерного производства позволяет имитировать и регулировать порядок действий, осуществляемый при конвертировании, может применяться для обучения персонала и исследования функционирования технологического процесса конвертирования медных штейнов.

Далее рассмотрим статью [121], в которой идет речь о совместном проекте Челябинского металлургического комбината, входящего в компанию «Мечел», и компании «XJ Technologies» по моделированию реконструкции электросталеплавильного цеха. В результате совместной работы предприятий была создана имитационная модель электросталеплавильного цеха, воспроизводящая различные сценарии его работы.

Необходимо отметить, что разработанная модель соответствует реальной системе и учитывает конфигурацию оборудования и все значимые параметры происходящих в цехе процессов:

- длительность операций;
- последовательность действий для разных сортов;
- промежутки времени между сливом шлака, постановкой в цех вагонов, автотранспорта;
- расход материалов для различных сортов;
- скорость заполнения мусорных корыт и т.д.

Также вышеуказанные данные могут изменяться пользователем для проведения разных вариантов эксперимента. Как отмечают авторы статьи, подобные модели используются на крупных металлургических предприятиях для планирования суточного и месячного производства в цехах с несколькими сталеплавильными агрегатами, где цикл нахождения плавки на агрегате менее 40 минут.

Далее рассмотрим работу [122], авторы представляют имитационную модель как специальную форму математической модели с различными свойствами. Данная работа отражает минимизированную и систематизированную структуру АСНИ, которая позволяет обобщить вышеописанные свойства АСНИ.

По проведенному литературному обзору можно сделать вывод о том, что большая часть АСНИ используется не только для проведения исследований, но и как инструмент для подготовки специалистов без риска аварий на производстве. Так же АСНИ в несколько раз сокращает время проведения исследования, увеличивает точность и достоверность результатов, усиливается контроль за ходом эксперимента, сокращает количество участников эксперимента, повышает качество и информативность эксперимента за счет увеличения числа контролируемых параметров и более тщательной обработки данных.

Не смотря на наличие и дальнейшую разработку различных АСНИ в металлургии, существует незаполненная ниша. Рассмотренные АСНИ являются либо буквально электронными учебниками, иллюстрирующими законы физики, либо программами для исследования конкретного металлургического аппарата или процесса на определенном заводе. Отсутствуют АСНИ, которые позволяют исследовать стационарные состояния и динамические отклики обобщенных элементов конструкций и состояний металлургических аппаратов, не привязываясь к определенно конкретной печи. Это важно при исследовательской работе специалистов по автоматизации (и металлургов), так как им необходимо получать представление о распределении температур в футеровке, о временных задержках в отклике параметров.

4.2 Описание разработанного программного продукта

В состав разработанного программного комплекса для решения задач теплотехники входят следующие блоки, представленные на рисунке 4.1:



Рисунок 4.1 – Структура программного комплекса

Комплекс включает универсальную базу данных, которая позволяет осуществлять подбор материала для конструкции при задании различных исходных данных. Фрагмент базы представлен на рисунке 4.2, где отражены теплофизические характеристики огнеупорных и теплоизоляционных материалов, такие как коэффициенты A и B для определения теплопроводности λ , коэффициенты C_1 и C_2 для определения удельной теплоемкости c и плотность материалов R .

Коэффициент теплопроводности определяется по уравнению (3.1.2)

$$\lambda = A + B \cdot T, \quad (3.1.2)$$

где A и B – константы для данного материала, находящиеся в базе данных программы.

Удельная теплоемкость рассчитывается следующим образом

$$c = C_1 + C_2 \cdot T, \quad (3.1.3)$$

где C_1 и C_2 – коэффициенты для определения теплоемкости, находящиеся в базе данных программы, T – температура слоя, °C.

MATERIAL	A	B	C1	C2	R
► Динас обычный	0,815	0,00067	870	0,193	1950
Динас высокоплотный	1,58	0,00038	870	0,193	2050
Многошамотные изделия	1,04	0,00015	865	0,21	2550
Шамот	0,7	0,00046	865	0,21	1900
Шамот класса А	0,88	0,00023	865	0,21	1850
Каолин плотный	1,75	0,00086	865	0,21	2450
Полукислые изделия	0,71	0,0007	868	0,19	2425
Совелитовый порошок (засыпка)	0,06	0,000116	920	0	500
ВГО-45	0,84	0,00058	835	0,25	2200
ВГО-62	1,76	-0,00023	835	0,25	2400
ВГО-72	1,76	-0,00023	835	0,25	2500
Муллит и корунд на глиняной связке	2,1	0,0018	795	0,21	2800
Муллит литой	2,8	-0,023	835	0,21	3000
Корунд литой	58	-0,029	880	0,21	3800
Магнезит	6,28	0,0027	1050	0,145	2700
Смолодоломит	1,86	-0,00078	1000	0	2775
Фостерит насадочный	4,23	-0,0016	900	0,21	2425
Фостерит обычный	1,63	-0,0007	900	0,21	2425
Шпинель	5,1	-0,0035	880	0	2875
Тальк	1,05	0,00031	677	0	2000
Периклазошпинелидные	4,17	-0,0011	920	0	3125
Хромомагнезит	2,8	-0,00087	920	0	2775
Магнезитохромит	4,1	-0,0016	920	0	2850
Цирконий	1,3	0,00046	540	0,12	3300
Циркон	2,1	-0,00093	530	0,125	3250
Карборунд рефракс	37,1	-0,0344	960	0,145	2100

Рисунок 4.2 – Фрагмент базы данных

Таким образом, использование базы дает возможность осуществлять подбор материалов, например, для футеровки металлургической печи и выбрать наиболее подходящий по необходимым параметрам.

Далее более подробно рассмотрим каждую из программ входящих в состав АСНИ.

4.3 Автоматизированный подбор параметров и материалов футеровки металлургических аппаратов

Мировая практика печестроения выработала типовые энергоэффективные технические решения по конструированию и модернизации промышленных печей, внедрение которых окупается довольно быстро.

Основные факторы экономии энергоносителя в промышленных печах это:

- малотеплоемкая и низкотеплопроводная футеровка рабочего пространства печи;
- глубокая утилизация теплоты печных газов на выходе из рабочего пространства;
- грамотная эксплуатация печи, включающая контроль и регулирование сжигания топлива, уровня давления газов в печи, оптимизацию тепловой мощности и температурного режима.

Суммарное использование всех трех факторов реально уменьшает расход энергии в промышленных печах периодического действия в 2 – 3 раза, в печах непрерывного действия в 1,5 – 2 раза в зависимости от типа печи, ее назначения и степени использования энергосберегающих факторов.

Использование первого фактора приводит к уменьшению потерь энергии на разогрев футеровки рабочего пространства в печах периодического действия и потерь через футеровку теплопроводностью в печах непрерывного и периодического действия.

Как следствие при разработке или модернизации металлургических аппаратов конструкторы сталкиваются с задачами по определению параметров и переменных футеровки металлургических аппаратов. Для решения данной проблемы была реализована «Учебно-консультационная программа для расчета и визуализации параметров и переменных многослойной стенки», свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2015613485 от 17 марта 2015г.

Программа имеет следующие функциональные возможности:

- расчет теплового потока и распределения температур по толщине плоской многослойной стенки при задании граничных условий 1-го или 3-го рода;
- расчет толщины третьего слоя стенки при задании граничных условий 1-го рода с возможностью выбора материала теплоизоляции;
- 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.

Программа состоит из трех основных частей:

- базы данных по огнеупорным и теплоизоляционным материалам;
- математического обеспечения, включающего уравнения и алгоритмы для расчетов потоков и температур в стационарных условиях и их динамических изменений при различных воздействиях;
- интерфейса пользователя, позволяющего вводить условия и видеть результаты расчетов.

Допущения, используемые в программе:

- коэффициент внешнего теплообмена рассчитывается при задании температуры внешней среды (воздуха) равной 20 °С;
- коэффициент внутреннего теплообмена рассчитывается относительно начального (статического) распределения температур и теплового потока и не меняется с течением времени;
- температура на границе внутренней среды и гарнисажа равна температуре ликвидуса.

Представленная программа опробована в процессе обучения бакалавров и магистрантов института цветных металлов и материаловедения СФУ по направлениям «Металлургия», «Автоматизация технологических процессов и производств», «Управление в технических системах».

На рисунке 4.3 представлен интерфейс программного продукта. Пользователь имеет возможность задавать теплофизические параметры стенки

путем выбора материала из универсальной базы данных, различные граничные условия и размеры слоев стенки. Также интерфейс дает возможность графической визуализации и табличного представления результатов расчетов. На графике изображен температурный профиль в многослойной стенке, по горизонтальной оси представлена заданная толщина слоя стенки, по вертикальной – температура, °C, T_2 и T_3 значения температур на границах слоев.

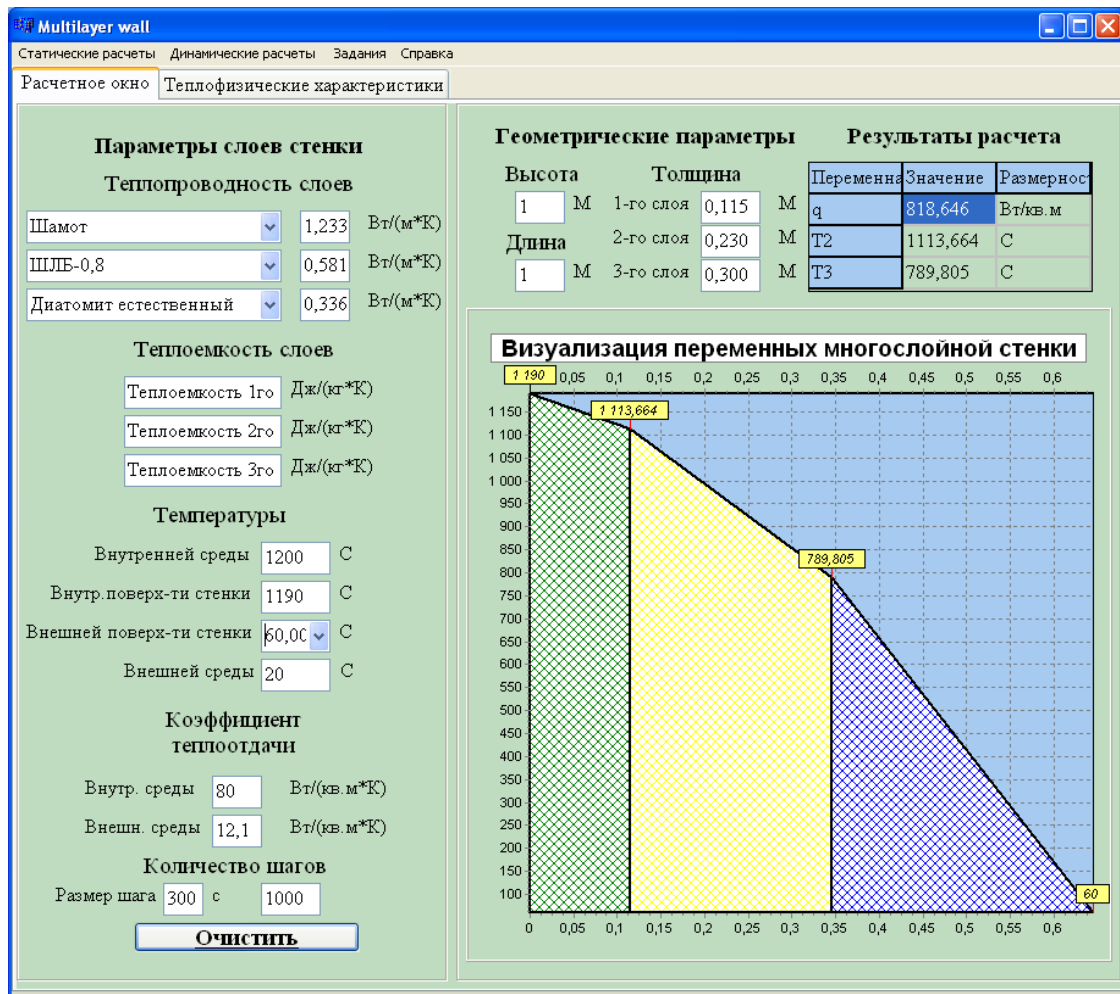


Рисунок 4.3– Главная страница программы с исходными данными и результатами расчета

На рисунке представлена главная страница программы, включающая в себя поле ввода исходных данных для задания параметров слоев стенки, и поле вывода полученных результатов в виде таблицы и графика на закладке «Расчетное окно». Закладка «Теплофизические характеристики» содержит базу данных различных материалов с их параметрами представленную в виде таблицы с возможностью

редактирования. Также на главной странице расположена панель управления, которая служит для выбора необходимого блока решения. Вкладки «Справка» и «Задания» содержат подробное описание типовых заданий и справочный материал.

