

На правах рукописи



НОВИКОВ ВИКТОР АНДРЕЕВИЧ

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ
ПОЛУНЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ**

2.3.3 - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский Федеральный Университет», г. Красноярск

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент
Пискажова Татьяна Валериевна

Официальные
оппоненты:

Лившиц Александр Валерьевич
доктор технических наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Иркутский государственный
университет путей сообщения», г. Иркутск,
заведующий кафедрой автоматизации
производственных процессов

Курашкин Сергей Олегович
кандидат технических наук
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана», старший научный
сотрудник НОЦ "ФНС России и МГТУ
им. Н.Э. Бумана"

Ведущая организация:

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

Защита состоится 9 октября 2026г. в 15:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.249.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» по адресу: 660037, г. Красноярск, проспект имени газеты «Красноярский рабочий», 31.

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

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Панфилов
Илья Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Литье алюминиевых слитков является ключевым процессом в цветной металлургии, обеспечивающим производство полуфабрикатов для авиастроения, автомобилестроения, энергетики и оборонной промышленности. Однако традиционные методы разработки литейных технологий и управления ими сталкиваются с рядом существенных ограничений: высокая ресурсоемкость натурных экспериментов, сложность прогнозирования дефектов (трещин, усадочных раковин, неоднородности структуры) и зависимость качества слитков от множества взаимосвязанных параметров — температуры расплава, скорости литья, интенсивности охлаждения и самой геометрии слитка. Следует также отметить невозможность измерения важных показателей слитка из-за непрерывного охлаждения водой и аварийность процесса. В условиях растущих требований к точности и воспроизводимости процессов актуальным становится переход к управлению на основе цифрового моделирования, позволяющему улучшить технологию, как на этапе виртуального проектирования, так и во время процесса литья.

Поэтому актуальными направлениями совершенствования технологических процессов в литейном производстве являются:

1. Разработка целостной цифровой модели для литейных агрегатов, способной с достаточной точностью и в реальном времени отражать физические процессы во всех ключевых зонах с учетом их взаимосвязи, прогнозировать возникновение отклонений и дефектов на основе измеряемых и рассчитываемых параметров.

2. Разработка алгоритмов прогностического управления, базирующихся на цифровой модели с целью выбора управляющих воздействий (скорости литья, расхода охлаждающей жидкости) для предотвращения отклонений и дефектов, и повышения безопасности процесса.

Разработанность темы.

Вопросам технологии полунепрерывного литья алюминиевых слитков посвящены работы Напалкова В.И., Маминой Л.И., Беляева С.В., Арапова С.Л.

Вопросами разработки отдельных моделей процесса литья слитка посвящены исследования И.Н Будилова, И.Ю. Крюкова, Е.И. Маруковича, В.А. Пумпура, А. А. Ильина, Н. А. Степаненко, Ю. В. Байковского, В.И. Панфелова, С.В. Панфелова, А.В. Прохорова, VegardInnerdal, Birger S. Ellevseth, ArildHåkonsen и др.

Существующее коммерческое программное обеспечение (ProCast, SolidCast, Flow 3D) позволяет выполнять моделирование отдельно взятых процессов литейного агрегата и широко используется в исследованиях А. И. Безруких, В. Н. Баранова, А. В. Минакова, М. В. Первухина, Д. В. Платонова, М. Ю. Хацаюка. Однако нет возможности его интегрирования в существующую систему АСУТП литейных каскадов по производству алюминиевых слитков, в первую очередь, из-за длительного времени расчета. Обзор передовых тенденций указывает на растущую роль цифровых двойников агрегатов как основы для создания систем управления нового поколения. Но существующие реализации часто ограничиваются либо имитацией отдельных узлов, либо функциями пост-анализа, не будучи глубоко интегрированными в контур реального управления. Авторами К. О. Tveito and А. Håkonsen разработан цифровой двойник, предназначенный для моделирования заполнения металлотракта литейного агрегата и первичного заполнения кристаллизаторов, компания «Nucast» разработала цифровые двойники для комплектных литейных линий, позволяющие проводить программные тесты и виртуальный ввод в эксплуатацию.

Вопросам управления и автоматизации технологических процессов в металлургии посвящены работы Кожевникова А.В., Пышминцева И.Ю. Шкуратова Е.А., Бабий Ю. И. в том числе на основе математического моделирования процессов.

Выявленные ограничения существующих АСУТП в сочетании с высокой сложностью и взаимосвязанностью параметров процесса полунепрерывного литья, а также необходимостью минимизации дорогостоящих дефектов и повышения выхода годного металла указывают на недостаточность традиционных подходов к управлению.

Цель диссертационной работы:

Повышение качества продукции и безопасности процесса литья плоских слитков за счет применения разработанных алгоритмов управления на базе цифровой модели литейного агрегата.

Задачи исследования:

1. Провести изучение и анализ существующего технического обеспечения литейных агрегатов полунепрерывного литья слитков, технологии производства алюминиевых слитков, существующих зарубежных и отечественных систем управления. Определить зависимость между критериями качества процесса и технологическими параметрами.

2. Для использования в алгоритмах управления разработать математические модели выливки металла из миксера, движения металла по металлотрактору, двумерную модель литья слитка. Модели должны прогнозировать скорость и температуру металла в разных точках литейного агрегата и температуры формирующегося слитка.

3. Разработать разностные схемы и расчетный алгоритм для этих моделей. Оценить адекватность моделей путем сравнения результатов с натурными измерениями и эталонным моделированием в ПО ProCast.

4. Для учета воздействия изменения расхода охлаждающей жидкости разработать методику расчета коэффициента теплообмена для различных областей охлаждения слитка.

5. Разработать алгоритмы управления на основе математических моделей для отдельных элементов литейного агрегата (поворотный миксер, металлотракт, литейная машина).

6. Разработать цифровую модель процесса литья алюминиевого слитка, интегрирующую комплекс математических моделей для расчета критериев качества процесса.

7. Разработать комплексный алгоритм управления для литейного агрегата, с корректирующими воздействиями на управляющие сигналы на основе прогнозирования возникновения дефектов и для минимизации прорывов металла.

Научная новизна

1. Предложена модель распределения температур в отливаемом слитке, отличающаяся разделением расчетов изменения температур в слитке по его высоте и ширине, использующая динамические коэффициенты теплообмена, учитывающая управляющие воздействия, что позволяет внедрять такую модель в АСУТП и соответственно предсказывать снижение качества или нарушение безопасности в процессе литья.

2. Разработан новый алгоритм работы имитационной модели литейной машины, включающий блоки расчета температур по зонам слитка, разработанную методику определения коэффициентов теплообмена охлаждающей жидкости и слитка в зависимости от изменения расхода и свойств жидкости, что впервые позволит учесть этот управляющий фактор для имитации динамики процесса. Алгоритм позволяет создать цифровой двойник литейного агрегата.

3. Предложен новый комплексный алгоритм управления для литейного агрегата, включающий локальные алгоритмы управления процессом (алгоритм контроля скорости выливки металла из миксера, алгоритмы контроля длины слитка и обнаружения обрыва термопары в миксере), отличающийся применением имитационной модели литейной машины в управлении процессом, и позволяющий корректировать управляющие сигналы на основе прогнозирования возникновения дефектов для повышения качества процесса.

Теоретическая значимость исследования заключается в разработанных методах моделирования сложного трехмерного процесса для задач АСУТП, создании методик моделирования управляющих воздействий, алгоритмизации работы агрегатов, в разработке целостной цифровой модели для литейных агрегатов, способной прогнозировать возникновение дефектов на основе измеряемых и рассчитываемых параметров.

Теоретическую значимость имеет комплексный подход к взаимосвязанному управлению узлами литейного агрегата и разработка алгоритмов прогностического управления.

Практическая значимость результатов:

Разработанное программное обеспечение позволяет проводить исследования и сравнение различных режимов литья разных марок сплавов для предсказания качества слитка и безопасности процесса. Особую важность имеет возможность прогнозирования толщины застывшего слоя слитка при выходе под водяное охлаждение, так как это поможет заранее рассчитать возможность аварийных ситуаций, и также в процессе управления предупреждать аварии с тяжелыми последствиями.

Использование новых алгоритмов, в том числе комплексного алгоритма управления агрегатом позволит исключить ручной труд и присутствие человека возле литейной машины при литье, предупредить нарушения техпроцесса. Модель в составе алгоритма позволяет через расчет полей температур и скоростей охлаждения оценивать параметры, напрямую влияющие на качество отливаемого сплава, и корректировать управление в процессе литья.

Внедрение разработанных локальных алгоритмов подтверждается актом использования результатов исследования на промышленной площадке Красноярского Аллюминиевого Завода, в литейном отделении №2 на литейном каскаде №3.

В акте от Инженерно-Технологического Центра РУСАЛа указывается необходимость тиражирования алгоритма контроля длины слитка, а также отмечена эффективность разработанной цифровой модели в направлении повышения безопасности процесса за счет непрерывного контроля закристаллизовавшегося слоя слитка. Указано, что модель демонстрирует потенциал для прогнозирования качества слитка.

Объект исследования:

Литейные агрегаты для производства алюминиевых плоских слитков методом полунепрерывного литья.

Предмет исследования:

Системы управления литейными установками, модели и алгоритмы для управления литейными агрегатами.

Методы исследования:

Для решения поставленных задач были использованы следующие методы: математическое моделирование процессов массо и теплопереноса; численные и аналитические методы для решения обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных; методы построения алгоритмов управления. При построении цифровой модели были использованы положения ГОСТ Р 57700.37-2021(цифровые двойники) о составе, назначении, оценке соответствия модели реальному объекту.

Положения, выносимые на защиту:

1. Предложенная математическая модель распределения температур в отливаемом слитке, использующая динамические коэффициенты теплообмена, учитывающая управляющие воздействия, достоверно описывает процесс теплопереноса при кристаллизации слитка и пригодна для применения в алгоритмах управления литьем, позволяет рассчитывать изменение температур слитка и предсказывать толщину корки при изменении управляющих воздействий.

