

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



НОВИКОВ ВИКТОР АНДРЕЕВИЧ

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

2.3.3 - Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Пискажова Татьяна Валериевна

Красноярск 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУНЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ И ПУТЕЙ РЕШЕНИЯ	11
1.1 Общие сведения о получении алюминиевых слитков	11
1.2. Обзор вертикальных литейных машин.	15
1.3. Метод полунепрерывного литья.....	24
1.4. Анализ существующих систем управления литейными агрегатами	27
1.5. Литейный агрегат как объект автоматизации	32
1.6. Показатели качества процесса полунепрерывного литья	34
1.7. Цифровые двойники для процессов и агрегатов	42
Выводы по главе 1	49
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИТЬЯ ПЛОСКИХ СЛИТКОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АВТОМАТИЗАЦИИ.....	51
2.1. Обзор существующего программного обеспечения для моделирования литейных процессов.....	51
2.2. Моделирование литья плоских слитков в ProCast.....	56
2.3 Разработка моделей составляющих литейного агрегата.....	60
2.3.1 Подача металла из миксера в металлотракт.....	60
2.3.2 Модель охлаждения металла при движении по металлотрактору.....	66
2.3.3 Комплекс моделей для расчета непрерывного литья слитка	69
2.3.4 Разностные схемы для расчета температуры слитка	75
2.4 Расчет коэффициентов теплообмена для различных областей слитка.....	76
2.5 Расчетный алгоритм для модели литейной машины.....	84
2.6 Тестовые расчеты температуры слитка заданной длины.....	86
Выводы по главе 2.....	96
ГЛАВА 3. АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛИТЕЙНЫМ АГРЕГАТОМ	99
3.1 Контроль температуры металла в миксере.....	99
3.2 Контроль длины слитка на тросовых литейных машинах.....	106
3.2.1 Расчет смещения троса при накручивании на барабан.....	108
3.2.3 Алгоритм расчета длины слитка	109
3.3 Алгоритмы управления подачей металла из миксера в металлотракт	113
3.3.1 Стационарный миксер	113

3.3.2 Поворотный миксер	115
3.4 Алгоритм управления работой литейной машины.....	116
3.5 Комплексный алгоритм управления литейным агрегатом.....	119
Выводы по главе 3.....	122
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ЛИТЕЙНОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЦЕССА	124
4.1 Структура и интерфейс программного обеспечения «Цифровая модель вертикального литья алюминиевых плоских слитков».....	125
4.2 Применение модели для анализа качества слитков и прогнозирования безопасности процесса.....	132
4.3 Новый подход к управлению литейным агрегатом на основе цифровой модели литейной машины и моделей миксера и металлотракта.....	135
Выводы по главе 4.....	138
Заключение	139
Список использованной литературы.....	142
ПРИЛОЖЕНИЕ А	155
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	156
ПРИЛОЖЕНИЕ В	157
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	158

ВВЕДЕНИЕ

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 натуральных 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 обеспечения (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. Tveit and A. Håkonsen разработан цифровой двойник, предназначенный для моделирования заполнения металлотракта литейного агрегата и первичного заполнения кристаллизаторов, компания «Hucast» 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 металлотракт, 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 (Приложение А).

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 (Приложение Б).

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 «Перспектив 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 (Приложение Б).

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 (Приложение В).

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 (Приложение Г).

Личный вклад автора. Постановка задачи и вывод некоторых первоначальных уравнений осуществлялся совместно с руководителем, все остальные работы – составление разностных схем и методик расчетов, учет управляющих воздействий, разработка цифровой модели, выполнение всех расчетов, создание и внедрение алгоритмов управления выполнены 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.

ГЛАВА 1. ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУНЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ И ПУТЕЙ РЕШЕНИЯ

Первая глава настоящей диссертационной работы посвящена всестороннему анализу технологии полунепрерывного литья (ПНЛ) алюминиевых слитков, являющейся ключевым и высокоответственным переделом в алюминиевой промышленности. Актуальность исследования обусловлена критической важностью данного процесса для множества секторов экономики, где качество и стабильность свойств алюминиевых деформируемых полуфабрикатов напрямую зависят от совершенства технологии литья.

Целью данной главы является систематизация современных знаний о процессе ПНЛ, выявление узких мест и нерешенных проблем в области автоматизации, а также обоснование путей их решения на основе передовых цифровых технологий.