Математическое обеспечение и примеры подбора параметров и материалов футеровки подробно рассмотрены в разработанном методическом пособии [139].

Изучение нестационарных процессов в курсе теплотехники требует особой наглядности и визуализации, является предметом для научной работы студентов и углубленного изучения курса.

В программе реализована возможность расчета и анализа динамического изменения значений ряда переменных многослойной стенки в динамике, что позволяет наблюдать варьирование средних температур слоев, температур на их границах и поверхностях, толщины гарнисажа при различных воздействиях. Расчет средних температур слоев осуществляется по балансовому уравнению

$$m \cdot c \cdot \frac{d\bar{T}}{dt} = Q_{in} - Q_{out},$$

при этом средние температуры в слоях рассчитываются следующим образом:

$$m_1 \cdot c_1 \cdot \frac{d\bar{T}_1}{dt} = S \cdot k_1 \cdot (T_1 - \bar{T}_1) - S \cdot k_{1-2} \cdot (\bar{T}_1 - \bar{T}_2),$$

$$m_2 \cdot c_2 \cdot \frac{d\bar{T}_2}{dt} = S \cdot k_{1-2} \cdot (\bar{T}_1 - \bar{T}_2) - S \cdot k_{2-3} \cdot (\bar{T}_2 - \bar{T}_3),$$

$$m_3 \cdot c_3 \cdot \frac{d\bar{T}_3}{dt} = S \cdot k_{2-3} \cdot (\bar{T}_2 - \bar{T}_3) - S \cdot \alpha_2 \cdot (T_3 - T_5),$$

где Q_{in} – входные тепловые потоки; Q_{out} – выходные тепловые потоки; m_n – масса слоев стенки; $c_{1,2,3}$ – удельная теплоемкость соответствующих материалов стенки; $\frac{d\bar{T}}{dt}$ – скорость изменения средней температуры слоя; S – площадь поверхности стенки; T_1 – температура внутренней поверхности стенки; $\bar{T}_{1,2,3}$ – средние температуры соответствующих слоев; α_2 – коэффициент теплоотдачи во внешнюю среду; T_3 – температура границы между вторым и третьим слоем; T_5 – температура

внешней среды; $k_{1,2,3}$ – коэффициенты теплопередачи, которые рассчитываются по следующим формулам:

$$k_1 = 2 \cdot \frac{\lambda_1}{\delta_1}, \quad k_{1-2} = \frac{2}{\left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}\right)}, \quad k_{2-3} = \frac{2}{\left(\frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}\right)},$$

здесь $\lambda_{1,2,3}$ – коэффициент теплопроводности материала соответствующего слоя; $\delta_{1,2,3}$ – толщина соответствующего слоя.

Значения температур на границах слоев определяются из условий равенства температур и потоков на границе раздела слоев.

На рисунке 4.5 представлены результаты расчета динамического изменения средних температур слоев и температуры границ слоев стенки в результате резкого увеличения температуры внутренней поверхности стенки (например, с температуры 1700 °С до 1900 °С), что реально может наблюдаться при работе ряда металлургических печей.

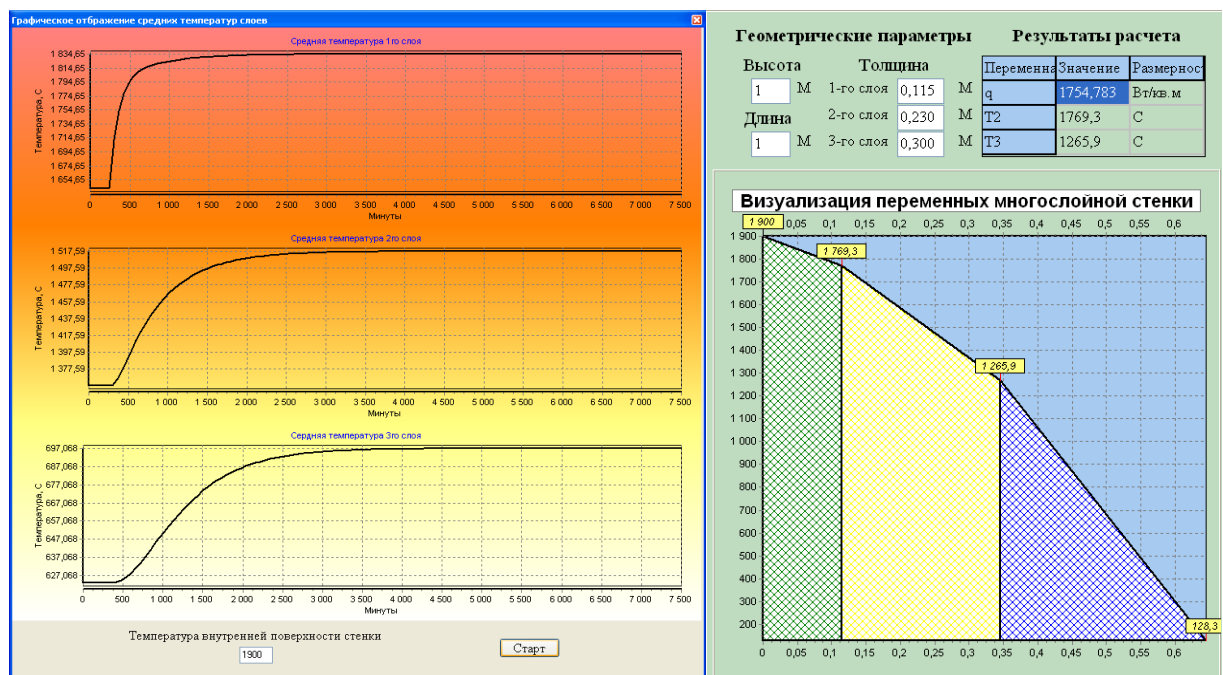


Рисунок 4.5 – Интерфейс для отображения расчетов динамического изменения температур стенки

Начальные горизонтальные участки показывают среднюю температуру слоя к моменту воздействия, которое было подано на 240 минуте работы в

установившемся режиме. В данном случае отчетливо видно, что изменение температуры первого слоя началось значительно раньше, чем у второго и третьего слоев.

Пользователь при изучении последствий тепловых воздействий может наблюдать за ходом изменения температур, определять время переходного процесса, зафиксировать распределение температур в определенный момент времени.

4.4 Исследование переходных процессов при нагреве материалов в печи

Одним из актуальных направлений совершенствования технологического режима нагрева металла является внедрение современных АСУТП печей, что в свою очередь требует энергосберегающих алгоритмов управления, использующих математические модели процессов. Технологический процесс прокатного производства содержит такие обязательные операции, как подготовка исходного материала, его нагрев, прокатка и отделка. Нагрев металла перед прокаткой повышает его пластичность и улучшает физико-механические свойства [83].

Программа для исследования переходных процессов при нагреве материалов в печи имеет следующие функциональные возможности:

- расчет переменных, при нагреве сляба, методом конечных разностей по явной или неявной схемам (по методике работы [26]);
- расчет переменных, при нагреве сляба, методом обыкновенных дифференциальных уравнений (по методике главы 3);
- экспорт данных в MSExcel.

Программа состоит из двух основных частей:

1. Математического обеспечения, включающего уравнения и алгоритмы для расчетов температур и их динамических изменений при воздействиях.

2. Интерфейса пользователя (рисунок 4.6), позволяющего вводить условия и видеть результаты расчетов.

На разработанном приложении можно проводить исследования различных задач по управлению нагревом материалов, с определенными условиями. Например, нагрева сляба до определённой температуры, пошаговый временной нагрев и другие.

Явная разностная схема

Толщина сляба: 0,16
 Температуропроводность: 6,4E-6
 Теплопроводность: 28
 Теплоотдача: 350
 Начальная температура: 1100
 Температура газа: 2000
 Время: 480
 Шаг по координате: 0,016
 Шаг по времени: 16
 Кол-во шагов по координате: 5
 Кол-во шагов по времени: 30
 F: 0,4
 B: 0,2

Методы расчета: Явная (выбрано), Неявная, ОДУ, ОДУ 2

Экспорт в MSExcel
 Очистить

	1-ый шаг по координате	2-ый шаг по координате	3-ый шаг по координате	4-ый шаг по координате	5-ый шаг по координате	6-ый шаг по координате
1-ый шаг по времени	1100,12	1100,26	1101,05	1104,47	1119,05	1181,24
2-ый шаг по времени	1100,54	1101,08	1103,67	1112,82	1142,86	1232,41
3-ый шаг по времени	1101,50	1102,69	1107,89	1123,64	1166,43	1268,14
4-ый шаг по времени	1103,14	1105,18	1113,48	1135,73	1188,24	1295,27
5-ый шаг по времени	1105,56	1108,59	1120,14	1148,33	1208,03	1317,19
6-ый шаг по времени	1108,80	1112,86	1127,59	1160,97	1225,94	1335,68
7-ый шаг по времени	1112,85	1117,92	1135,62	1173,39	1242,22	1351,77
8-ый шаг по времени	1117,66	1123,67	1144,04	1185,48	1257,13	1366,06
9-ый шаг по времени	1123,15	1130,01	1152,73	1197,18	1270,88	1378,96
10-ый шаг по времени	1129,24	1136,86	1161,60	1208,49	1283,66	1390,76
11-ый шаг по времени	1135,86	1144,13	1170,56	1219,42	1295,60	1401,65
12-ый шаг по времени	1142,92	1151,74	1179,59	1230,00	1306,85	1411,80
13-ый шаг по времени	1150,34	1159,63	1188,63	1240,25	1317,48	1421,32
14-ый шаг по времени	1158,07	1167,73	1197,67	1250,20	1327,60	1430,31
15-ый шаг по времени	1166,05	1176,01	1206,68	1259,88	1337,27	1438,84
16-ый шаг по времени	1174,21	1184,42	1215,65	1269,31	1346,55	1446,98
17-ый шаг по времени	1182,53	1192,92	1224,57	1278,52	1355,48	1454,78
18-ый шаг по времени	1190,96	1201,49	1233,43	1287,52	1364,11	1462,28
19-ый шаг по времени	1199,46	1210,09	1242,22	1296,33	1372,47	1469,52
20-ый шаг по времени	1208,01	1218,71	1250,94	1304,97	1380,60	1476,53
21-ый шаг по времени	1216,59	1227,32	1259,58	1313,45	1388,50	1483,33
22-ый шаг по времени	1225,18	1235,92	1268,14	1321,77	1396,22	1489,95
23-ый шаг по времени	1233,76	1244,48	1276,62	1329,96	1403,76	1496,41
24-ый шаг по времени	1242,31	1253,01	1285,02	1338,01	1411,14	1502,71
25-ый шаг по времени	1250,83	1261,48	1293,33	1345,94	1418,37	1508,88
26-ый шаг по времени	1259,31	1269,90	1301,55	1353,75	1425,47	1514,93
27-ый шаг по времени	1267,73	1278,26	1309,68	1361,44	1432,44	1520,85
28-ый шаг по времени	1276,10	1286,55	1317,72	1369,02	1439,29	1526,59

Рисунок 4.6 – Интерфейс программы для расчета переменных при нагреве сляба

Интерфейс программы содержит в себе поле ввода исходных данных, поле вывода результатов в табличном виде, а также несколько кнопок для выбора необходимого метода расчета и экспорта результатов в стороннее приложение MSExcel.