2. Новый алгоритм работы имитационной модели литейной машины, включающий расчеты распределения тепла в слитке, воздействие управляющих факторов на процесс, позволил создать цифровую модель литейного агрегата как основу интеллектуальных алгоритмов управления.

3. Новые алгоритмы управления литейным агрегатом (алгоритм контроля скорости выливки металла из миксера, алгоритмы контроля длины слитка и обнаружения обрыва термопары в миксере, комплексный алгоритм управления) на основе собственных математических моделей, позволяют повысить качество и безопасность литья слитков за счет прогнозирования технологических параметров и своевременной корректировки управляющих воздействий.

4. Разработанная на основе новых математических моделей, нового алгоритма работы имитационной модели литейной машины, цифровая модель литейной машины позволяет рассчитывать последствия изменения управляющих параметров (скорость литья,

расход воды, температура расплава и т.д.) и определять зависимость критериев качества процесса от параметров сплава и технологических параметров литья, предсказывать возможность прорыва металла.

Достоверность результатов, выносимых на защиту, подтверждается использованием в моделях известных физических законов и зависимостей, их проверенным преобразованием для нужд исследования, сравнением результатов расчетов с экспериментальными данными, сравнение результатов расчетов авторских моделей с аналогичными расчетами известными пакетами (ProCast).

Апробация материалов исследования.

Основные положения и результаты диссертационной работы, докладывались на следующих конференциях и семинарах:

VIII International Scientific Conference – Summer Session «INDUSTRY 4.0»: Варна, Болгария, 2023 г.

На научных семинарах кафедры Автоматизации производственных процессов в металлургии ИЦМ (2021 – 2025гг.), на ежегодных международных конференциях студентов и молодых ученых «Перспектива Свободный» в 2022- 2024гг

На конференции Advances in Automation VII Proceedings of the International Russian Automation Conference, RusAutoCon2025, Сочи, 2025г

На заседании технического совета ООО «РУСАЛ ИТЦ» с обсуждением результатов исследования и возможностей расширения внедрения.

На VI Международном форуме по цифровизации и ИТ в металлургической отрасли - Smart Mining&Metals с присуждением победы в номинации «Лучшие ИТ-решения для металлургической отрасли», Магнитогорск, 2026г.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Работа соответствует паспорту научной специальности 2.3.3 по следующим пунктам: п. 4. «Теоретические основы и методы моделирования, формализованного описания, оптимального проектирования и управления технологическими процессами и производствами»; п. 6. «Научные основы и методы построения интеллектуальных систем управления технологическими процессами и производствами»; п.18. «Разработка автоматизированных систем научных исследований».

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ (4 без соавторов), в том числе 4 работы в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ для публикации основных научных результатов, а также статья в издании, индексируемом в международной базе цитирования Scopus, получено свидетельство о государственной регистрации ПО.

Личный вклад автора. В работах, опубликованных в соавторстве и приведенных в конце автореферата, лично автором получены следующие результаты: [1] – разработка методики расчета динамических коэффициентов теплообмена; [2] – разработка комплексного алгоритма управления литейным агрегатом; [3] – разработка разностных схем и алгоритма расчета температуры слитка; [4,10] – разработка и внедрение локальных алгоритмов управления литейным агрегатом на основе цифровой модели; [5, 6] – разработка алгоритма работы имитационной модели, структуры и интерфейса цифровой модели литейного агрегата. Все расчеты выполнены автором. Вопросы качества и безопасности процесса рассмотрены лично автором.

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 104 наименования и 4 приложения; содержит 159 страниц машинописного текста, 73 рисунка, 15 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность и формулируется цель диссертационной работы, а также предлагается последовательность задач для достижения поставленной цели.

Указывается научная новизна, практическая значимость работы и методы исследований, сведения об апробации и использовании в производстве результатов работы.

В первой главе проведен детальный анализ технологии полунепрерывного литья (ПНЛ) алюминиевых слитков. Рассмотрены общие принципы получения слитков, проведен обзор конструкций вертикальных литейных машин и детально описан метод ПНЛ, включая его технологические особенности и стадии процесса. Литейный агрегат проанализирован как объект автоматизации с выделением его ключевых элементов, взаимосвязей и динамических свойств. Систематизированы основные показатели качества процесса, определяющие требования к системе управления.

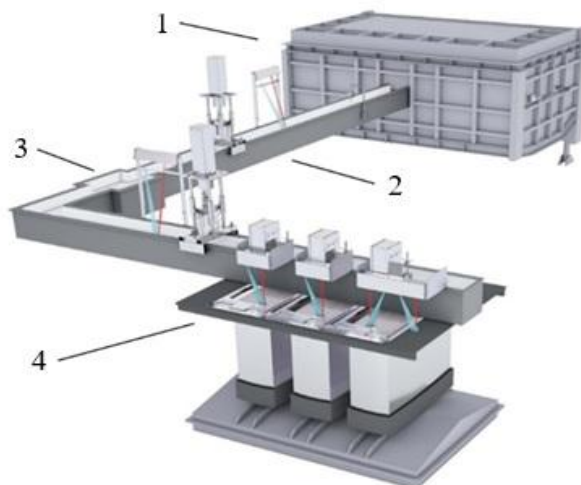


Рисунок 1 – Литейный агрегат: 1 – Миксер; 2 – Металлотракт; 3 – Пеночерамический фильтр; 4 – Литейная машина.

Ключевыми компонентами технологической линии ПНЛ алюминиевых слитков, представленной на рисунке 1, являются миксер, металлотракт и литейная машина. В миксере осуществляется подготовка расплава, который затем транспортируется через металлотракт, проходя предварительную очистку. Работа литейной машины представляет собой циклический процесс. Расплав поступает в водоохлаждаемый кристаллизатор, где происходит первичная кристаллизация и образование твердой оболочки. Далее включается механизм равномерного опускания поддона с установленной скоростью литья. Одновременно активируется система вторичного охлаждения - подача воды на поверхность выходящего из кристаллизатора слитка, что обеспечивает направленное затвердевание металла снизу вверх. Процесс продолжается до достижения максимальной длины слитка, после чего подача металла прекращается, и готовая отливка извлекается из машины.

Миксер в качестве входных параметров имеет массу и температуру залитого в него металла, ток нагрева. Наиболее важным выходным параметром является температура металла на выходе из миксера, скорость выпуска металла из миксера.

Входные параметры литейной машины – скорость движения платформы, расход воды для охлаждения слитка и кристаллизатора, заданная длина слитка, которую необходимо достичь и температура жидкого металла, перед входом в кристаллизатор. К выходным параметрам относятся длина и качество самого отлитого слитка, расход электроэнергии и скорость литья.

Несмотря на высокую технологичность процесса, метод полунепрерывного литья обладает рядом сложностей. К наиболее критичным проблемам относятся: возникновение значительных термических напряжений в слитке во время кристаллизации, что может приводить к образованию горячих и холодных трещин; чувствительность к колебаниям технологических параметров (температуры расплава, скорости литья, расхода охлаждающей воды), вызывающим нестабильность микроструктуры; опасность возникновения взрывов из-за отсутствия возможности контроля толщины закристаллизовавшейся корки слитка при выходе под охлаждение водой.

Анализ применяемых в промышленности АСУТП литья выявил их преимущественно реактивный характер. Существующие системы эффективно решают задачи сбора данных, визуализации и стабилизации отдельных параметров (температура металла, скорость литья, расход воды), но обладают существенными ограничениями:

- Отсутствие прогностической способности – системы не используют модели для предсказания возникновения дефектов или отклонений до их появления в реальном процессе.

- Фрагментарность управления – управление осуществляется для отдельных узлов агрегата (миксер, металлотракт, литейная машина) без достаточной синхронизации и учета их взаимного влияния в реальном времени.

- Анализ типичных дефектов слитков (раковины, трещины, ликвация, волнистость поверхности и т.д.) показал их прямую зависимость от динамики процесса кристаллизации и теплопередачи, которая сложно контролируется существующими АСУТП.

В заключительной части главы рассмотрены концепция и перспективы применения цифровых двойников процессов и агрегатов при литье в качестве современного подхода к управлению. Обоснована актуальность разработки новых моделей и алгоритмов управления литьем, преодолевающих ограничения существующих систем и использующих потенциал цифровых двойников.

Во второй главе разработан комплекс моделей для расчета подачи металла из миксера в металлотракт, охлаждения металла при движении по металлотрактору и для расчета полунепрерывного литья плоских слитков. Выведены разностные схемы для расчета температуры слитка. Разработана методика расчета динамических коэффициентов теплообмена. Проведены тестовые расчеты для подтверждения адекватности модели. Указанные модели требуются для разработки интеллектуальных алгоритмов управления и для создания цифрового двойника литейного агрегата. В начале главы определены ограничения существующего коммерческого программного обеспечения для моделирования процесса литья.

Рассмотрим некоторые из разработанных моделей.

Подача металла из миксера в металлотракт. В настоящее время подача металла из стационарного миксера осуществляется человеком открыванием отверстия пикой. Для автоматизации этого процесса необходимо рассчитать расход металла, который при неизменном положении управляющего устройства летки связан с изменением высоты металла в миксере. С учетом закона Торричелли расход металла через летку можно рассчитать:

$$Q_M = S_{\text{летки}} \cdot n \cdot \mu \sqrt{2gh}, \quad (1)$$

где $S_{\text{летки}}$ – площадь поперечного сечения летки, n – процент открытия летки, h – уровень металла в миксере, μ – динамическая вязкость жидкого металла. Расход металла, необходимый для обеспечения стабильного уровня металла в кристаллизаторах, можно получить, зная площадь поперечного сечения кристаллизатора $S_{\text{сеч.кр}}$ и скорость движения платформы $u_{\text{пт}}$:

$$Q_M = S_{\text{сеч.кр}} \cdot u_{\text{пт}} \cdot m, \quad (2)$$

где m – количество кристаллизаторов.