Проведенный в главе анализ служит фундаментальной основой для последующих исследований. Он недвусмысленно показывает, что, несмотря на высокую степень оснащенности современного литейного оборудования средствами контроля и регулирования, существующие системы управления не в полной мере используют потенциал для предотвращения брака и оптимизации процесса в реальном времени. Выявленный разрыв между текущим уровнем автоматизации и потребностями промышленности в интеллектуальном, прогностическом управлении обуславливает необходимость разработки и внедрения цифровых двойников литейного агрегата, что и является центральной темой данной диссертационной работы.

1.1 Общие сведения о получении алюминиевых слитков

Алюминиевое производство представляет собой высокотехнологичную, энергоемкую отрасль, критически важную для множества секторов экономики, включая транспортное машиностроение, строительство, упаковочную, электротехническую и оборонную промышленности. Понимание каждой стадии

технологической цепочки позволяет оценить эффективность текущих процессов и выявить потенциал для их оптимизации и повышения устойчивости.

Технологическая цепочка производства алюминия начинается с извлечения и подготовки сырья — бокситов, которые затем перерабатываются в глинозём (окись алюминия). Этот этап отмечается высоким уровнем потребления энергии и важностью использования экологически дружественных технологий и, как правило, реализуется независимо от дальнейшей цепочки производства алюминия. Комбинаты по производству глинозёма располагают вблизи месторождений необходимого сырья [1].

Дальнейший процесс производства сырца алюминия, выпивки и получения слитков из алюминиевых сплавов различной формы происходит в рамках алюминиевого завода. Алюминий сырец получается путем восстановления алюминия из окиси в специальной электролитической ванне. Данный процесс требует значительных затрат электроэнергии и современных технологий управления, направленных на снижение энергетических потерь и минимизацию выбросов.

По мере готовности алюминия сырца в процессе электролиза производят выливку расплавленного металла из электролизера в специализированные вакуум-транспортные ковши (рис. 1.1).

Производство первичного алюминия

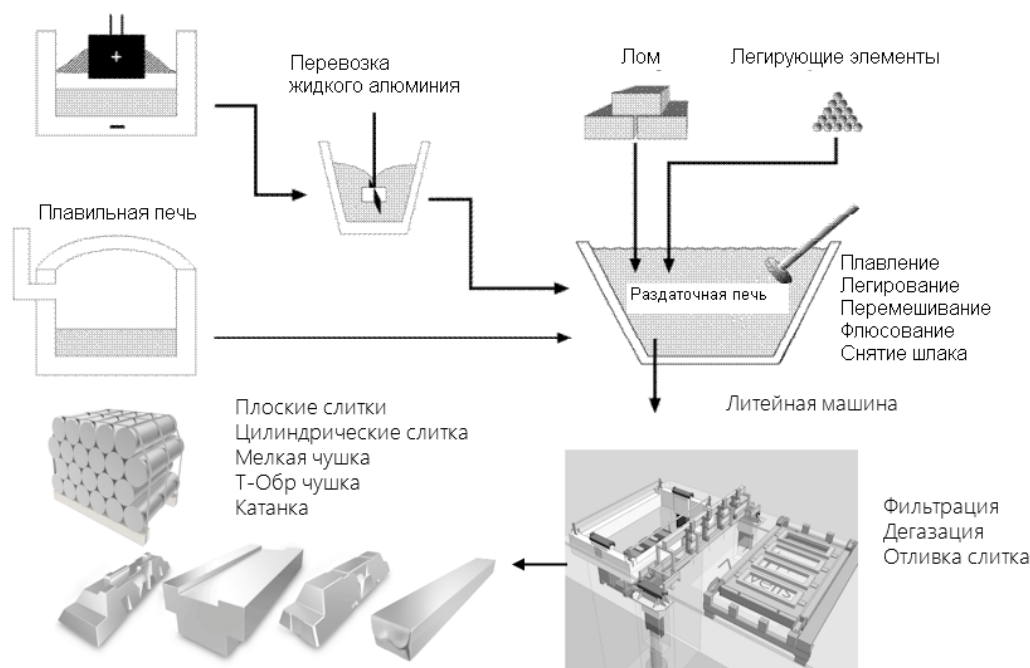


Рисунок 1.1– Схема производства алюминиевых слитков [2].

Заполненные расплавленным металлом вакуум-транспортные ковши перемещают в литейное отделение. Проводят операции по отбору проб, снятию шлака, технологическому отстаиванию. Также производится взвешивание наполненного ковша на въезде в литейное отделение и опустошённого на выезде, с целью контроля веса поступившего металла.