4.5 Исследование динамики теплообмена с фазовыми переходами

Ранее говорилось о том, что имеется проблема по определению поведения гарнисажа в печах. Плавка в гарнисаже применяется для металлов, химически активных при высоких температурах (например, титан), и огнеупорных материалов, электропроводных в расплавленном состоянии. Она обеспечивает исключительно высокую чистоту расплава, не соприкасающегося с инородным веществом тигля. Часто гарнисажная плавка проводится в вакууме. Гарнисаж играет также роль теплоизоляции, значительно уменьшая тепловые потери плавильного устройства.

При этом динамические изменения гарнисажа и фазовые переходы создают нелинейные проблемы в управлении аппаратом. Поэтому визуализация гарнисажных процессов и их понимания важны в АСУТП. Так, в работе [123] представлен алгоритм управления составом электролита алюминиевого электролизера, включающий в себя модель фазовых переходов.

4.6 Программа расчета изменения толщины гарнисажа в обыкновенных дифференциальных уравнениях

В ходе разработки программы реализован блок расчета изменения толщины гарнисажа, методом обыкновенных дифференциальных уравнений, при задании граничных условий третьего рода. Математический аппарат представлен в главе 2, уравнения (2.3 – 2.5).

Интерфейс для отображения результатов расчетов состоит из трех окон включающих в себя графики переходных процессов и таблицы переменных отражающих динамику процесса. Также интерфейс имеет поле ввода для изменения управляющих воздействий и кнопки для запуска или остановки расчета, а также кнопку очистки памяти и всех графических иллюстраций.

На рисунке 4.7 представлен результат по определению динамического изменения толщины гарнисажа при подаче воздействия путем увеличения температуры ликвидуса на 5°C .

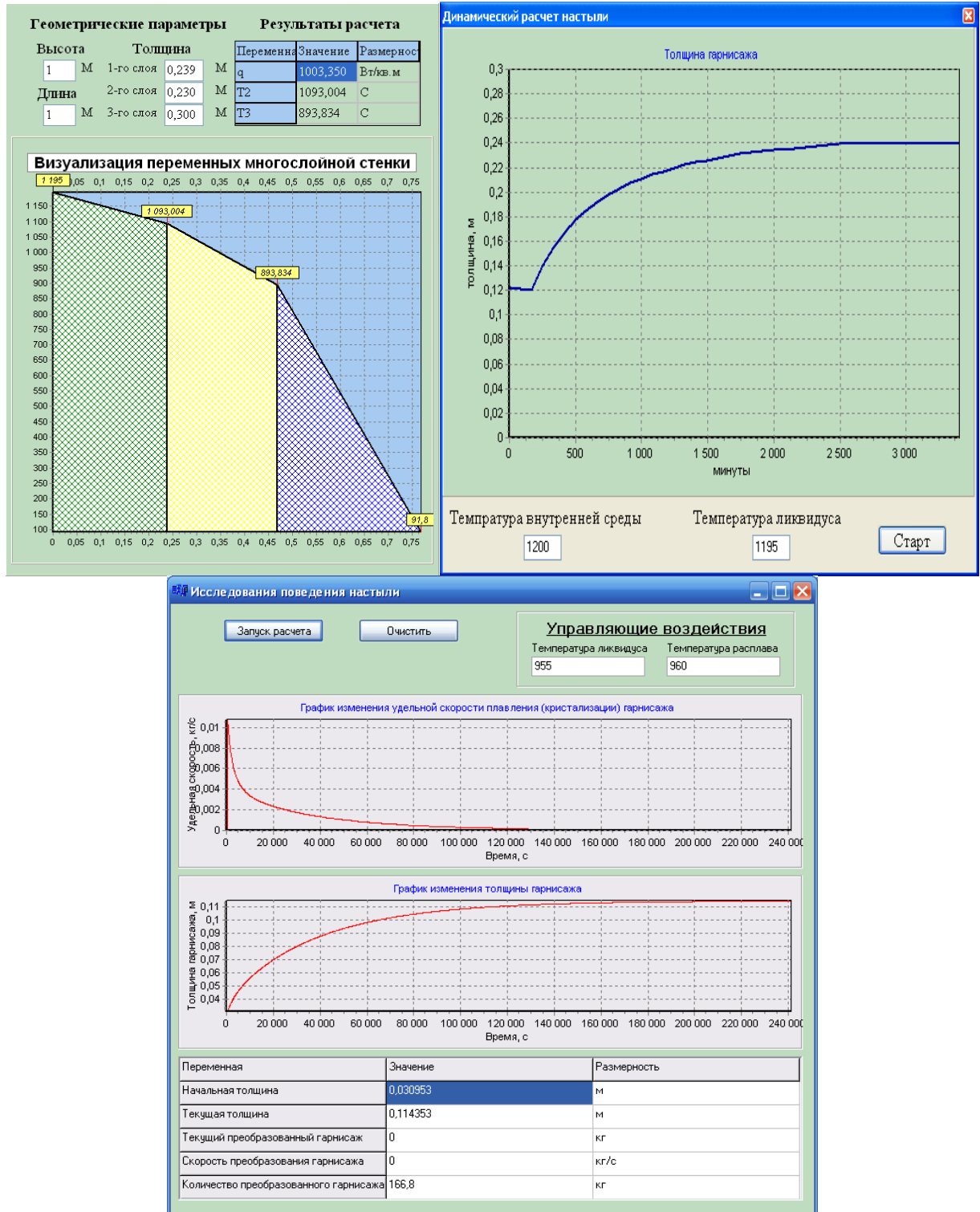


Рисунок 4.7 – Интерфейс для отображения результатов расчета изменения толщины гарнисажа

4.7 Программа расчета изменения толщины гарнисажа в частных производных по неявной четырехточечной схеме

Для решения текущей задачи была реализована модель в частных производных по неявной четырехточечной схеме, по методике работы [26].

Программа имеет следующие функциональные возможности:

- определение начальных параметров и переменных в статике;
- отработка различных воздействий в динамике;
- экспорт данных в MSExcel.

Данная программа позволяет, задавая теплофизические параметры гарнисажа и стенки, проводить различные расчеты по определению толщины гарнисажа и других переменных объекта исследования. Как следствие использование данного приложения в комплексе с программой «Виртуальная лаборатория теплотехники» дает широкие возможности для анализа полученных результатов расчета и использования полученных данных для правильного управления поведением гарнисажа в печи.

Учащиеся, имея различные задания, могут проводить расчеты, подавая воздействия, путем изменения температуры расплава или ликвидуса, а полученные результаты экспортировать и обрабатывать. Так же в приложении имеются встроенные графики, отражающие поведение толщины гарнисажа, распределения температур по всей стенке, изменения размера шага по времени, что повышает информативность самого программного продукта.

Программа расчета изменения толщины гарнисажа в процессе перехода к новому стационарно...

Теплофизические характеристики | Графики | Таблица

Теплофизические характеристики настыли

Температура границы гарнисаж-стенка, К
0

Коэффициент теплопроводности, Вт/мК
1

Удельная теплоемкость, Дж/м³К
1000

Температура плавления(затвердевания), К
1223

Удельная теплота плавления(затвердевания), Дж/м³
550000

Коэффициент теплоотдачи, Вт/м²К
1000

Температура расплава, К
1233

Шаг по координате, м
0,0002

Начальная толщина гарнисажа, м
0,0313

Плотность, кг/м³
2000

Теплофизические характеристики стенки

Толщина стенки, м
0,2

Температуропроводность
0,0000067

Коэффициент теплопроводности, Вт/мК
7

Коэффициент теплоотдачи, Вт/м²К
30

Температура внешней поверхности, К
0

Температура воздуха, К
293

Время, с
500000

Шаг по времени, с
1

Удельная теплоемкость, Дж/м³К
1000

Плотность, кг/м³
1720

Результаты расчета

Количество шагов по координате
0

Текущая толщина гарнисажа, м
0

Текущая плотность теплового потока, Вт/м²
0

Результаты расчета

Кол-во шагов по координате
0

Кол-во шагов по времени
0

F
0

В
0

Статика Запуск расчета

Рисунок 4.8 – Интерфейс программы для расчета изменения толщины гарнисажа в частных производных по неявной четырехточечной схеме

Интерфейс программы включает в себя три вкладки, каждая из которых выполняет свою функцию. Вкладка «Теплофизические характеристики» содержит поля ввода исходных данных для настыли и стенки, поля вывода части результатов расчета и две кнопки для расчета стационарного состояния («Статика») и расчета в динамике («Запуск расчета»). Вкладки «графики» и «таблица» служат для вывода полученных результатов, на вкладке «таблица» есть кнопка для экспорта данных в MSExcel.

4.8 Внедрение электронного обучающего курса «Виртуальная лаборатория теплотехники»

Известно, что специальные компьютерные программы повышают качество обучения за счет проведения большего количества операций за короткий промежуток времени, структурирования учебной информации на разных уровнях, систематизации процесса представления информации и организации интерактивного общения.

В связи с этим появилась необходимость создания электронного обучающего курса доступного не только на аудиторных занятиях, но и в сети интернет для самостоятельного изучения дисциплины. Как следствие для самостоятельного изучения необходимо, чтобы данный курс включал в себя полный алгоритм проведения лабораторных работ и всю необходимую теоретическую информацию. Одним из способов поставленной задачи является разработка электронных обучающих курсов в системе Moodle.

Moodle – система управления курсами (электронное обучение), также известная как система управления обучением или виртуальная обучающая среда (англ.). Является аббревиатурой от английского Modular Object - Oriented Dynamic Learning Environment (модульная объектно-ориентированная динамическая обучающая среда). Представляет собой свободное (лицензия GNUGPL) веб-приложение, предоставляющее возможность создавать сайты для онлайн обучения [124].

Используя данную систему, был разработан и внедрен электронный обучающий курс «Виртуальная лаборатория теплотехники», областью применения которого является обучение теплотехнике в металлургии, а также решение типовых инженерных задач для студентов очного и заочного отделений ряда специальностей (22.04.02 – Металлургия, 15.03.04 – Автоматизация, 27.04.04 – Управление в технических системах).