Исходя из формулы (1) и зная расход металла из формулы (2), можно получить n – необходимый процент открытия летки, для поддержания равенства расхода металла на летке и на кристаллизаторах.

$$n = \frac{Q_M}{S_{\text{летки}} \cdot \mu \sqrt{2gh}}, \quad (3)$$

На рисунке 2 изображен график изменения скорости движения литейной платформы и процент открытия летки при разгоне, который обеспечивает такой расход металла, чтобы уровень в лотке сохранялся неизменным.

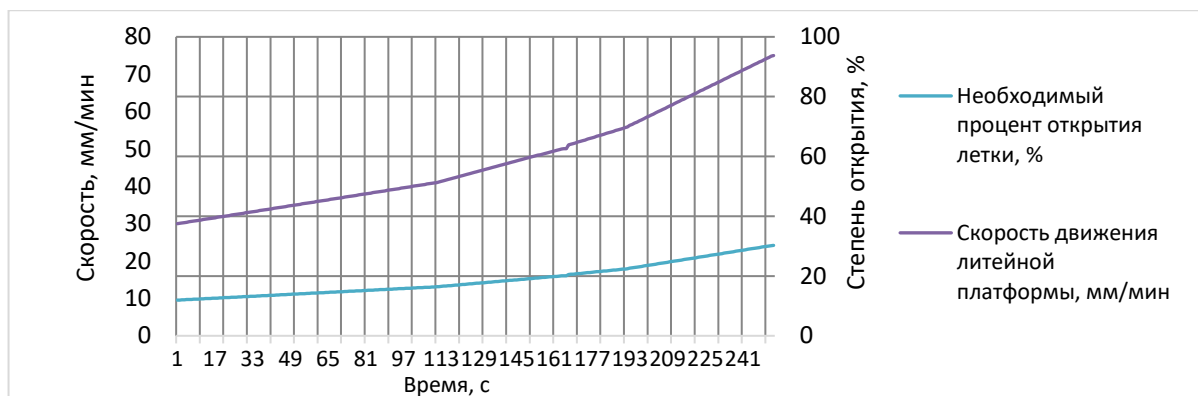


Рисунок 2 – Необходимый процент открытия летки в режиме разгона платформы.

Охлаждение металла при движении по металлотрактору. Для передачи металла из миксера в литейную машину применяются металлотракты различных типов, нами рассмотрен металлотракт без дополнительного обогрева, для расчёта температуры металла используем уравнение теплопроводности для движущейся среды (4), пренебрегаем теплопроводностью по сравнению с адвективным переносом:

$$\rho \cdot c \cdot U_M \cdot \frac{dT_M}{dx} = -K_{M-B}(T_M - T_B) - K_{M-ДН}(T_M - T_{ДН}) - K_{M-СТ}(T_M - T_{СТ}) \quad (4)$$

Где ρ - плотность жидкой фазы алюминия, кг/м³; c - теплоёмкость жидкой фазы алюминия, Дж/(кг·К); T_M - температура металла, °С; $K_{M-СТ}$ - коэффициент теплообмена металл-стенки, Вт/м³·К; $K_{M-ДН}$ - коэффициент теплообмена металл-дно; K_{M-B} - коэффициент теплообмена металл-воздух; $T_{СТ}$ - температура стенок тракта, °С; $T_{ДН}$ - температура дна, °С; T_B - температура воздуха, °С. U_M - скорость движения металла, м/с.

Результаты, полученные с помощью аналитического решения уравнения (4) охлаждения металла при прохождении по металлотрактору, были сравнены с реальными измерениями, проведенными в ходе производственного литья. Измерения проводились на КрАЗе, в литейном отделении №2, литейный агрегат №3 с использованием ручной погружной термопары (тип К) и термопреобразователя FLUKE 51. Погружение термопары в расплав производилось на половину глубины металлотракта, шаг измерения по длине – 10 см. Сравнение показало хорошее согласование между моделью и измерениями (расхождение не более 2°С), что подтверждает адекватность модели.

Комплекс моделей для расчета непрерывного литья слитка: Конечно, непрерывное литье слитков сложный теплофизический процесс, и с точки зрения классического строгого моделирования, необходимо проводить двух, трехмерные расчеты. Но наша задача сделать упрощенные модели и схемы для быстрых расчетов в АСУТП. Рассмотрим пространственный процесс в двух измерениях: по высоте слитка; по ширине слитка.

На рисунке 3 выделены четыре области для моделирования распределения температуры в разрезе слитка:

- I. Охлаждение металла во взаимодействии с кристаллизатором;
- II. Образование воздушного зазора между слитком и кристаллизатором. Вода в данную область не поступает;
- III. Начало подачи воды на стенки слитка, присутствует лунка;
- IV. Все поверхности в воде, лунка отсутствует.

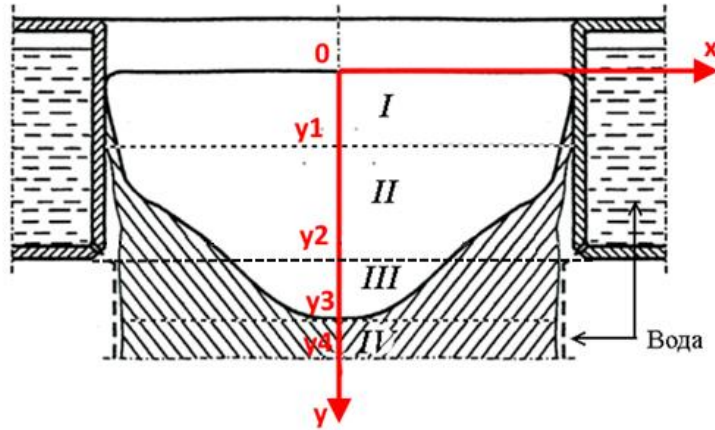


Рисунок 3 - Разделение слитка на области в процессе литья.

Введем систему координат. Начало координат расположим на поверхности жидкого металла в середине длинной стороны, ось y направлена вниз, по направлению движения стола, ось x – по середине продольной стороны.

Глубину лунки в плоских слитках можно выразить равенством (5):

$$h_n = \frac{[q + \frac{1}{2}c \cdot p(T_{кр} - T_n)] \cdot U_l b^2}{2\lambda \cdot (T_{кр} - T_n)} \quad (5)$$

Где c – теплоемкость твердой фазы, Дж/(кг·К); p – плотность твердой фазы, кг/м³; b – половина толщины слитка, м; q – удельная теплота кристаллизации, Дж/кг; $T_{кр}$ – температура кристаллизации, °С; λ – теплопроводность сплава, Вт/м·К; T_n – температура наружной поверхности, °С.

Введём средние значения температуры по толщине слоя (по x координате):

$$\hat{T} = \frac{1}{\delta} \int_{-x/2}^{x/2} T(x, y) dx \quad (6)$$

Здесь δ – толщина слитка (по длинной стороне), м, $\delta = X$ – продольный размер слитка.

С учетом граничных условий получим следующее уравнение изменения температуры по высоте слитка:

$$\rho c U_l \frac{d\hat{T}}{dy} = -\frac{2\alpha_i}{\delta} (\hat{T} - T_i) + Q \quad (7)$$

Где U_l – скорость литья слитков (движение платформы), м/с; T_i – температура внешней среды на текущей стадии расчета ($i = I, II, III, IV$); α_i – соответствующий коэффициент теплообмена.

Начальным условием для уравнения (7) является температура металла на выходе из металлотракта, рассчитанная по формуле (4), источники Q присутствуют в областях I, II, III за счет выделения тепла при кристаллизации металла.

Рассмотрим изменение температур по толщине слитка, сформулируем краевые задачи теплообмена для выделенных областей, на основании одномерных уравнений теплопроводности. Будем рассматривать боковую внешнюю четверть слитка.

Каждая область характеризуется координатами $0 \leq y \leq y_i; X/4 \leq x \leq X/2$ (рис.3), используется одномерное уравнение теплопроводности:

$$c_i \rho_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \lambda_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2}, \quad i = I, II, III, IV \quad (8)$$

Граничные условия:

$$T_i \Big|_{x=\frac{x}{4}} = \hat{T}(y_i/2) = \hat{T}_i, \quad \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \Big|_{x=\frac{x}{2}} = -\alpha_i (T_i - T_{\phi i}) \quad (9)$$

Разработана методика расчета динамических коэффициентов теплообмена для областей II и III. Основу методики составляют критериальные уравнения, связывающие число Нуссельта с числами Рейнольдса и Прандтля. Для зоны II (комбинированное охлаждение) коэффициент рассчитывается как средневзвешенное между струйным обдувом верхней части и турбулентным течением по вертикальной поверхности нижней части. Для зоны III рассматривается турбулентное течение охлаждающей воды.

Для струйного обдува используется зависимость вида $Nu = f(Re, Pr, \text{геометрия сопел})$, а для турбулентного течения – формула (10):

$$\alpha_{III} = 0,021 Re_c^{0,8} \cdot Pr_c^{0,43} \cdot (Pr_c / Pr_{II})^{0,25} \cdot \frac{\lambda_c}{x} \quad (10)$$

где Re_c – критерий Рейнольдса для среды, Pr_c – критерий Прандтля для среды при средней температуре среды, Pr_{II} – критерий Прандтля для среды при средней температуре поверхности, x – ширина слитка.

С учетом наличия воздушного зазора определяется эквивалентный коэффициент по формуле 11, связывающей тепловые потоки.

$$\alpha_{II} = \frac{\alpha_{ВЕРХ} \cdot 0,1 + \alpha_{НИЗ} \cdot 0,9}{2} \quad (11)$$

Для зоны III (объемное кипение) коэффициент рассчитывается по формуле 12:

$$\alpha_{III} = 0,021 Re_c^{0,8} \cdot Pr_c^{0,43} \cdot (Pr_c / Pr_{II})^{0,25} \cdot \frac{\lambda_c}{x}, \quad (12)$$

В уравнениях (10) – (12) критерий Рейнольдса (Re_c) напрямую определяется скоростью и, следовательно, расходом воды, что также влияет на температурозависимые критерии Прандтля (Pr_c и Pr_{II}).