В литейном отделении производят выливку металла из ковшей в литейные миксера (позиция 1 на рис.1.2), для дальнейшего приготовления необходимого сплава. В миксере проводят операции по рафинированию и легированию сплава, снятию шлака с поверхности металла, отбор проб, достижению необходимой для литья температуры.

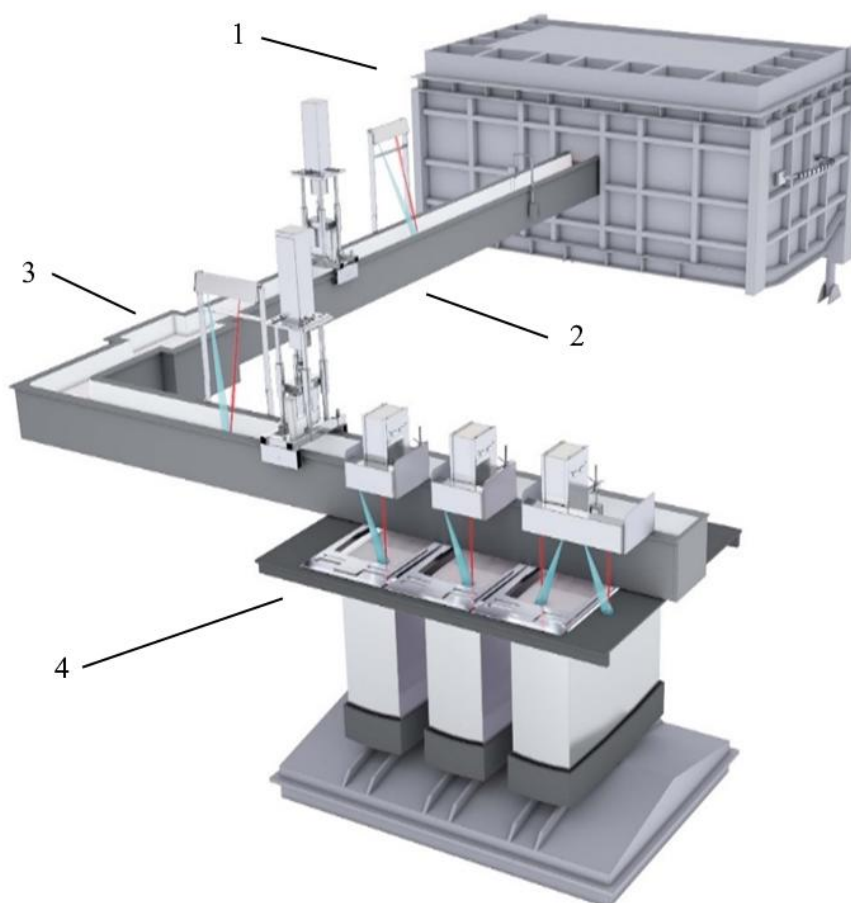


Рисунок 1.2 – Литейный агрегат: 1 – Миксер; 2 – Металлотракт; 3 – Пенокерамический фильтр; 4 – Литейная машина. [3]

Далее металл через металлотракт металл поступает в литейную машину, в которой происходит охлаждение и кристаллизация металла, формируются слитки требуемой формы. В процессе производства алюминиевых слитков металл из жидкого состояния в твердое переходит вследствие кристаллизации в водоохлаждаемой форме. Важно получить металл в твердом состоянии, с отсутствием дефектов, однородный по составу и обладающий определёнными и одинаковыми по всему объёму слитка механическими и физическими свойствами [4].

1.2. Обзор вертикальных литейных машин.

Литейный агрегат, как правило, состоит из двух миксеров (накопительный и раздаточный) и двух литейных машин [5].

Электрические отражательные печи (миксер) предназначены для приготовления расплава, поддержания его заданной температуры и подачи расплава на литейную машину. В производстве плоских слитков используют миксер или каскад из двух миксеров, установленных на разных уровнях. Миксера верхнего уровня используют как миксера-копильники, миксера нижнего уровня – как раздаточные.

Технологический процесс литья слитков методом полунепрерывного литья может осуществляться на тросовых либо гидравлических литейных машинах. Литейные машины предназначены для фиксации литейной оснастки, формообразования слитков необходимого сечения и длины.

Тросовые литейные машины

В качестве примера рассмотрим тросовую литейную машину ПНЛ-20 [6], основные характеристики приведены в таблице 1.1.