Электронный обучающий курс включает в себя ряд обязательных функциональных возможностей:

- клиент программы «Виртуальная лаборатория теплотехники»;
 - описание режима работы;
 - общие теоретические сведения по теплопроводности твердых тел;
 - глоссарий;
 - список рекомендуемой литературы;
 - подробная теоретическая часть и последовательность выполнения по каждой лабораторной работе;
 - варианты заданий к каждой лабораторной работе;
 - контрольные вопросы;
 - контрольные тесты для проверки и оценки остаточных знаний;
 - ряд приложений содержащих справочную информацию необходимую для выполнения лабораторных работ.
- Так же в курсе есть ряд дополнительных функциональных возможностей:
 - журнал успеваемости;
 - анкета студента;
 - форум для общения с преподавателем;
 - возможность обмениваться файлами с преподавателем;
 - рабочие программы дисциплины по направлениям.

На рисунке 4.9 представлено главное окно электронного обучающего курса «Виртуальная лаборатория теплотехники»:



Рисунок 4.9 – Интерфейс ЭОК «Виртуальная лаборатория теплотехники»

Курс доступен со всех платформ, включая мобильные и планшетные устройства.

Так же для реализации электронно-обучающего курса разработан лабораторный практикум «Металлургическая теплотехника. Теплопроводность конструктивных элементов», в котором даны краткие теоретические сведения, подробное описание лабораторных работ. Приведены необходимые справочные данные и вопросы для самоподготовки к защите работ.

На основе представленных алгоритмов расчетов и разработанного программного обеспечения показана возможность проводить оперативный анализ влияния конструктивных параметров на тепловые потери.

Предназначен для студентов, изучающих теплообменные процессы и выполняющих проектные задания.

Данный лабораторный практикум был внедрен в процесс обучения и добавлен в научную библиотеку СФУ [125].

ВЫВОДЫ ПО ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ

Разработанное на основе специальных моделей, оригинальное программное обеспечение позволяет повысить качество подготовки специалистов горно-металлургической отрасли и сократить временные затраты на проведение исследований и типовых расчетов, структурировать учебную информацию на разных уровнях, систематизировать процесс представления информации и организовать интерактивное общение между оператором и программным комплексом. Подчеркивая актуальность внедрения специализированных программных продуктов в процесс обучения, стоит отметить основные отличия от существующих компьютерных приложений, которые в основном представляют собой презентационные программы (электронные учебники), используемые для ознакомления с учебными материалами, либо тестовые приложения, используемые для контроля знаний. Таким образом, разработанный программный комплекс позволяет решать исследовательские и типовые инженерные задачи с перебором разных вариантов, и достигать понимания взаимосвязей параметров и переменных при изменении управляющих воздействий объекта исследования.

Если проводить сравнение разработанного АСНИ «Виртуальная лаборатория теплотехники» с аналогичным программным обеспечением, представленным на российском рынке, то комплекс обладает расширенными функциональными возможностями, так как направлен не на конкретную теплоэнергетическую установку, а на исследования общих, фундаментальных задач, таких как подбор параметров футеровки, анализ поведения гарнисажа или нагрев материалов.

Заключение

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. Разработана 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.

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 используемых источников

1. Спирин, Н.А. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев и др. // – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2014. – 558 с.
2. Дроздов, Н.Д. Введение в прикладное математическое моделирование / Н.Д. Дроздов, Т.Г. Сорокина // Тверской госуниверситет, Тверь. – 2002. – 202с.
3. Марасулова, З.А. Информационный ресурс как фактор интеграции моделей и методик / З.А. Марасулова, Г.А. Расулова // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2014. –№1. – С. 75-80.
4. Мелентьев, Л.А. Системные исследования в энергетике. Элементы теории, направления развития /Л.А. Мелентьев. – 2-е изд. – М.: Наука, 1983. – 454с.
5. Попырин, Л.С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок / Л.С. Попырин. – М.: Энергия,1978. – 416с.
6. Бойко, Е. А. Применение ЭВМ для решения теплоэнергетических задач : учебное пособие / Е.А. Бойко // Красноярский государственный технический ун-т. – 2001. –202с.
7. Самарский, А.А. Вычислительная Теплопередача / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.
8. Исаченко, В.Я. Теплопередача/ В.Я.Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. –М.: Энергоиздат, 1981. – 415 с.
9. Карслоу, У. Теплопроводность твердых тел / У. Карслоу, Д. Егер. –М.: Наука, 1964. – 488 с.
10. Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена / С.С. Кутателадзе. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.
11. Ландау, Л.Д. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1986. – 736 с.
12. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1973. – 848 с.

13. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
14. Лыков, А.В. Тепломассообмен. Справочник / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1972. – 560 с.
15. Тихонов, А. Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: Наука, 1977. – 735 с.
16. Алифанов, О.М. Обратные задачи теплообмена / О.М. Алифанов. – М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.
17. Бек, Дж. Некорректные обратные задачи теплопроводности / Дж. Бек, Б. Блакуэм, Ч. Сент-Клэр. – М.: Мир, 1989. – 312 с.
18. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1969. – 742 с.
19. Моделирование задач гидроледотермики водотоков: В.М. Белолипецкий [и др.]. – Новосибирск: Сибирское отделение РАН, Институт вычислительных технологий, Вычислительный центр в г. Красноярске, 1993. – 138с.
20. Xu Quan – sheng. Solution of the two-dimensional Stefan problem by the singularity–separating method / Xu Quan – sheng, Zhu You – lan // J. of Computational Math. – 1985. – V.3, №1. – P.8-18.
21. Будак, Б.М. Разностный метод со сглаживанием коэффициентов для решения задач Стефана / Б.М. Будак, Е.Н. Соловьева, А.Б. Успенский // ЖВМиМФ. – 1965. – Т.5, №5. – С.828-840.
22. Самарский, А.А. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент / А.А. Самарский // Вестник АН СССР. – 1979. – №5. – С.38-49.
23. Бондарев, Э.А. Сравнительная оценка приближенных методов решения одномерных задач с подвижными границами / Э.А. Бондарев, Ф.С. Попов // ИФЖ. – 1989. – Т.56, №2. – С.302-306.
24. Якушева, Л.В. Сравнительный анализ некоторых разностных методов решения задачи Стефана / Л.В. Якушева. – Новосибирск, 1978. – 14с.
25. Джалурия, Й. Естественная конвекция: тепло- и массообмен /Й.

Джалурия. –М.: Мир, 1983.– 399 с.

26. Арутюнов, В.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей: учеб. для вузов / В.А. Арутюнов, В.В. Бухмиров, С.А. Крупенникова. – М.: Металлургия, 1990. – 239 с.

27. Авдонин, Н.А. Математическое описание процессов кристаллизации / Н.А. Авдонин. – Рига: Зинатке, 1980. – 180 с.

28. Вабищевич, П.Н. Численные методы решения задач со свободной границей / П.Н. Вабищевич. – М.: Изд-во МГУ, 1987. – 165 с.

29. Данилюк, И.И. О задаче Стефана / И.И. Данилюк // Успехи математических наук. – 1985. – Т.40. – Вып.5 (245). – С. 133-185.

30. Дюво, Г. Неравенства в механике и физике / Г. Дюво, Ж.Л. Лионе. – М.: Наука, 1980. – 382 с.

31. Мейрманов, А.М. Задача Стефана / А.М. Мейрманов. – Новосибирск: Наука, 1986. – 239 с.

32. Рубинштейн, Л.И. Проблема Стефана / Л.И. Рубинштейн. – Рига: Звайгзне, 1967. – 458 с.

33. Фридман, А. Вариационные принципы и задачи со свободной границей / А. Фридман. – М.: Наука, 1989. – 536 с.

34. Официальный сайт Ansys [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ansys.com>. –Загл. с экрана.

35. Официальный сайт Comsol [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://www.comsol.ru>. –Загл. с экрана.

36. Официальный сайт Matlab [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mathworks.com>. –Загл. с экрана.

37. Производство алюминия // Сайт об алюминии. Проект компании RUSAL, лидера мировой алюминиевой отрасли [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://aluminiumleader.ru/production/how_aluminium_is_produced–Загл. с экрана.

38. Dagoberto, S. S. A Modelling Approach to Estimate Bath and Metal Heat Trans Fer Coefficients / S. S. Dagoberto, Vanderlei Gusberti // Light Metals. – 2009, – P. 557– 562.
39. Marois Marc-Andre. Comparision of two different numerical methods for prediction the formation of the side ledge in aluminium electrolysis cell / Marois Marc-Andre, Bertrand Clement, Desilets Martin, Coulombe Marie-Michelle, Lacroix Marcel. // Light Metals. – 2009, – P.563 – 568.
40. Solheim, A. Towards a proper understanding of sideledge facing the metal in aluminiumcells / A. Solheim // Light Metals. – 2006. – P. 439 – 443.
41. Solheim, A. Sideledge in Aluminium Cells: The Trench at the Metal-Bath Boundary /A. Solheim, H. Gudbrandsen, S. Rolseth // Light Metals. – 2009. – P. 411 – 417.
42. Ketil, A. R. Dynamic ledge response in Hall – Heroult cells / Ketil A. Rye, TrygveEidet, Knut Torklep // Light Metals. – 1999, – P.347 – 352.
43. Tang, H. Q. Response of a Hall – Heroult cell to step – changes in operating conditions measurements and dynamic simulations / H. Q. Tang, N. Urata, C. M. Read // Light Metals. – 1998. – P. 349 – 357
44. Zhuxian, Q. Bath temperature measurement in aluminium electrolysis cells / Q. Zhuxian, L. Jingjian, C. Xiajli, K. Grotheim, H. Kvande, H. A. Oye // ALUMINIUM -70, Jahrgang. – 1994. – P. 11 – 12.
45. Аннотация к проведенному эксперименту (корп. №13) по идентификации динамической модели процесса электролиза алюминия. / ОАО КрАЗ. – Красноярск, 2000
46. Аннотация к проведенным экспериментальным работам по опытным электролизерам корпуса №8. / ОАО КрАЗ. – Красноярск, 2000.
47. Kolas, S. Defining and Verifying the “Correlation Line” in Aluminum Electrolysis / S. Kolas // JOM. – 2007 May. – P.55-60.
48. Mann V., Buzunov V., Pitersev N., Chesnuak V., Polyukov P., Reduction in power consumption at UC RUSAL` Smelters 2012 – 2014. // Light Metals. – 2015, – P.757 – 762

49. Edvard Seger, Varen Haupin, Method and apparatus for controlling the heat balance in aluminum reduction cells, U.S. Patent documents, 4 333 803, 1982
50. Andersen J.A., Method for measuring and control of the energy of aluminum reduction cell. U.S. Patent documents, 4 045 309, 1977
51. Jie, LI. Industrial Test of Low-voltage Energy-saving Aluminum Reduction Technology / Li Jie, Lü Xiao – jun, Ding Feng – qi, Lai Yan – qing, Xie Chang – chun, Zhang Hong-liang, Xiao Jin, Ding Ji-lin // Light Metals. – 2010, – P.399 – 404
52. Патент № 2326188 Российская федерация, МПК C25C 3/20. Способ управления теплоэнергетическим режимом электролизера для получения алюминия / А.И Березин, Т.В. Пискажова, Ю.А. Попов, В.В. Грицко, А.В. Тараканов, Е.Н. Чичук – заявлено 20.06.2006, зарегистрировано в государственном реестре изобретений 10.06.2008.
53. Bonnardel, O. Process for regulating the temperature of the bath of an electrolytic pot for the production of aluminium / O. Bonnardel, P. Homsy // U.S. Patent Number 5,882,499, Date of patent Mar. 16, – 1999.
54. Результаты опытной эксплуатации подсистем и технических средств опытной автоматизированной системы управления электролизом алюминия. – Отчет о научно исследовательской работе, заключительный, книга 3. – Красноярский политехнический институт, 1985. – № гос. рег. 80018264.
55. Stevens McFadden Fiona J. Application of advanced process control to aluminium reduction cell – a review / Stevens McFadden Fiona J, P.B. Geoffrey, P.C. Austin, B.J. Welch // Light Metals. – 2002. – P. 1213-1220
56. Разработка связанного алгоритма стабилизации состава электролита и управления тепловым балансом для энергоэффективных электролизеров. –Отчет о научно исследовательской работе, промежуточный, этап 1. – Красноярский политехнический институт, 2016г.
57. Минцис, М.Я. Электрометаллургия алюминия: монография / М.Я. Минцис, П.В. Поляков, Г.А. Сиразутдинова. – Новосибирск: Наука, 2001.–368 с.
58. Белолипецкий, В.М. Математическое моделирование процесса электролитического получения алюминия для решения задач управления

технологией: монография / В.М. Белолипецкий, Т.В. Пискажова. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2013. – 271 с.