На основе предложенной методики выполнены расчеты, установлены количественные зависимости коэффициентов теплообмена от расхода жидкости. На рисунке 4 представлена зависимость коэффициентов теплообмена от расхода охлаждающей жидкости.

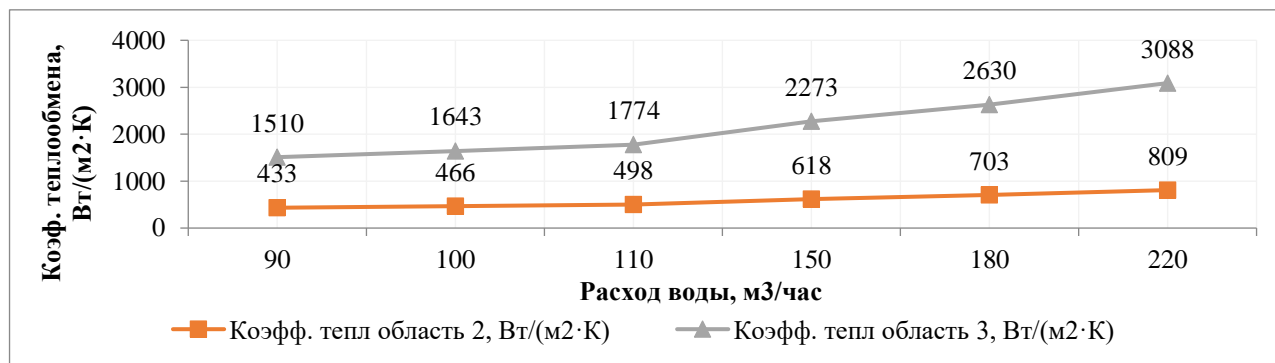


Рисунок 4 - График зависимости коэффициентов теплообмена для области II и III от расхода охлаждающей воды.

Алгоритм расчета в целом по имитационной модели работы литейной машины представлен на рисунке 5. Опишем методику расчета температур слитка по блокам алгоритма.

1. В качестве начальных данные по температуре металла, используем температуру металла в раздаточном миксере. Производим расчёт падения температуры металла в результате прохождения через металлотракт, получаем температуру на входе в кристаллизатор. Значение температуры в конце тракта считаем начальным условием для следующего шага.

2. Выполняем расчет глубины лунки при заданных параметрах литья по формуле (5). Получаем значение высоты каждой области.

3. Производим расчёт динамических коэффициентов теплообмена для областей II и III в зависимости от расхода охлаждающей воды.

4. Численно решая уравнение (7), получаем распределение температуры по высоте слитка. Используем значение температуры внешней среды и коэффициенты теплообмена в зависимости от областей, определенных в предыдущем пункте.

5. Находим распределение температур по толщине слитка в начале области I, в качестве начальной температуры берем температуру поступившего в кристаллизатор металла. Производим расчёт по толщине слитка и температуру стенок слитка, численно решая уравнения (8) с граничными условиями (9) в течении времени нахождения металла в области I.

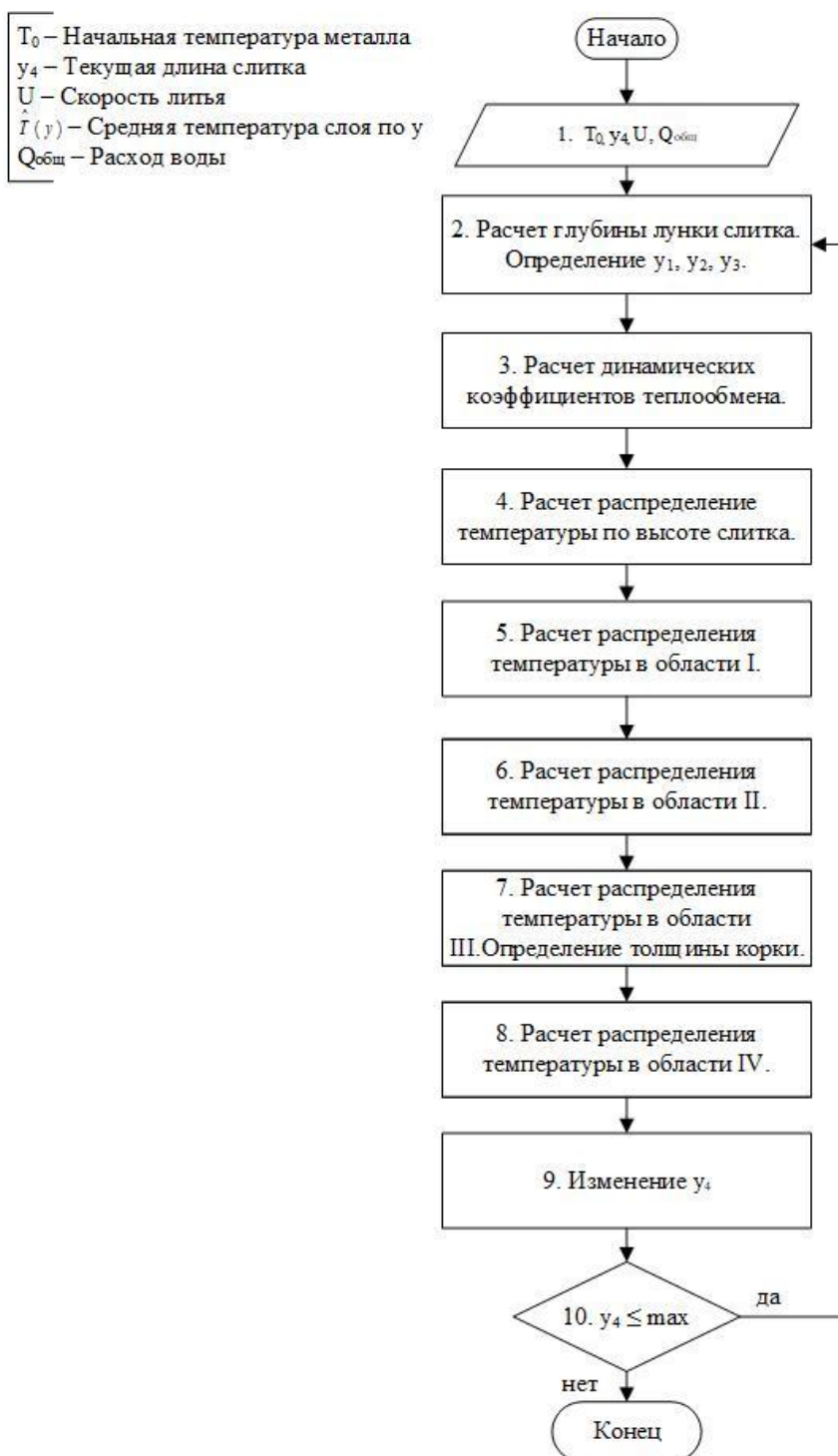


Рисунок 5 –Алгоритм работы имитационной модели литейной машины.

Численное решение краевой задачи находится по явной схеме. Вводится равномерная разностная сетка по координате $\Delta x = x_{i+1} - x_i, x_1 = 0, x_{ii} = X/2, 1 \leq i \leq ii$. Сеточные уравнения для внутренних точек, где Δt – шаг по времени (индекс n), запишутся:

$$T_i^n = T_i^{n-1} + \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \frac{\lambda}{c \cdot \rho} (T_{i+1}^{n-1} - 2T_i^{n-1} + T_{i-1}^{n-1}). \quad (13)$$

Для граничных точек $x_{ii} = X/2$ получаются соотношения для расчета температуры на стенке слитка:

$$T_{ii}^n = \left(\frac{\alpha \cdot \Delta x}{\lambda} \cdot T_{HC} + T_{ii-1}^n \right) / \left(\frac{\alpha \cdot \Delta x}{\lambda} + 1 \right), \quad (14)$$

где T_{HC} - температура наружной среды, α коэффициент теплообмена с наружной средой, λ - теплопроводность металла в этой области слитка. Время нахождения металла в области определяем по формуле:

$$t_1 = h_1 / U_{л} \quad (15)$$

6. В качестве начальных условий используем значение распределения температуры по ширине из области I в момент времени t_1 . Производим расчёт по толщине слитка и температуру стенок слитка, численно решая задачу (8), (9), в течении времени нахождения металла в области II. Время нахождения металла в области (t_2) определяется аналогично (15):

7. В качестве начальных условий используем значение распределения температуры по ширине из области II в момент времени t_2 . Находим температуру стенок слитка в верхней части области III, так как именно здесь может случиться авария, в связи с попаданием воды на недостаточно закристаллизовавшуюся поверхность. Производим расчёт по толщине слитка и температуру стенок слитка, в течении времени нахождения металла в области III $t_3 = h_3 / U_{л}$.

8. В качестве начальных условий используем значение распределения температуры по ширине из области III в момент времени t_3 . Производим расчёт по толщине слитка и температуру стенок слитка. В качестве контрольной толчки рассматриваем срез на длине 1 м. Тогда время выдержки металла в области IV определяем по формуле: $t_4 = (l - h_{л}) / U_{л}$

9. Меняем высоту слитка, возвращаемся к расчету температуры металла по высоте.

10. Если заданная длина слитка не достигнута, возвращаемся к шагу 2, иначе – завершаем расчет.

Проведено сравнение моделирования распределения температуры в слитке с использованием программного комплекса ProCast и собственной разработанной математической модели при следующих основных начальных условиях:

- Сплав - AlMg5 (1580);
- Тип кристаллизатора – Кристаллизатор скольжения, высота 170 мм;
- Сечение слитка – 700x400 мм;
- Начальная температура металла- 705 °С;
- Скорость литья – 65 мм/мин;
- Расход охлаждающей жидкости – 200 м³/ч;
- Температура охлаждающей жидкости (подача) – 23 °С.