Литейная машина представляет собой механизм полунепрерывного литья вертикального типа с тросовым приводом перемещения литейной платформы по направляющим, расположенным в кессоне. Металл из раздаточного миксера поступает в распределительную литейную коробку, из нее в кристаллизатор. Донная часть слитка опирается на поддон, установленный на литейной платформе, и при движении платформы вниз по направляющим происходит отливка слитка.

Привод литейной машины установлен в приямок под площадкой обслуживания, состоит из двух редукторов (главного и комбинированного), двух электродвигателей (холостого и рабочего хода), рамы. Привод предназначен для обеспечения вертикального перемещения платформы по направляющим в режиме холостого и рабочего хода. Ход литейной платформы ограничен конечными выключателями.

Полиспаст предназначен для преобразования вращательного движения барабана привода в вертикальное поступательное движение платформы. Полиспаст состоит из стального каната с обводными блоками, размещенными на металлоконструкциях кессона и литейной платформы.

Платформа литейной машины представляет собой пространственную раму с роликами. Платформа служит для установки поддонов и поддержания слитков в процессе полунепрерывного литья.

Направляющие рельсы установлены в углах кессона и закреплены с помощью специальных пластин и обеспечивают перемещение платформы строго по вертикали во избежание кривизны отливаемых слитков.

Кессон представляет собой проем прямоугольного сечения глубиной 9 метров. Стенки кессона бетонные, обшитые стальным листом с ребрами жесткости, к которым крепятся направляющие. Для обеспечения обслуживания и ремонта кессон имеет площадки и лестницу.

Таблица 1.1 - Технические характеристики литейной машины ПНЛ-20 [7].

Параметры	Единицы измерения	Значение
Привод машины	-	тросовый
Грузоподъемность	т	20
Максимальная длина слитка	мм	6500
Скорость литья (рабочая)	мм/мин	8-220
Максимальное сечение слитка	мм	600-1650
Расход охлаждающей воды	м ³ /час	300
Мощность привода:		
Рабочего хода	кВт	2,0
Холостого хода	кВт	22

Основные узлы литейных машин представлены на рисунке 1.3 [7]:

- Платформа литейной машины с поддонами;

- Стол литейной машины с коллекторами и кристаллизаторами;
- Гидронасосная станция подъема литейного стола;
- Пневмосистема подъема литейной коробки;
- Система привода литейной машины;
- Кессон литейной машины с направляющими балками;
- Система водоподвода охлаждающей воды с фильтром;
- Дренажная система;
- Площадка обслуживания;
- Пульт управления.