59. Arita, Y. Numerical calculation of bath and metal convection patterns and their interface in al reduction cells / Y. Arita, H. Ikeuchi // *Light Metals*. – 1981. – P.286-295.

60. Dagoberto, S.S. A modelling approach to estimate bath and metal heat transfer coefficients / S.S. Dagoberto, Vanderlei Gusberti // *Light Metals*. – 2009. – P.557-562.

61. Solheim, A. Towards a proper understanding of side ledge facing the metal in aluminium cells / A. Solheim // *Light Metals*. – 2006. – P.439-443.

62. Ketil, A. R. Dynamic ledge response in Hall – Heroult cells / A.R. Ketil, A. Rye, Trygve Eidet, Knut Torklep // *Light Metals*. – 1999. – P.347-352.

63. Hashimoto, T. Computer simulation of Dynamic behavior of an aluminum reduction cell / T. Hashimoto, Ikeuchi // *Light Metals*. – 1980. – P.273-283.

64. Dupuis, M. Computation of aluminum reduction cell energy balance using ANSYS finite element models / M. Dupuis // *Light Metals*. – 1998. – P.409.

65. Ahmed, H.A. Side lining effects on thermal behavior of prebaked aluminum cell / H.A. Ahmed, S. Kaseb, S.M. El-Raghy, Z. Bassuny, M.M. Ali // *Light Metals*. – 1999. – P.359.

66. Beran, P. Impact of current increase on specific energy consumption / P. Beran, R. von Kaenel, H.P. Lange, J.H. Skaar, J. Antille // *Light Metals*. – 2001. – P.179.

67. Marois, M.A. Comparison of two different numerical methods for predicting the formation of the side ledge in an aluminum electrolysis cell / M.A. Marois, C. Bertrand, M. Desilets, M.M. Coulombe, M. Lacroix // *Light Metals*. – 2009. – P.563-568.

68. Dupuis, M. Using a steady-state model of an aluminum reduction cell to investigate the impact of design changes / M. Dupuis, I. Tabsh // *Light Metals*. – 1996. – P.419.

69. Dupuis, M. Development of a 2D+ dynamic model of an aluminum reduction cell, Proc. 38th conf. / M. Dupuis, R. Lacroix // Light Metals, CIM, Quebec. – 1999. – P.41.
70. Wei, C.C. Modeling of dynamic ledge heat transfer / C.C. Wei, J.J.J. Chen, B.J. Welch, V.R. Voller // Light Metals. – 1997. – P.309.
71. Yrkov, V. A simple dynamic real-time model for aluminum reduction cell control system / V. Yrkov, V. Mann // Light Metals. – 2005. – P.423.
72. Solheim, A. Some aspects of heat transfer between bath and sideledge in aluminium reduction cells / A. Solheim // Light Metals. – 2011. – P.381-386.
73. Severo, D. S.A modeling approach to estimate bath and metal heat transfer coefficients / D. S. Severo, V. Gusberti // Light Metals. – 2009. – P.557-562.
74. Тинькова, С.М. Metallургическая теплотехника: учеб. пособие для вузов / С.М. Тинькова. – Красноярск: Изд-во Государственного университета цветных металлов и золота, 2005.– 143 с.
75. Панов, Д.Ю. Справочник по численному решению дифференциальных уравнений в частных производных / Д.Ю. Панов // – Москва: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1951. – 190с.
76. Баймаков, Ю.В. Электролиз расплавленных солей: учеб. пособие для металлург. Специальностей / Ю.В. Баймаков, М.М. Ветюков. – М.: Металлургия, 1966. – 560 с.
77. Eika, K. Heat recovery and dynamic process studies / K. Eika, R. Skjeggstad // Light Metals. – 1993. – P.277 – 284.
78. Wang, Z. Studies on waste heat recovery in aluminum electrolysis / Zhaowen Wang, Bingliang Gao, Youjian Yang, Wenju Tao, Fengguo Liu, Zhongning Shi, Xianwei Hu // Book of papers of the ninth international congress "Non-ferrous metalsand minerals". – 2017. – P.209 –226.
79. Siljan, O.J. Electrolysis cell and structural elements to be used therein. Patent WO 2004/083489 A1, 2004.
80. Lamaze, A.P., Laucournet, R., Barthelemy, C. Electrolytic cell with a heat exchanger. Patent US 2008/0271996A1.

81. Liu, J. Response of cryolitic bath to flexible pot line power shifts and influence on the side ledge / J. Liu, M. Taylor, M. Dorreen // Book of papers of the ninth international congress "Non-ferrous metals and minerals". - 2017. - P.287-288.

82. Piskazhova, T.V. The Use of a dynamic aluminum cell model / T.V. Piskazhova, V. C. Mann // JOM. – 2006. – Vol.58, №2. – P. 48-52.

83. Пискажова, Т.В. «Виртуальный СЛИПП» – математическая модель для управления агрегатом СЛИПП и ее визуализация с помощью программных продуктов WinCC 7.0 и Step 7/ Т.В. Пискажова, С.Б. Сидельников, В.М. Белолипецкий // Вестник СибГАУ. – 2015. – №2 (54). – С.140-133.

84. Кривандин, В.А. Теплотехника металлургического производства. Теоретические основы металлургического производства / В.А. Кривандин. – Москва: МИСиС, 2002. – 162 с.

85. Кривандин, В.А. Металлургические печи / В.А. Кривандин, Б. Л. Марков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1977. – 464 с.

86. Вохмяков А. М., Казяев М. Д., Казяев Д. М. Исследование конвективного теплообмена в проходной печи, оснащенной скоростными горелками // Цветные металлы. 2011. № 12. С. 89–93.

87. Имитационное моделирование как инструмент оптимизации производственных процессов в металлургии // Информационно-аналитический журнал Rational Enterprise Management. [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<http://www.anylogic.ru/upload/iblock/e56/e56ccf70ee38f9080c9bb7f69f2b5908.pdf>.–Загл. с экрана.

88. Особенности прокатки цветных металлов и сплавов // Строительный информационный портал [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<http://www.stroitelstvo-new.ru/sudostroenie/prokatka-cvetnyh-metallov.html>. – Загл. с экрана.

89. Смазочные материалы для прокатки сверхтонких листов, листов легированной стали, алюминия и других материалов // ТК «Эксперт-ойл» информационный портал [Электронный ресурс]. – Режим

доступа: http://www.expertoil.com/articles/smazochnie_materiali_pri_prokatke_sverhtonkih_listov_stali_aluminija_i_drugih_materialov. – Загл. с экрана.

90. Мокрушин С.А., АСУ температурного режима электрических печей сопротивления // Группа компаний Альфа-Пром [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://alfa-prom.ru/art_3_aut_asu_tr_oven.html. – Загл. с экрана.

91. Li Jing, Wang Jing, HaoChunhui et al., "Research and application of process control system for roller hearth normalizing furnace", Metallurgical Industry Automation, vol. 33, no. 2, pp. 16-23, 2009.

92. Lahoucine-Abaih, L., VanBennekomp, A., Fathi, M., Development of an ANN for the prediction of heat treatment temperatures for martensitic stainless steels, IEEE International Symposium on Industrial Electronics 4374581, pp. 100-105, 2007.

93. Li, H., Gong, X., Wang, J., Huang, Q., "Research on level-2-computer control system for heat-furnace in plate heat treatment line.", International Technology and Innovation Conference 2009 (ITIC 2009)

94. Zhang, K., Shao, C. Advanced control techniques for reheating furnace and their development in iron and steel industry [J] Metallurgical Industry Automation, 1, pp. 13-14. 2003.

95. V. Muresan, M. Abrudean, "Temperature Modeling and Simulation in the Furnace with Rotary Hearth", Proc. of 2010 IEEE AQTR 2010-17th edition, pp. 147-152, May 28-30, 2010.

96. Официальный сайт SimInTech [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://simintech.ru>. – Загл. с экрана.

97. Дозорцев, В.М. Компьютерные тренажеры для обучения операторов технологических процессов / В.М. Дозорцев. – М.: Синтег, 2009. – 372 с.

98. Сидоров, А.В. Применение имитационного моделирования при разработке программ контроля сложных технических объектов / А.В. Сидоров, В.В. Третьяков, Д.Н. Баранов // Автоматизация в промышленности. – 2014. – №7. – С.3 – 9.

99. Зак, Ю.А. Функции и структура систем имитационного моделирования мелко- и среднесерийного производства / Ю.А. Зак // Автоматизация в промышленности. – 2012. – №7. – С. 9 – 12.
100. Ершова, О.В. Компьютерные тренажерные комплексы для повышения эффективности управления процессами электротермического производства / О.В. Ершова // ControlSince. – 2010. – № 3. – С. 60 – 66.
101. Мелентьев Л.А. Системные исследования в энергетике / Л.А. Мелентьев // Элементы теории, направления развития. –1-е изд. – М.: Наука, 1983. – 454 с.
102. Андриященко А.И. Основы термодинамики циклов теплоэнергетических установок / А.И. Андриященко //– 3-е изд. – М.: Высшая школа, 1985. – 213 с.
103. Самарский А.А. Математическое моделирование – новая методология научных исследований/А.А. Самарский, Б.П. Герасимов, В.И. Мажукин // – М.: МЭИ,1990. – 32 с.
104. Джонсон К. Численные методы в химии / К. Джонсон // Пер, с англ. – М.: Мир, – 1983, – 504 с.
105. Никс Дж. Решение производственных задач на Бейсике/ Дж. Никс// Пер. с англ. – М. Машиностроение, – 1987. – 256 с.
106. Эберт К. Компьютеры. Применение в химии/ К. Эберт, К. Эдерер// Пер. с нем. – М. Мир, – 1988.– 475 с.
107. Болч Б. Многомерные статистические методы для экономики / Б.Болч, К. Хуань// Пер. с англ. – Под ред. С.А. Айвазяна. – М.: Статистика, –1979. – 317 с.
108. Каганович Б.М. Моделирование термодинамических процессов – Новосибирск: Наука. Сиб. отд - ие, – 1993. – 100 с.
109. Каганович Б.М., Филипов С.П. Равновесная термодинамика и математическое программирование/ Б.М. Каганович, С.П. Филипов, Е.Г. Анциферов // – Новосибирск: Наука. Сиб. отд - ие,1995. – 236 с.