Результаты моделирования, полученные собственной программой, демонстрируют высокую степень соответствия данным рассчитанным в ProCast, как по характеру температурных полей, так и по значениям температуры в характерных точках и сечениях слитка, представлены на рисунке 6.

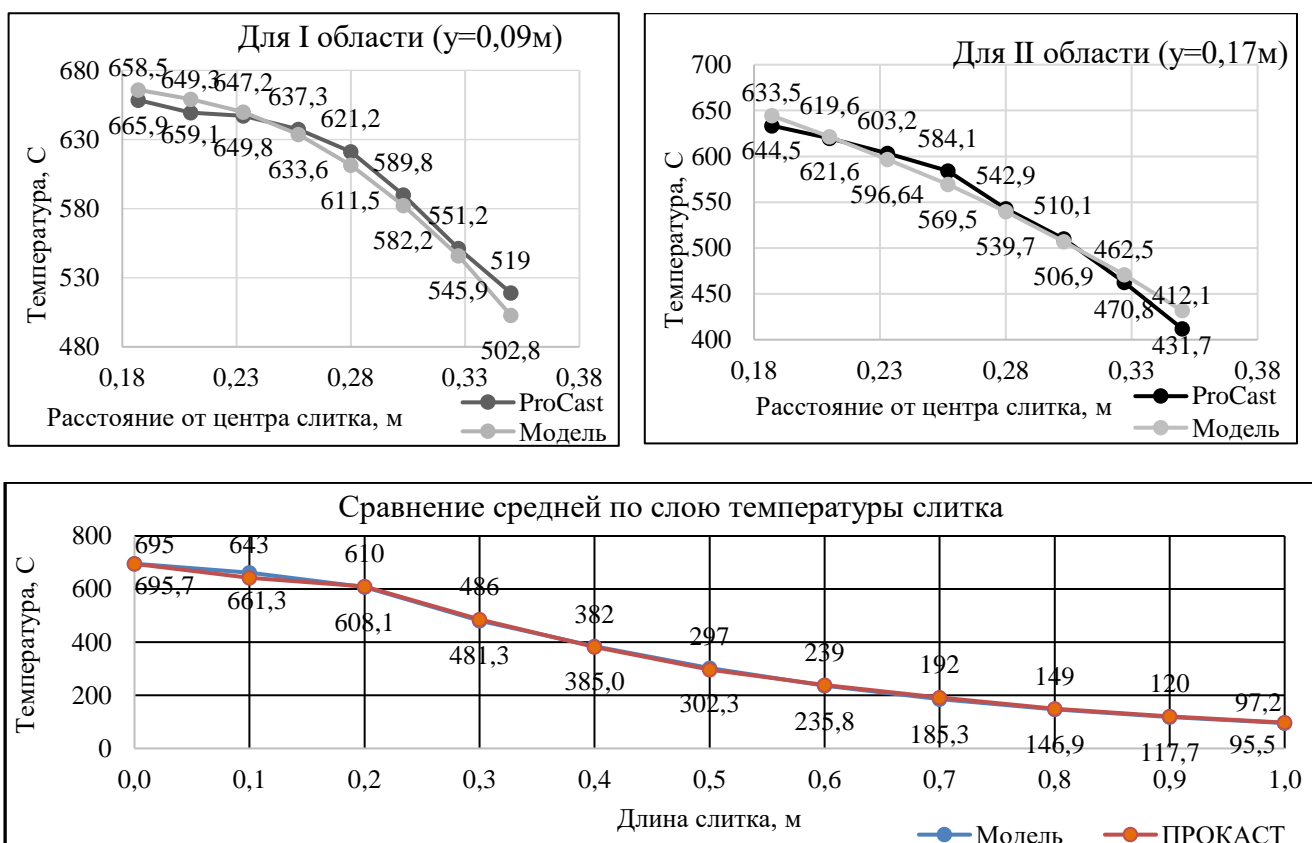


Рисунок 6 – Сравнение моделирования с расчетами в ProCast.

На основании удовлетворительного согласования результатов сделан вывод о корректности разработанной математической модели и алгоритмов расчета. Разработанная модель адекватно описывает процесс теплопереноса при кристаллизации слитка и пригодна для решения практических задач моделирования температурных полей в рамках исследуемой постановки.

В третьей главе представлены как локальные алгоритмы управления для ключевых функциональных узлов литейного агрегата, так и комплексный алгоритм управления литейным агрегатом.

В качестве локальных алгоритмов управления представлены:

1. Алгоритм измерения и расчета длины слитка на тросовых литейных машинах, согласно разработанному методу на основе нелинейной зависимости. В результате внедрения удалось достичь снижения погрешности измерения длины слитка с 66,1 мм до 6,7 мм.

2. Алгоритм контроля достоверности показаний температуры металла в миксере. Метод контроля позволяет определять нелинейный рост температуры металла с высокой крутизной фронта, что сигнализирует о неисправности защитной оболочки термопары. Преимуществом данного метода является: ранее обнаружение неисправности, дифференциация причин, минимальные ресурсы, работает в real-time на ПЛК. В результате внедрения удалось предотвратить аварии.

3. Алгоритм управления подачей металла из миксера, для стационарного миксера представлен на рис. 7. В процессе работы алгоритм каждый рабочий цикл рассчитывает актуальное значение высоты металла в миксере. На основе измеренной скорости движения литейной платформы и рассчитанной текущей скорости течения металла через летку, происходит расчет процента открытия летки. Алгоритм включает в себя два режима:

- если уровень металла в лотке находится в допустимых пределах от заданного, то используется рассчитанный процент открытия;

- если уровень металла в лотке выше либо ниже допустимого предела от заданного, то формируется минимально либо максимально допустимый процент открытия в течении времени T.

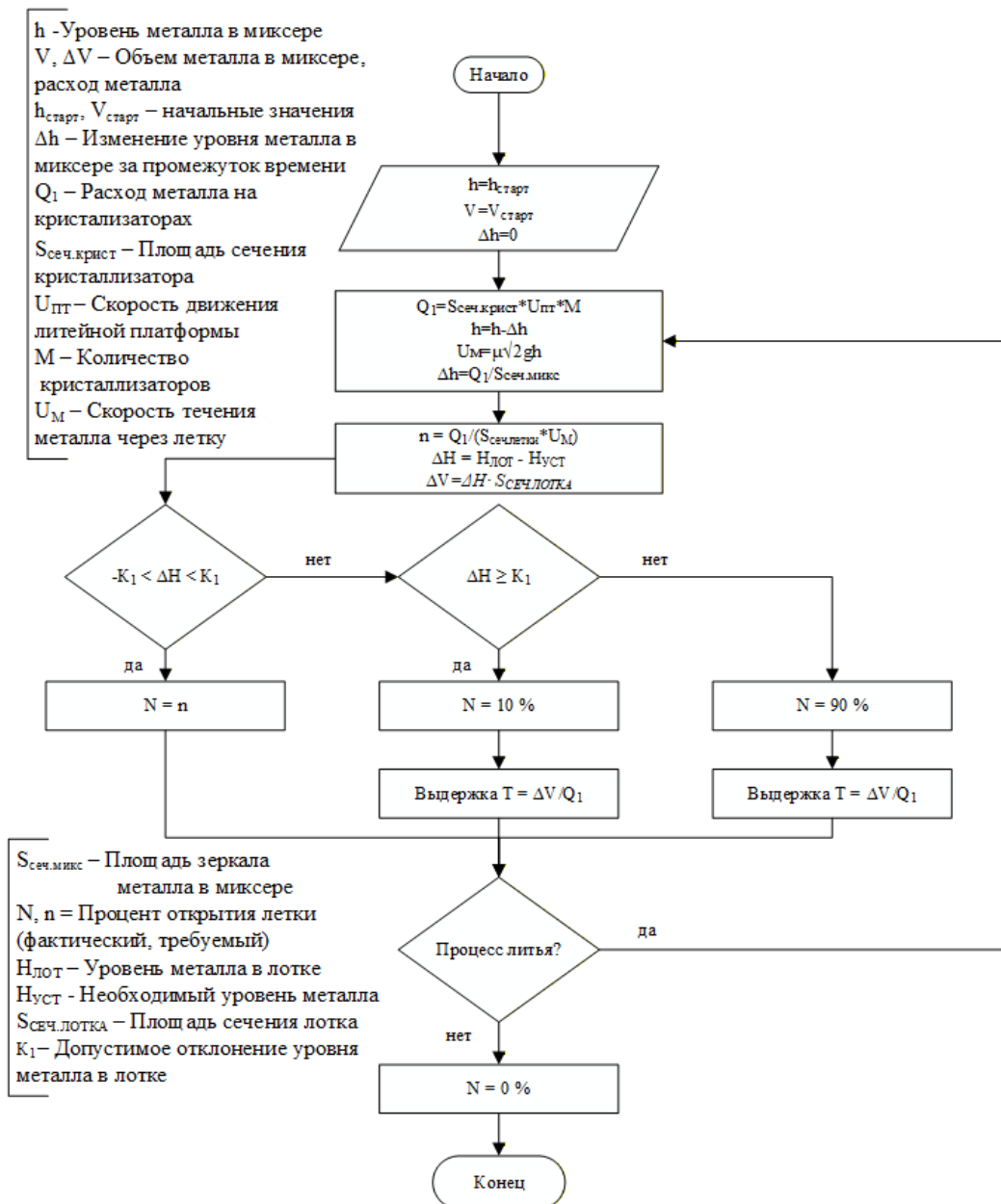


Рисунок 7 – Алгоритм расчета процента открытия летки стационарного миксера

Рассмотрим комплексный алгоритм управления литейным агрегатом, включающий расчет и контроль основных критериев качества и безопасности процесса, и корректировку управляющих воздействий при обнаружении отклонений (рис.8).

Последовательность работы алгоритма:

Шаг 1 – Внесение оператором технологических уставок согласно текущего рецепта (Температура металла, температура воздушной греющей среды в миксере, расход охлаждающей воды, скорость литья, необходимая длина слитков).

Шаг 2 – Измерение текущих технологических параметров процесса посредством КИП.

Шаг 3 – Работа блока математического моделирования, состоящий из комплекса отдельных моделей для узлов литейного агрегата. Рассчитываем необходимый процент открытия летки миксера для обеспечения необходимого расхода металла с учетом скорости литья представленный на рисунке 7. Расчет температуры металла на протяжении металлотректа рассчитываем по формуле 4.

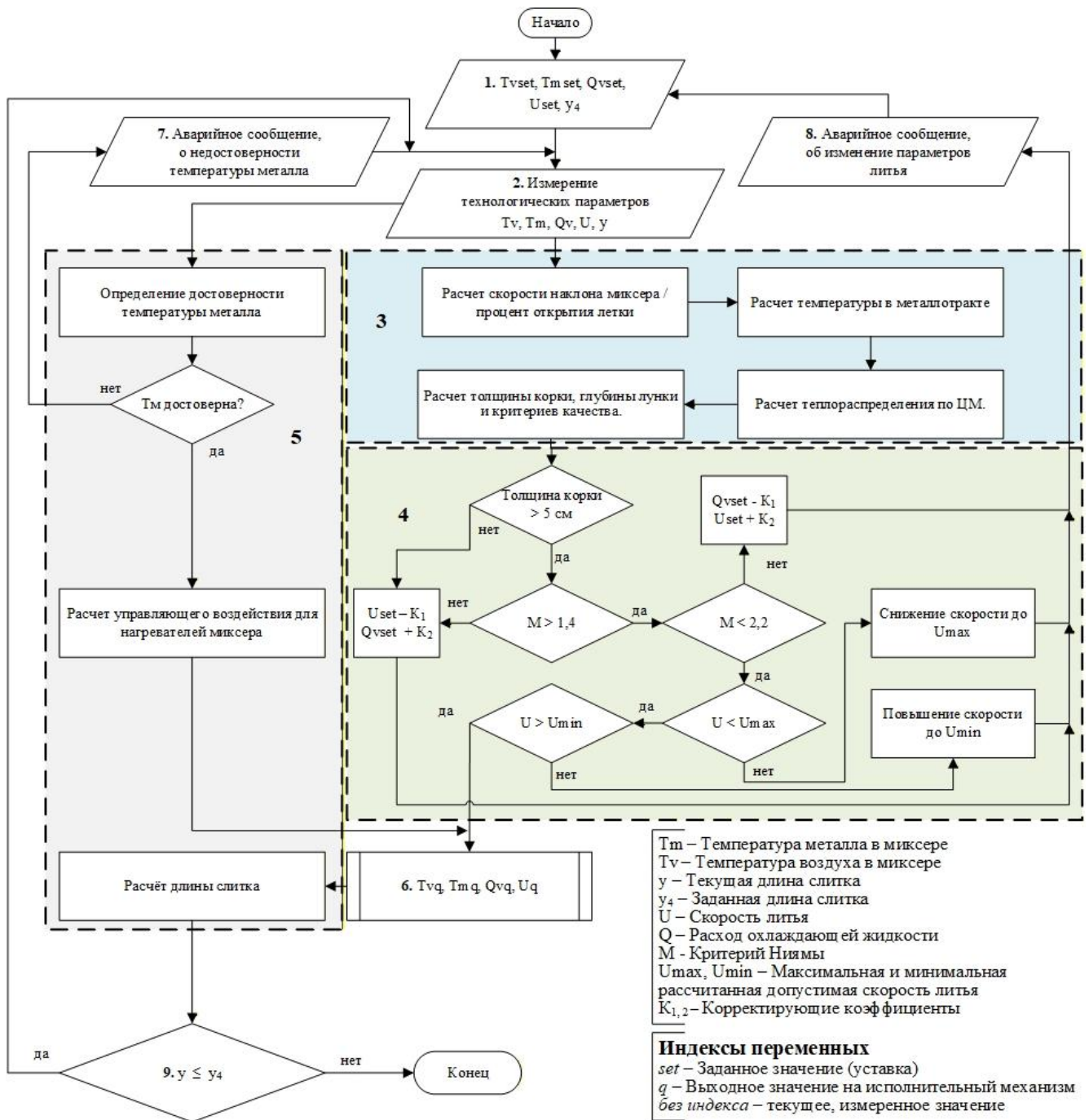


Рисунок 8 – Алгоритм управления литейным агрегатом на основе цифровой модели

Согласно ранее представленному расчетному алгоритму на рисунке 5, производим расчет распределения температуры по высоте и ширине слитка в 4 областях. Дополнительно при расчете распределения температуры в области II в момент времени t_2 определяем толщину корковой зоны.

Рассчитываем критерий Ниямы (M), характеризующий дефект отливок. Критерий является отношением модуля температурного градиента и скорости охлаждения слитка (21).

$$M = \frac{G}{\sqrt{L}}, \frac{^{\circ}\text{C}^{0.5} \cdot \text{с}^{0.5}}{\text{мм}} \quad (21)$$

Модуль температурного градиента рассчитываем следующим образом:

$$G = \sqrt{\left(\frac{T_{X/4} - T_{X/2}}{X/2 - X/4}\right)^2 + \left(\frac{T_{y_2} - T_{y_3}}{y_3 - y_2}\right)^2}, \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{мм}} \quad (22)$$

Где: $T_{X/4}$, $T_{X/2}$ - температуры металла в точках X/4 и X/2 соответственно; X/2, X/4 - половина и четверть ширины слитка; T_{y_2} , T_{y_3} - средняя температура по слою в точке y_2 и y_3 ; y_2 , y_3 - Координаты окончания II и III области по высоте.

Скорость охлаждения слитка запишется:

$$L = \left| \frac{T_{y_2} - T_{y_3}}{t_3} \right|, \frac{C}{сек} \quad (23)$$

Где t_3 – Время нахождения металла в III области.

Рассчитываем скорость литья, обеспечивающую отсутствие холодных и горячих трещин.

Шаг 4. Блок контроля критериев качества и безопасности процесса, корректировка управляющих воздействий.

Если толщина корковой зоны менее 5 см (присутствует риск деформации стенки слитка и пролива металла), вводим корректировки в управляющие воздействия - увеличение расхода охлаждающей жидкости, снижение скорости литья. Вывод аварийного сообщения на панель оператора.

Если критерий Ниямы менее 1,4 (присутствует риск усадочных дефектов и пористости, неравномерная структура слитка), вводим корректировки в управляющие воздействия – увеличение расхода охлаждающей жидкости и уменьшение скорости литья. Если критерий Ниямы более 2,2 (присутствует риск термических напряжений и поверхностных трещин), вводим корректировки в управляющие воздействия – уменьшение расхода охлаждающей жидкости и увеличение скорости литья.

Если фактическая скорость U более U_{max} (присутствует риск образования горячих трещин), вводим корректировки в управляющие воздействия – снижение скорости литья до U_{max} . Если фактическая скорость U менее U_{min} (присутствует риск образования холодных трещин), вводим корректировки в управляющие воздействия – увеличение скорости литья до U_{min} .

Шаг 5. Дополнительный блок контроля важных технологических параметров, исходя из практического опыта. Производим определение достоверности температуры металла в миксере и производим расчет длины слитка согласно разработанных алгоритмов, упомянутых ранее.

Шаг 6. Происходит формирование управляющих воздействий для исполнительных механизмов, с учетом внесенных поправок, сформированных на 4 шаге.

Шаги 7, 8 отвечают за формирование аварийных сообщений в случае фиксации отклонений на предыдущих шагах.

Шаг 9. Если длина слитка не достигла заданного значения, возвращаемся к шагу 2, если достигла – завершаем литье.

Разработанный алгоритм обеспечивает скоординированное функционирование всех компонентов агрегата за счет реализации единой управляющей стратегии, основанной на обмене данными в реальном времени и использовании сквозной цифровой модели.

Четвертая глава посвящена разработке и тестированию цифровой модели литейной машины для повышения качества и безопасности процесса. Цифровая модель состоит из следующих функциональных блоков (рисунок 9):

1. Основной интерфейс пользователя, ввод/вывод данных;
2. Модуль подготовки данных;
3. Вычислительный модуль температур по высоте слитка;
4. Вычислительный модуль температур по ширине слитка;
5. Графический модуль – Визуализация, построение графиков;
6. Модуль расчёта критериев качества и безопасности технологического процесса.