110. Попырин Л.С. Автоматизация математического моделирования теплоэнергетических установок / Л.С. Попырин, В.И. Самусев, В.В. Эпельштейн // – М.: Наука, 1981. – 236 с.

111. Вульман Ф.А. Тепловые расчеты на ЭВМ теплоэнергетических установок / Ф.А. Вульман, Н.С. Хорьков // Под.об. ред. В.Я. Рыжкина. – М.: Энергия, 1975. – 200 с.

112. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар // Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 475 с.

113. Ши Д. Численные методы в задачах теплообмена / Д. Ши // Пер с англ. – М.: Мир, 1988. – 544 с.

114. Пасконов В.М. Численные методы в задачах тепло - и массообмена / В.М. Пасконов, В.И. Полежаев, Л.А. Чудов //– М.: Наука, 1984. – 425 с.

115. Бажан П.И. Справочник по теплообменным аппаратам / П.И. Бажан, Г.Е. Каневец, В.М. Селиверстов //– М.: Машиностроение, 1989. – 365 с.

116. Дульнев Г.Н., Применение ЭВМ при решении задач теплообмена / Г.Н. Дульнев, В.Г. Парфенов, А.В. Сигалов // Учеб. пособ. для теплофизич. и теплоэнергетич. спец. вузов– М.: Высшая школа, 1990. – 207 с.

117. Синяров Г.Б. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов / Г.Б. Синяров, М.А. Ватолин, Б.Г. Трусов, Г.К. Моисеев // –М.: Наука, 1982. – 263 с.

118. Автоматизированные системы научных исследований // Информационный портал по вопросам биомедицинской инженерии [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<http://ilab.xmedtest.net/?q=node/5679> – Загл. с экрана.

119. Кузнецов, Б.Ф. Виртуальная лаборатория по технической термодинамике и теплопередаче: методические указания / Б.Ф. Кузнецов, Г.Д. Тарантова. – Тверь: Изд-во Тверского гос. технич. ун-та, 2003. – 66 с.

120. Даныкина, Г.Б. Компьютерные обучающие технологии как путь совершенствования подготовки инженеров металлургических специальностей /

Г.Б. Даныкина, В.А. Осипова // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2010. – Т.8. – Вып.4. – С. 54-60. –ISSN 1818-7900.

121. Жеребцов, А. Имитационное моделирование как инструмент оптимизации производственных процессов в металлургии / А. Жеребцов, А. Белопашко // Рациональное управление предприятием. – 2009. – № 6. – С. 29-31.

122. Колесов, Ю.Б. Имитационное моделирование сложных динамических систем [Электронный ресурс] / Ю.Б. Колесов, Ю.Б. Сениченков. – Режим доступа:http://www.exponenta.ru/soft/others/mvs/ds_sim.asp.–Загл. с экрана.

123. Пискажова Т.В. Способ оптимального управления химическим составом электролита при получении алюминия // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. 2010. Вып. 3 (29), С. 153-158.

124. Официальный сайт Moodle[Электронный ресурс]. – Режим доступа:<https://moodle.org>. – Загл. с экрана.

125. Официальный сайт библиотеки СФУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<http://lib3.sfu-kras.ru/ft/lib2/elib/u66/i-508355836.pdf>. – Загл. с экрана.

126. 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.

127. Портянкин, А.А. Создание учебно-консультационной программы для расчета и визуализации параметров и переменных многослойной стенки // Молодежь и наука: сборник материалов IX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 385-летию со дня основания г. Красноярска [Электронный ресурс]. – Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2013. – Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/section008.html>. – Загл. с экрана.

128. 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. – 2013. – Т.2, №17. – С. 249-251. – ISSN 1990-7702.

129. 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.

130. 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.

131. 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.

132. Портянкин, А.А. Модель скоростного конвективного нагрева металла для использования в алгоритмах АСУТП / В.М. Белолипецкий, Т.В. Пискажова, А.А. Портянкин // Вестник СибГАУ им. академика М.Ф. Решетнева. – 2016. – Т.17, № 3. – С. 554-561.

133. Портянкин, А.А. Разработка программного комплекса для изучения теплообменных процессов / А.А. Портянкин, С.М. Тинькова, Т.В. Пискажова, В.М. Белолипецкий // науч. изд. Информатизация образования и методика электронного обучения. – Красноярск. – 2016. – С. 438-443.

134. Портянкин, А.А. Численная модель поведения гарнисажа в электролизере / В.М. Белолипецкий, Т.В. Пискажова, А.А. Портянкин // Вестник СибГАУ им. академика М.Ф. Решетнева. – 2017. – С. 32-51.

135. 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.

136. Портянкин, А.А. Численная модель поведения гарнисажа в электролизере / В.М. Белолипецкий, Т.В. Пискажова, А.А. Портянкин//Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т.20, №8. – С. 151-166.

137. Портянкин А.А. Модели нагрева материалов в печах конвективного теплообмена для решения задач автоматизации / В.М. Белолипецкий, А.А. Портянкин, Т.В. Пискажова, Г.В. Зинченко//Автоматизация в промышленности. – 2017, №12. – С.59 - 64.

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

139. Тинькова, С.М. Металлургическая теплотехника. Теплопроводность конструктивных элементов: лабораторный практикум для студентов изучающих теплообменные процессы и выполняющих проектные задания / С.М. Тинькова, Т.В. Пискажова, А.А. Портянкин. – Красноярск : Сибирский федеральный ун-т, 2016. – 40 с.

140. 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.

141. 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ А



Общество с ограниченной ответственностью

**«Красноярский
металлургический завод»**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ, 660111, Г. КРАСНОЯРСК, УЛ. ПОГРАНИЧНИКОВ, 42,
ТЕЛЕФОН: (391) 256-48-58, 256-40-73, ФАКС: (391) 226-70-89,
E-MAIL: OFFICE@KRAMZ.RUSAL.RU



№ _____

ДАТА _____

**Справка о возможности
использования результатов исследований**

полученных в диссертационной работе Портянкина Артема Александровича «МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМИНИЯ И НАГРЕВА СЛЯБОВ В КОНВЕКТИВНЫХ ПЕЧАХ», представляемой на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

В последнее время показатели качества прогрева алюминиевых полуфабрикатов и изделий перед дальнейшей обработкой или в процессах старения или закаливании становятся особенно актуальными, в том числе и в связи с внедрением на ООО «Красноярский металлургический завод» международного стандарта качества ISO.

При этом существующие системы контроля параметров и автоматизации печей нагрева осуществляют в основном регулирование локального нагревателя по измерениям температуры воздуха возле этого нагревателя, задача поддержания нужного прогрева объема всей печи и садки в таком управлении трудновыполнима и требует постоянной настройки ПИД - регуляторов опытным сотрудником.

В диссертации Портянкина А.А. предложена модель нагрева материалов в печах конвективного нагрева, 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. Предложен новый алгоритм управления печью, основанный на расчете температуры поверхности и середины нагреваемых слабов.

Предложенный алгоритм нагрева материалов в АСУТП печи конвективного нагрева позволит ожидать нужных температурных показателей слабов на основе предварительно или интерактивно проводимых расчетов необходимой температуры греющего газа и своевременной регулировки нагревателей.

Этот алгоритм, содержащий математическую модель, можно использовать в существующем АСУТП нагревательных печей без изменения схемы контроля температур, или собирая данные со всех термопар в управляющий контроллер (компьютер) с предустановленной моделью для расчета прогрева садки в соответствующих областях.

Разработанная автором автоматизированная система научных исследований в теплотехнике должна быть применена на производстве как для предварительной оценки конструктивных изменений печей и миксеров, так и для интерактивных расчетов изменений условий нагрева материалов.

Главный энергетик ООО «КрамЗ»

Суворов Василий Валерьевич



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

SIBIRIAN
FEDERAL
UNIVERSITY



СИБИРСКИЙ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Институт цветных металлов и материаловедения

660025, г. Красноярск,
пр.им. газеты Красноярский рабочий, 95
Телефон (391) 206-36-98, факс (391)206-36-93
E-mail: vnbar79@mail.ru

№ _____
На _____ от _____

Справка о внедрении ЭОК «Виртуальная лаборатория теплотехники»

Справка дана Портянкину Артему Александровичу о том, что электронный обучающий курс «Виртуальная лаборатория теплотехники», основным разработчиком которого он является, внедрен в образовательный процесс и используется для проведения научно-исследовательских работ магистрантами и аспирантами по направлениям: 22.04.02 – Metallurgy, 15.03.04 – Автоматизация, 27.04.04 – Управление в технических системах.

Электронный обучающий курс включает в себя: учебно-консультационную программу для расчета и визуализации параметров и переменных многослойной стенки имеющую свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015613485 от 17 марта 2015г; лабораторный практикум "Металлургическая теплотехника. Теплопроводность конструктивных элементов", доступный в научной библиотеке СФУ; интерактивный веб-интерфейс на платформе системы Moodle.

Директор ИЦМиМ



В.Н.Баранов

Исполнитель: *[Signature]*
3.06.2015



УТВЕРЖДАЮ:



Генеральный директор

Д.Н. Макаров

2018г.

АКТ

использования результатов исследований,
полученных в диссертационной работе Портянкина Артема Александровича
«Модели и алгоритмы для управления процессами электролитического получения
алюминия и нагрева слябов в конвективных печах», представляемой на соискание ученой
степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 - Автоматизация и
управление технологическими процессами и производствами.

В диссертации исследуется теплопередача через бортовую футеровку алюминиевого электролизера и процессы плавления – кристаллизации гарнисажа, имеющегося на внутренней поверхности стенки ванны и вносящего нелинейные аспекты в управление. Автором представлена новая численная модель поведения гарнисажа, позволяющая рассчитывать динамическое распределение температур по сечению борта электролизера, изменение тепловых потерь в окружающую среду, положение фронта кристаллизации.

Целью разработки новой модели для системы управления было снижение расхода электроэнергии за счет уменьшения вариации КО и температуры путем уточнения воздействий напряжением.

В рамках проведения договорных научно-технических работ между ООО «РУСАЛ ИТЦ» и ФГАОУ ВО «СФУ» в 2016 году по теме «Разработка связанного алгоритма стабилизации состава электролита и управления тепловым балансом для энергоэффективных электролизеров», и 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».

Следует отметить необходимость использования новой расчетной схемы температур борта непосредственно в алгоритмах АСУ стабилизации теплового баланса при возможном внедрении установок рекуперации бортовых теплопотерь, а также при использовании съемных ребер охлаждения.

Директор проекта
«Энергосберегающие конструкции электролизеров», к.т.н.

Г.В. Архипов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015613485

Учебно-консультационная программа для расчета и
визуализации параметров и переменных многослойной
стенки

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования «СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(RU)*

Авторы: *Портянкин Артём Александрович (RU), Пискажова
Татьяна Валериевна (RU), Тинькова Светлана Михайловна (RU)*

Заявка № 2014662060

Дата поступления 26 ноября 2014 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 17 марта 2015 г.



Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ГАРНИСАЖА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

В ходе программной реализации нульмерной модели описанной во второй главе был разработан программный продукт для проведения расчетов и анализа полученных результатов, на котором проведены исследования поведения гарнисажа (настыли) в печах, путем изменения управляющих воздействий (T_0 – температура внутренней среды, T_1 – температура ликвидуса расплава). При описании модели далее будем использовать слово «гарнисаж».

За исходные данные взяты два варианта двухслойной футеровки алюминиевых электролизеров и два различных по свойствам гарнисажа, теплофизические характеристики которых приведены в таблице 1:

Таблица 1 – Исходные данные

Материал	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Плотность, кг/м ³	Толщина слоя, м
Гарнисаж №1	1	2000	–
Гарнисаж №2	2	2000	–
Угольный блок	7	1720	0,2
Карбидокремниевый блок	25	2100	0,2
Стальной кожух	40	7800	0,01

Программа реализована по блок-схеме представленной на рисунке 1:

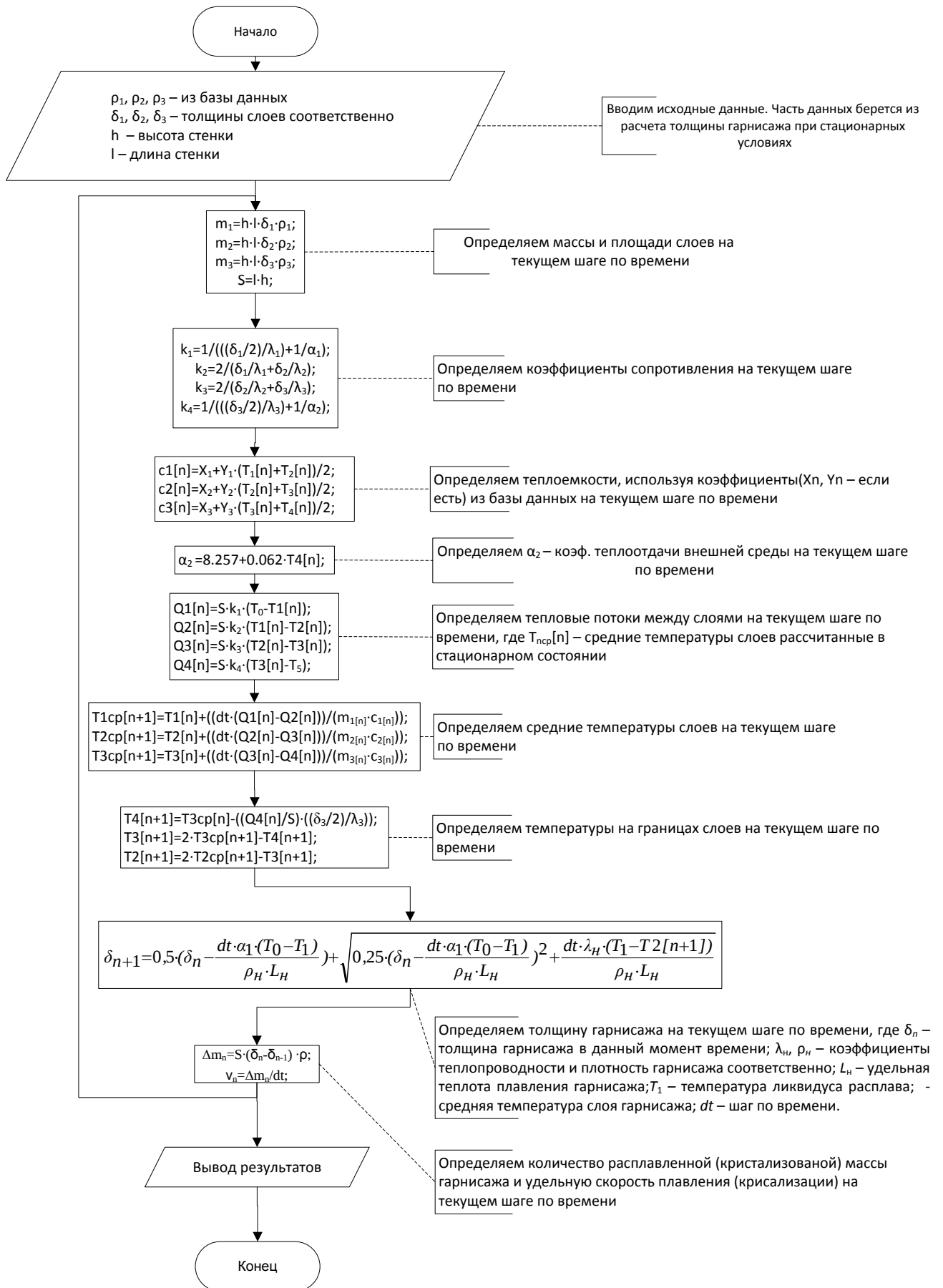


Рисунок 1 – Блок-схема динамического расчета толщины гарнисажа

Ниже представлен способ расчета по определению расплавленной массы и удельной скорости плавления:

$$\Delta m_n = S \cdot (\delta_n - \delta_{n-1}) \cdot \rho;$$

$$v_n = \Delta m_n / \Delta t;$$

где Δm_n – прирост (убыль) массы на текущем шаге; S – площадь поверхности ($S=1\text{ м}^2$); δ_0 – начальная толщина гарнисажа; δ_n – текущая толщина гарнисажа; ρ – плотность гарнисажа; Δt – шаг по времени.

Результаты расчета при $\alpha_1=1000\text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ представлены в виде графиков скорости изменения и кристаллизации гарнисажа, таблицей переменных, включающей в себя начальную и текущую толщину, количество преобразованной на текущем шаге по времени и за все время в целом массы гарнисажа и скорость преобразования гарнисажа на текущем шаге, реализованных в программном интерфейсе:

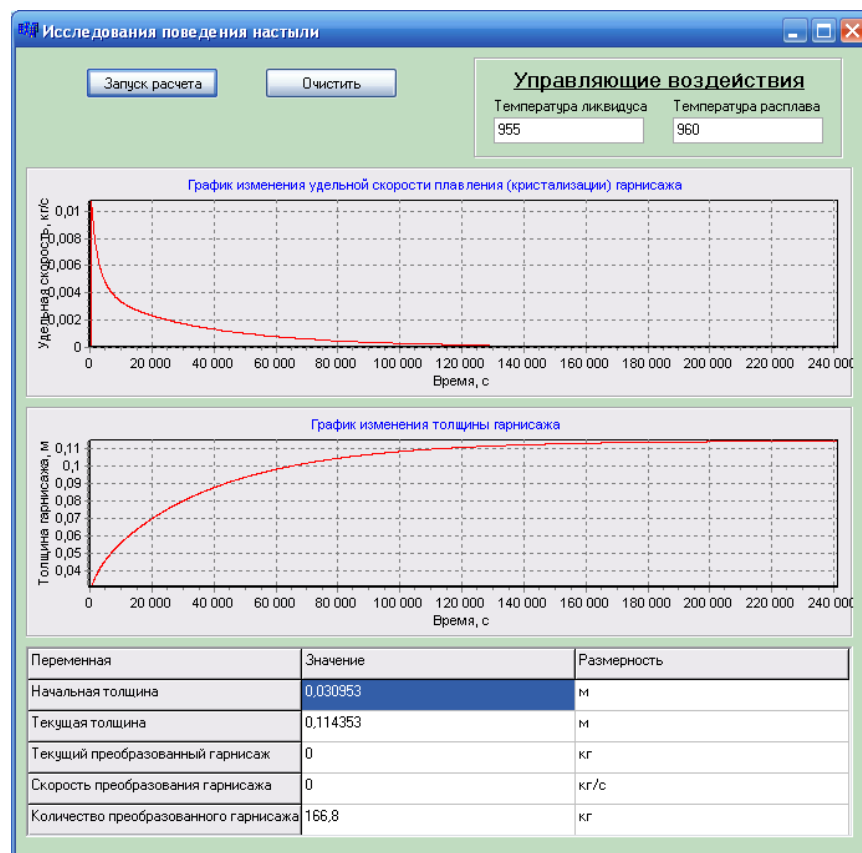


Рисунок 2– Результаты расчета при задании теплофизических характеристик материалов (Гарнисаж №1, угольный блок, стальной кожух) при подаче воздействия путем изменения температуры ликвидуса на плюс 5 °С

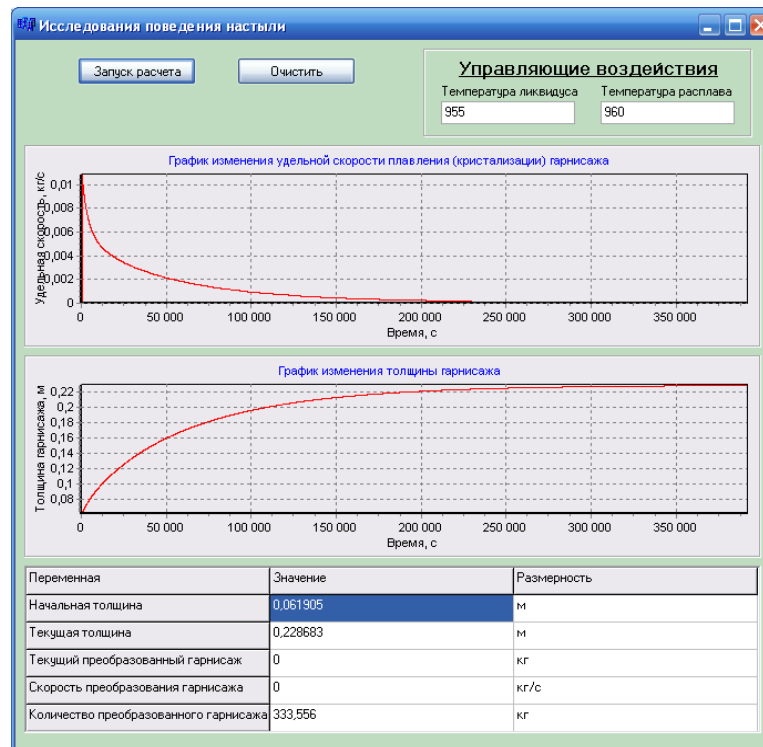


Рисунок 3— Результаты расчета при задании теплофизических характеристик материалов (Гарнисаж №2, угольный блок, стальной кожух) при подаче воздействия путем изменения температуры ликвидуса на плюс 5°С

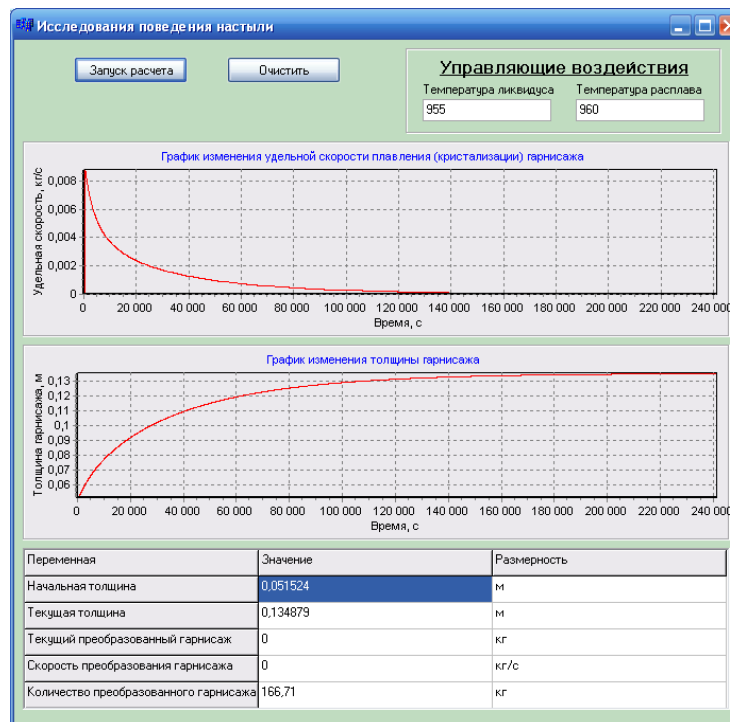


Рисунок 4 – Результаты расчета при задании теплофизических характеристик материалов (Гарнисаж №1, карбидокремниевый блок, стальной кожух) при подаче воздействия путем изменения температуры ликвидуса плюс 5°С