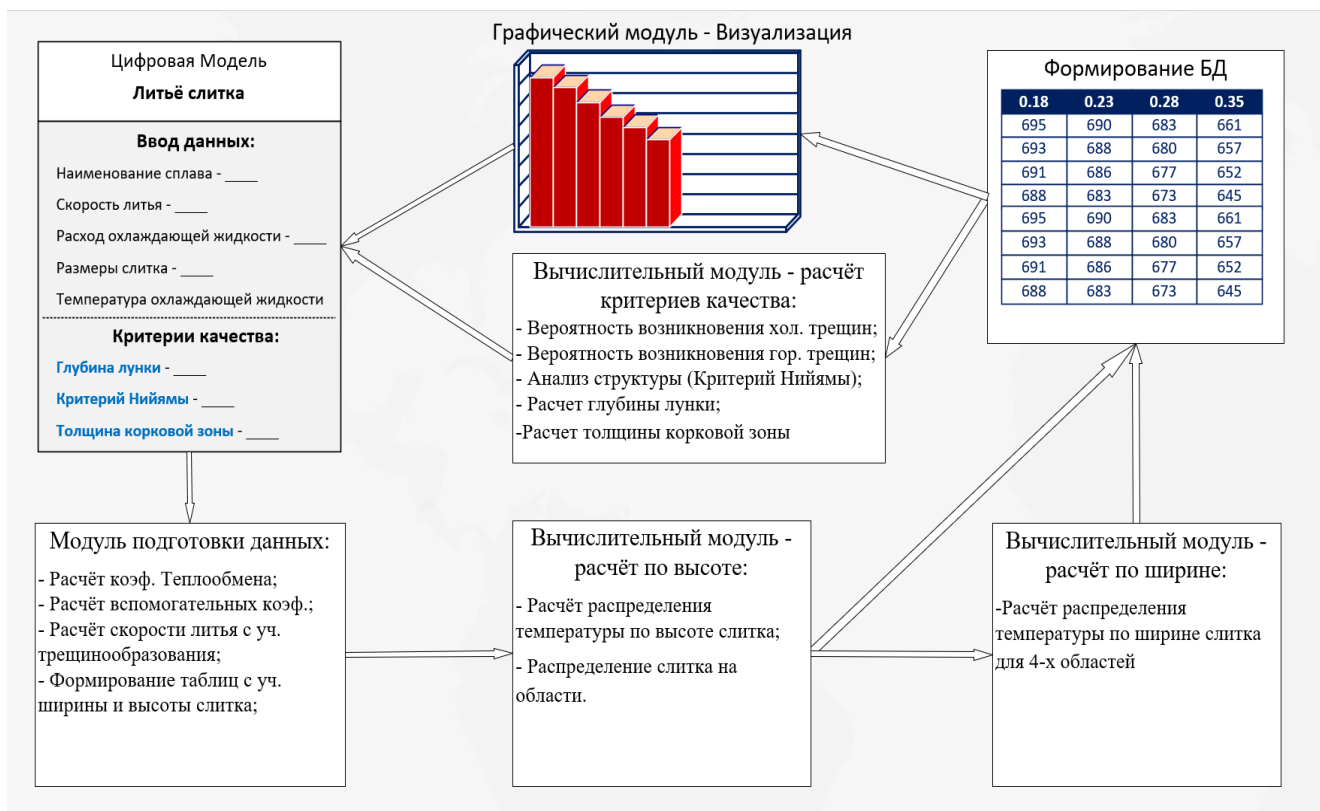


Рисунок 9 – Структурная схема цифровой модели вертикального литья алюминиевых плоских слитков

Интерфейс пользователя (рисунок 10) имеет четкую структуру и состоит из нескольких функциональных областей. Блок ввода данных предназначен для задания технологических параметров, характеристик алюминиевого сплава и геометрических свойств слитка. Управление вычислительным процессом, таким как запуск расчета и вывод результатов, осуществляется с помощью специальных элементов управления.

Результаты моделирования визуализируются в двух проекциях — вертикальной и горизонтальной. Распределение температуры по высоте слитка отображается в виде таблицы и на графике, что позволяет наглядно оценить среднюю температуру каждого слоя. Толщина этих слоев определяется параметром Δu (шагом разбиения по высоте). Анализ температурного поля по ширине выполняется отдельно для четырех различных областей слитка, причем для каждой зоны данные представлены как в табличной, так и в графической форме.

В отдельном диалоговом окне система отображает рассчитанные критерии качества и безопасности, позволяя пользователю сделать комплексную оценку технологического процесса.

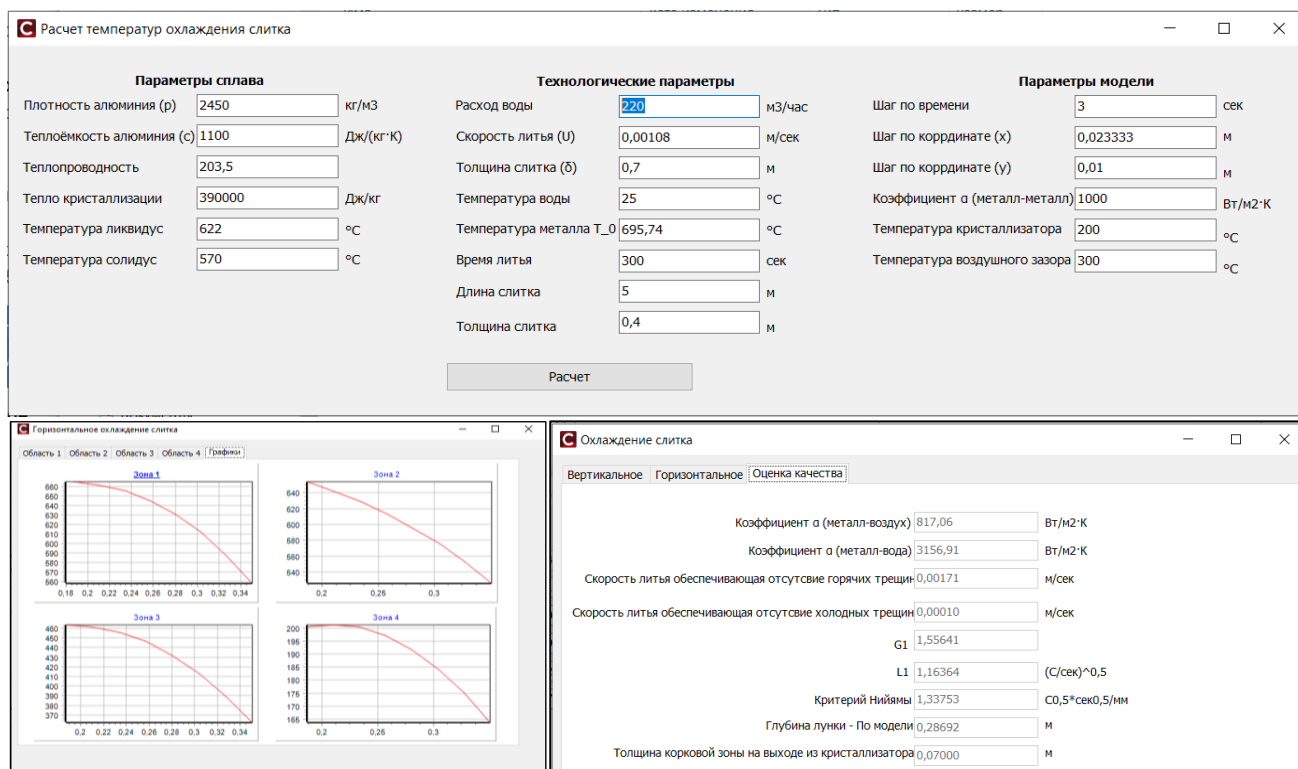


Рисунок 10 – Интерфейс программы.

На примере моделирования литья слитка для сплава AlMg5 (1580) получены следующие расчеты критериев качества и безопасности технологического процесса – таблица 1.

Таблица 1 – Результаты моделирования различных режимов литья

Критерий/ режим литья	Режим 1	Режим 2	Режим 3
	Скорость литья – 60 Расход воды- 250	Скорость литья – 80 Расход воды- 250	Скорость литья – 60 Расход воды- 220
Глубина лунки, мм	368	436	388
Толщина корковой зоны на вых. 2 зоны, мм	27	0	0
Критерий Ниямы	1,55	1,28	1,52
Коэффициент теплообмена, зона 2, Вт/м ² ·К	885,4	885,4	809,38
Коэффициент теплообмена, зона 3, Вт/м ² ·К	3421,3	3421,3	3088,7
Модуль температурного градиента;	1,777	1,442	1,688
Скорость охлаждения слитка;	1,554	1,123	1,107

Видно, что технологические параметры режима 2 и 3 не обеспечивают достаточную толщину корковой зоны слитка при выходе его из кристаллизатора, что может привести с большой вероятностью к прорыву металла. Также во втором режиме критерий Ниямы равен 1,28, что является ниже минимального предельного значения (1,4) – говорит о высокой вероятности образования пористости структуры слитка.

Таким образом, продемонстрирована работоспособность и применимость разработанной цифровой модели процесса литья алюминиевых слитков в промышленно значимых условиях. Модель была протестирована на нескольких различных рецептурах литья. Подтверждена способность цифровой модели выявлять критические отклонения технологических параметров и прогнозировать их влияние на качество слитка. Модель эффективно идентифицировала:

- Отклонения в формировании температурных полей и градиентов, ведущие к риску возникновения дефектов структуры слитка.

- Недостаточную толщину корковой зоны слитка на выходе из кристаллизатора, ведет к возможности прорыва металла и образования взрыва.

На основании проведенных исследований, предлагаем следующую структуру управления литейным агрегатом с использованием цифровой модели вертикального литья алюминиевых плоских слитков - рисунок 11.

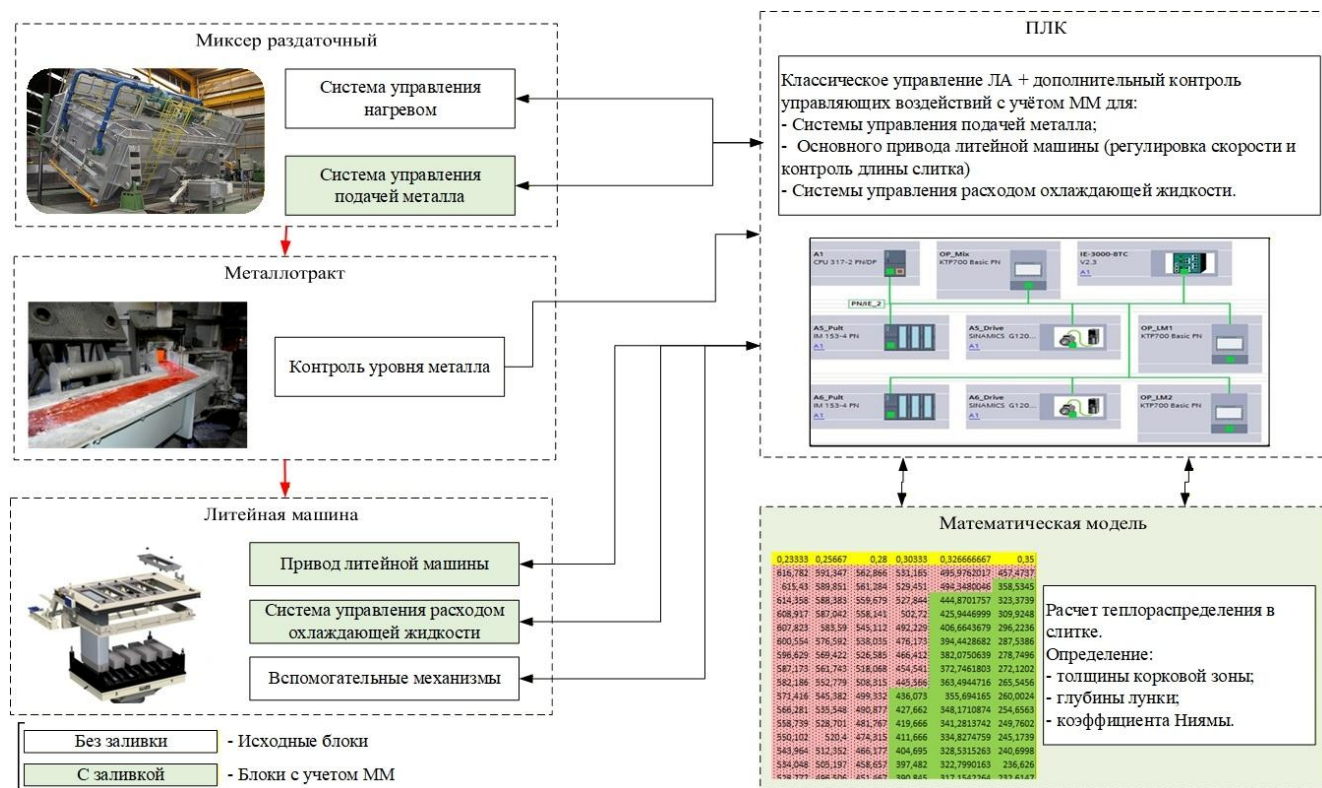


Рисунок 11 – Схема управления ЛА на основе цифровой модели.

В отличие от традиционной системы управления подача металла в металлотракт осуществляется не вручную, а на основании представленных выше алгоритмов. Управление приводом литейной машины для изменения скорости литья и определения момента остановки осуществляется на основании расчетов распределения температур в слитке и длины слитка. Расход охлаждающей жидкости может быть также изменен при неблагоприятных прогнозах качества слитка и толщины корковой зоны.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Выполнен анализ существующего технического обеспечения литейных агрегатов полунепрерывного литья слитков, технологии производства алюминиевых слитков, существующих зарубежных и отечественных систем управления. Определена зависимость между критериями качества, безопасности процесса и технологическими параметрами.

Разработана и верифицирована детализированная математическая модель процесса полунепрерывного литья алюминиевых слитков. Модель адекватно описывает ключевые термодинамические процессы при формировании и литье слитка, включая формирование необходимой корковой зоны, теплоперенос; прогнозирует скорость и температуру металла в разных точках литейного агрегата и температуры формирующегося слитка. Разработаны разностные схемы для составляющих модели и алгоритм расчета имитационной модели в целом. Получены положительные результаты проверки адекватности моделей путем сравнения результатов с натурными измерениями и эталонным моделированием в ПО ProCast.

Разработана методика расчета коэффициента теплообмена для различных областей охлаждения слитка, с учетом изменения расхода охлаждающей жидкости. Методика

интегрирована в цифровую модель, для более точного расчета температуры слитка, толщины корковой зоны, глубины лунки и других параметров при изменении режимов литья.

На основании анализа работы литейного агрегата и разработанных собственных математических моделей отдельных процессов агрегата, разработаны специализированные алгоритмы управления (поворотный миксер, металлотракт, литейная машина). Внедрение этих алгоритмов улучшило качество продукции и безопасность процесса литья.

В результате внедрения алгоритма измерения и расчета длины слитка на тросовых литейных машинах удалось достичь снижения погрешности измерения длины слитка с 66,1 мм до 6,7 мм.

В результате внедрения алгоритма контроля достоверности показаний температуры металла в миксере исключены ошибочные действия персонала, в некоторых случаях предупреждены возможные прорывы металла. За 2024 год автоматически выявлено 11 случаев нарушения технологического процесса, в том числе 2 из них повышенной опасности, с потенциальным выбросом металла.

Разработана цифровая модель процесса литья алюминиевого слитка, интегрирующая комплекс математических моделей для расчета критериев качества процесса. Расчетами подтверждена способность цифровой модели выявлять критические отклонения технологических параметров и прогнозировать их влияние на качество слитка. Продемонстрировано, что модель служит эффективным инструментом для анализа. Она позволяет прогнозировать последствия изменения параметров (скорость литья, расход воды, температура расплава и т.д.) для конкретной рецептуры до проведения реальной плавки, минимизируя риски брака и затраты на натурные измерения. Справка о возможности использования подтверждает необходимость этой разработки для производства.

Разработан комплексный алгоритм управления для литейного агрегата, с корректирующими воздействиями на управляющие сигналы на основе прогнозирования возникновения дефектов и для минимизации прорывов металла.

Достигнутый уровень интеграции позволяет перейти от локально эффективного управления узлами к глобально оптимизированному управлению всем технологическим процессом литья. Это обеспечивает принципиально новые возможности по повышению стабильности, качества и экономической эффективности работы агрегата, что подтверждает научную новизну и практическую значимость диссертационного исследования.

Полученные результаты создают основу для дальнейшего развития систем автоматизированного управления литейными машинами полунепрерывного литья, включая разработку алгоритмов предиктивного управления, оптимизацию под новые сплавы и форматы слитков, а также интеграцию в системы управления более высокого уровня (MES).

Перспективой дальнейшей работы является возможность внедрения цифровой модели в АСУТП литейного агрегата. Полученный опыт станет основой для масштабирования решения на другие аналогичные агрегаты цветной металлургии, включая машины для литья круглых слитков.

Реализация данного подхода на производстве позволит существенно повысить выход годной продукции, стабильность технологического процесса и промышленную безопасность за счет заблаговременного предотвращения брака и аварийных ситуаций.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и входящих в «Белый список»:

1. Новиков В.А. Расчет коэффициентов теплообмена с учетом изменения расхода охлаждающей воды для моделирования процесса полунепрерывного литья. / Новиков В.А., Пискажова Т.В., Тинькова С.М.// Известия Тульского государственного университета технические науки. 2025 Выпуск №8. С. 112-119. (ВАК К2 по специальности 2.3.3)

2. Новиков В.А. Управление литейным агрегатом на основе цифровой модели / Новиков В. А., Пискажова Т. В. / Мехатроника, автоматизация, управление. 2026; Том 27, №6, С 292-

299. <https://doi.org/10.17587/mau.27.292-299> (ВАК К1 по специальности 2.3.3, уровень 2 Белого списка)

3. Новиков В.А. Математическое моделирование процесса литья плоских слитков для решения задач автоматизации / Новиков В. А., Пискажова Т. В., Донцова Т. В., Белолипецкий В. М. // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2024. – Том 25, №1, С 144-156 (ВАК К2, уровень 2 Белого списка)

4. Новиков В.А. Решение некоторых проблем автоматизации при управлении литейной машиной / Новиков В.А., Пискажова Т.В., Донцова Т.В.// Технология металлов. 2023. №9. С. 38-48. DOI: 10.31044/1684-2499-2023-0-9-38-48 (Уровень 2 Белого списка)

Публикации в SCOPUS

5. Novikov, V.A., Polyakova, A.D., Piskazhova, T.V., Dontsova, T.V. (2026). The Digital Model “Ingot Casting”. In: Radionov, A.A., Gasiyarov, V.R. (eds) Advances in Automation VII. RusAutoCon 2025. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 1521. pp 170–180. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-14742-4_15

Разработка, зарегистрированная в Реестре программ для ЭВМ РФ:

6. Новиков В.А., Полякова А.Д., Пискажова Т.В. Цифровая модель вертикального литья алюминиевых плоских слитков. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025687610, 15.10.2025. Заявка № 2025687116 от 10.10.2025

Прочие публикации по теме диссертации:

7. Новиков, В. А. Совершенствование системы управления литейным агрегатом по производству плоских алюминиевых слитков. Проспект Свободный – 2022; Материалы XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых Красноярск, 25–30 апреля 2022 г. . – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2022. – С. 139-142.

8. Новиков, В. А. Возможности повышения безопасности процесса полунепрерывного литья алюминиевых слитков за счет внедрения цифровой модели. Современные инновации, системы и технологии - Modern Innovations, Systems and Technologies, 6(1), 2026. 3069–3077. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2026-6-1-3069-3077>

9. Новиков, В. А. Автоматизация подачи металла в литейных комплексах / В. А. Новиков // Проспект Свободный – 2023 : Материалы XIX Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Красноярск, 24–29 апреля 2023 года. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2023. – С. 348-350. – EDN WKJUUS.

10. Novikov V.A., Automation of metal feeding in casting complexes. / Novikov V.A., Piskazhova T.V., Dontsova T.V., Yakivvyuk P.N.// VIII International Scientific Conference – Summer Session «INDUSTRY 4.0»: VARNA сборник научных трудов – Болгария, 2023 – С 85-89, ISSN (Print) - 2535-0153.

11. Новиков, В. А. Моделирование полунепрерывного литья плоского слитка в Procast / В. А. Новиков // Проспект Свободный - 2024 : Материалы юбилейной XX Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 4-х частях, Красноярск, 15–20 апреля 2024 года. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2024. – С. 259-262. – EDN EETKOB.. 2024 г.

12. Новиков В.А. Цифровое решение повысило надежность литейного производства заказчика / Новиков В.А. / Корпоративный журнал "Вестник ИСО", 2026, №5. С 4-5.