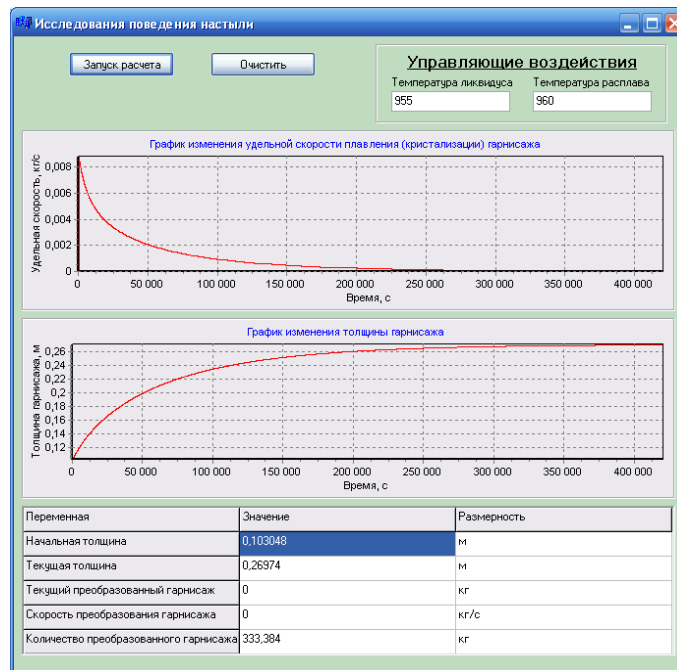


Рисунок 5 – Результаты расчета при задании теплофизических характеристик материалов (Гарнисаж №2, карбидокремниевый блок, стальной кожух) при подаче воздействия путем изменения температуры ликвидуса плюс 5°C

Также проведены исследования поведения гарнисажа при $\alpha_1 = 1000 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$, при неизменной температуре ликвидуса, при подаче воздействия путем изменения температуры расплава для различных видов футеровки на $\pm 2^\circ\text{C}$, $\pm 5^\circ\text{C}$. Результаты расчетов представлены в таблицах 2 – 6 и на рисунке 6.

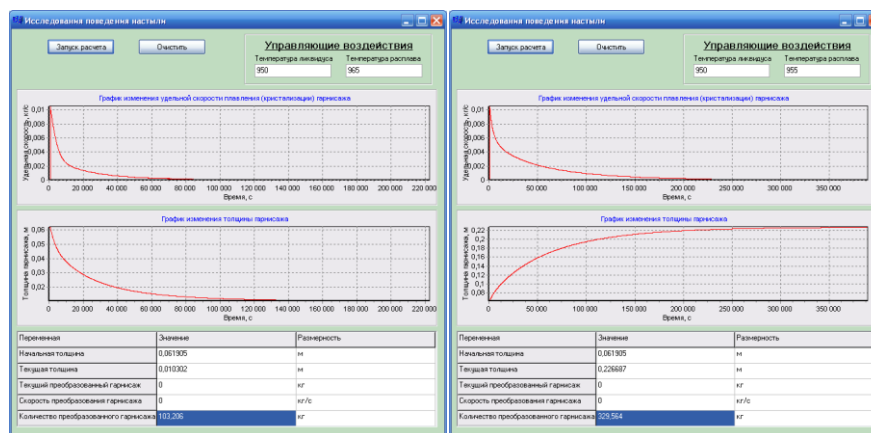


Рисунок 6 – Результаты расчета при задании теплофизических характеристик материалов (Гарнисаж №2, угольный блок, стальной кожух) подаче воздействия путем изменения температуры расплава на $\pm 5^\circ\text{C}$

Таблица 2 – Результаты проведенных исследований при подаче воздействия путем изменения температуры ликвидуса на плюс 5 градусов

Материалы стенки	Гарнисаж №1, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №2, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №1, карбидокремниевый блок, стальной кожух	Гарнисаж №2, карбидокремниевый блок, стальной кожух	Коэффициент теплоотдачи, $\alpha_1 = 1000 \text{ Вт/ м}^2 \cdot \text{К}$
<i>Переменная</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Размерность</i>
Начальная толщина гарнисажа	0,031	0,062	0,052	0,103	м
Конечная толщина гарнисажа	0,114	0,229	0,135	0,27	м
Масса преобразованного гарнисажа	166,8	333,6	166,7	333,4	кг
Максимальная удельная скорость плавления (кристаллизации) гарнисажа	0,0105	0,0110	0,0805	0,081	кг/с
Время переходного процесса	66,7	104,2	65,2	115,3	ч

Таблица 3 – Результаты проведенных исследований при подаче воздействия путем изменения температуры расплава на плюс 2 °С

Материалы стенки	Гарнисаж №1, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №2, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №1, карбидокремниевый блок, стальной кожух	Гарнисаж №2, карбидокремниевый блок, стальной кожух	Коэффициент теплоотдачи, $\alpha_1 = 1000 \text{ Вт/ м}^2 \cdot \text{К}$
<i>Переменная</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Размерность</i>
Начальная толщина гарнисажа	0,031	0,062	0,052	0,103	м
Конечная толщина гарнисажа	0,018	0,036	0,038	0,077	м
Масса преобразованного гарнисажа	26,1	52,2	26,1	52,2	кг
Максимальная удельная скорость плавления (кристаллизации) гарнисажа	0,0045	0,0047	0,0039	0,00395	кг/с
Время переходного процесса	37,5	44,4	26,9	32,7	ч

Таблица 4 – Результаты проведенных исследований при подаче воздействия путем изменения температуры расплава на минус 2 °С

Материалы стенки	Гарнисаж №1, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №2, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №1, карбидокремниевый блок, стальной кожух	Гарнисаж №2, карбидокремниевый блок, стальной кожух	Коэффициент теплоотдачи, $\alpha_1 = 1000 \text{ Вт/ м}^2 \cdot \text{К}$
<i>Переменная</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Размерность</i>
Начальная толщина гарнисажа	0,031	0,062	0,052	0,103	м
Конечная толщина гарнисажа	0,051	0,102	0,072	0,143	м
Масса преобразованного гарнисажа	40	80,4	40	80	кг
Максимальная удельная скорость плавления (кристаллизации) гарнисажа	0,0045	0,0047	0,0039	0,00395	кг/с
Время переходного процесса	39,4	40,4	34,7	46,7	ч

Таблица 5 – Результаты проведенных исследований при подаче воздействия путем изменения температуры расплава на плюс 5 °С

Материалы стенки	Гарнисаж №1, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №2, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №1, карбидокремниевый блок, стальной кожух	Гарнисаж №2, карбидокремниевый блок, стальной кожух	Коэффициент теплоотдачи, $\alpha_1 = 1000 \text{ Вт/ м}^2 \cdot \text{К}$
<i>Переменная</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Размерность</i>
Начальная толщина гарнисажа	0,031	0,062	0,052	0,103	м
Конечная толщина гарнисажа	0,005	0,01	0,026	0,051	м
Масса преобразованного гарнисажа	51,6	103,2	51,63	103,26	кг
Максимальная удельная скорость плавления (кристаллизации) гарнисажа	0,0105	0,011	0,0805	0,081	кг/с
Время переходного процесса	58,3	61,1	26,9	31,1	ч

Таблица 6 – Результаты проведенных исследований при подаче воздействия путем изменения температуры расплава на минус 5 °С

Материалы стенки	Гарнисаж №1, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №2, угольный блок, стальной кожух	Гарнисаж №1, карбидокремниевый блок, стальной кожух	Гарнисаж №2, карбидокремниевый блок, стальной кожух	Коэффициент теплоотдачи, $\alpha_1 = 1000 \text{ Вт/ м}^2 \cdot \text{К}$
<i>Переменная</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Значение</i>	<i>Размерность</i>
Начальная толщина гарнисажа	0,031	0,062	0,052	0,103	м
Конечная толщина гарнисажа	0,113	0,227	0,134	0,268	м
Масса преобразованного гарнисажа	164,8	329,6	164,7	329,4	кг
Максимальная удельная скорость плавления (кристаллизации) гарнисажа	0,0105	0,011	0,0805	0,081	кг/с
Время переходного процесса	66,7	104,2	65,3	115,4	ч

Как видно из таблицы 2, при подаче воздействия путем изменения температуры ликвидуса на плюс 5 °С, наименьшая удельная скорость кристаллизации достигается при использовании в конструкции футеровки угольных блоков, а наибольшая при использовании карбидокремниевых блоков. При этом двукратная разница теплопроводности между гарнисажем №1 и №2 влияет на скорость плавления незначительно. Также из таблицы 2 видно, что максимальное время переходного процесса достигается при использовании таких материалов как гарнисаж №2, карбидокремниевый блок и стальной кожух. Минимальное время переходного процесса достигается при использовании гарнисажа №1, карбидокремниевых блока и стального кожуха. Данные результаты полностью совпадают с результатами представленными в таблице 6, где воздействие осуществлялось путем изменения температуры расплава на минус 5 °С.

Аналогичную тенденцию по удельной скорости плавления (кристаллизации) можно увидеть при подаче воздействия путем изменения температуры расплава на плюс 2 °С в таблице 3. Однако, из таблицы 3 видно, что максимальное время переходного процесса достигается при использовании отличных от предыдущего случая материалов, а именно: гарнисаж №2, угольный блок и стальной кожух, при этом минимальное время переходного процесса по-прежнему достигается при использовании гарнисажа №1, карбидокремниевых блока и стального кожуха.

Как видно из таблицы 4, тенденция по максимальной и минимальной удельной скорости плавления (кристаллизации) сохраняется при подачи воздействия путем изменения температуры расплава на минус 2°С. Максимальное время переходного процесса достигается при использовании таких материалов как гарнисаж №2, карбидокремниевый блок и стальной кожух, а минимальное при гарнисаж №1, карбидокремниевый блок и стальной кожух.

При подаче воздействия путем изменения температуры расплава на плюс 5°С максимальное время переходного процесса достигается при использовании таких материалов как гарнисаж №2, угольный блок и стальной кожух.

Минимальное время переходного процесса достигается при использовании гарнисажа №1, карбидокремниевых блока и стального кожуха.

В ходе проведенных исследований было показано, что разработанная модель адекватно отражает переходные процессы при подаче различных воздействий. Все полученные результаты соответствуют результатам, получаемым по схожим моделям. Однако, на текущий момент компьютерные мощности позволяют использовать более сложные модели, которые повышают точность определения искомых переменных, в связи с чем, было принято решение разработать более точную модель, использующую другой математический аппарат, в основу которого положен метод ловли фронта в фазовый узел по неявной четырех точечной схеме, который был выбран после проделанного литературного обзора как наиболее подходящий.