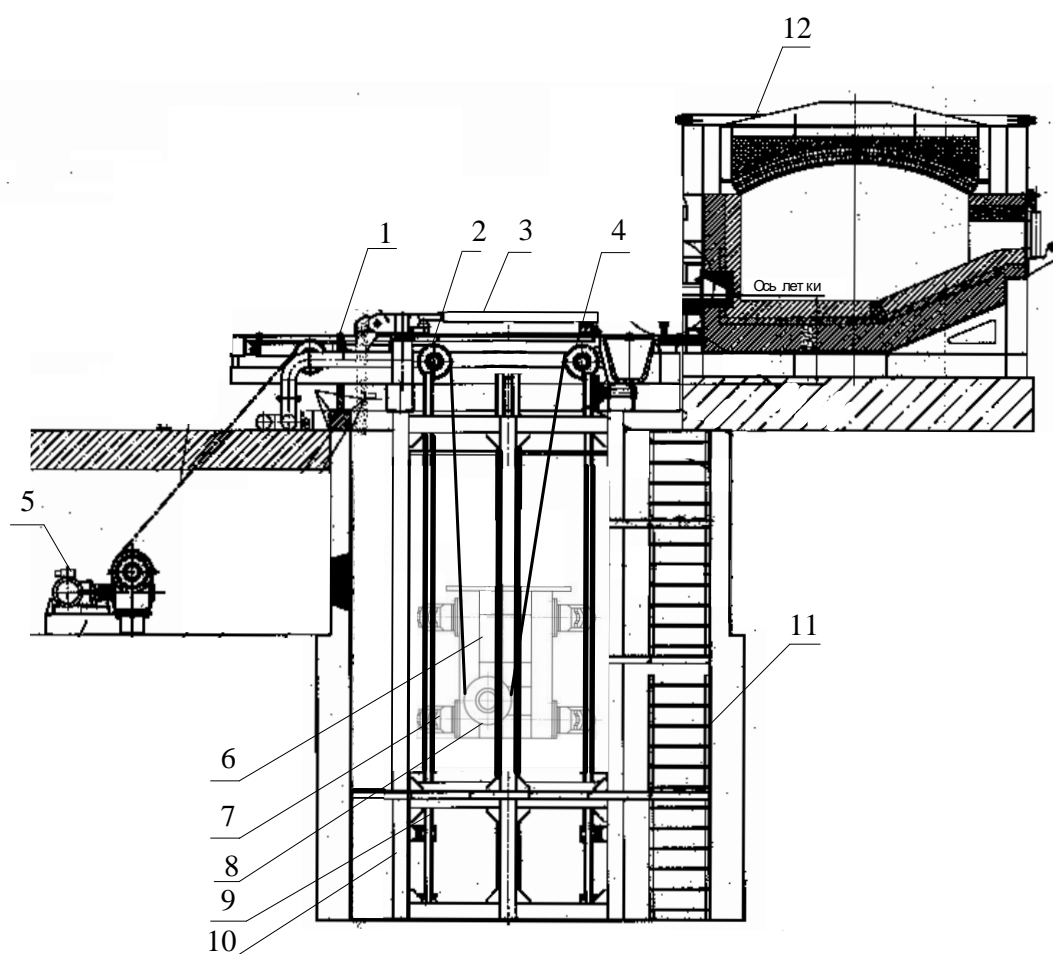


Рисунок 1.3 - Схема литейной машины ПНЛ-20 с раздаточным миксером: 1- Площадка обслуживания; 2-Обводные блоки полиспаста; 3-Стол откидной; 4- Обводные блоки полиспаста; 5-Привод; 6-Платформа; 7-Ролики платформы; 8- Обводные блоки полиспаста; 9-Направляющие рельсы; 10-Кессон; 11-Кессонная лестница; 12-Раздаточный миксер.

Кристаллизатор (формообразователь) – основной элемент оснастки, обеспечивающий форму, размер и качество слитка. Наружная и внутренняя (рабочая) поверхности кристаллизатора не должны иметь заусенцев, вмятин, трещин и механических повреждений [6].

Поддон – служит для формирования донной части слитка и ее фиксации в процессе литья.

Коллектор (охладитель) предназначен для равномерной подачи охлаждающей воды в процессе литья слитков из водоводов к кристаллизаторам. Возможно применение двух видов коллекторов: струйных с круглыми отверстиями в два ряда и щелевых. Вода из струйных коллекторов подается: через верхний ряд (отверстия диаметром 3-4 мм) на кристаллизатор для его охлаждения, через нижний ряд (отверстия диаметром 6-8 мм) на нижнюю кромку кристаллизатора для охлаждения слитка.

В щелевом коллекторе воду на кромку кристаллизатора (для охлаждения слитка) подают через щель между кристаллизатором и коллектором.

Каждая литейная машина оборудована средствами контроля:

- Температуры металла;
- Скорости литья;
- Длины слитка;
- Давление в системе и расхода охлаждающей воды;
- Хода литейной машины (конечные выключатели – «вверх», «вниз»).

На каждой литейной машине установлена звуковая и световая сигнализация для сообщений о следующих событиях:

- Снижения расхода охлаждающей воды;
- Отклонение скорости литья;
- Отклонение температуры расплава в миксере;

Гидравлическая литейная машина (ПНГ-30).

Помимо тросовых литейных машин, существуют литейные машины, работа которых основана на действии гидравлики, рисунок 1.4. Привод платформы в

таким образом представляет из себя гидравлический цилиндр, максимальный ход которого соответствует максимально возможной длине слитка. Такие машины как правило отличаются большей грузоподъемностью и плавностью хода, что даёт возможность отливать слитки повышенного качества. Ниже приведены основные технические характеристики гидравлической литейной машины ПНГ-30, таблица 1.2 [5].

Таблица 1.2 - Технические характеристики литейной машины ПНГ-30.

Параметры	Единицы измерения	Значение
Привод машины	-	Гидравлический
Грузоподъемность	т	30
Максимальная длина слитка	мм	7500
Скорость литья (рабочая)	мм/мин	10-230
Максимальное сечение слитка	мм	700-2500
Максимальный расход воды	м ³ /ч	360
Давление воды	кг/см ²	3-6

Привод литейной машины осуществляет гидравлическая система, в которую входят: маслостанция (бак с гидравлической жидкостью, гидронасос, распределитель), плунжер, трубопроводы. Привод предназначен для обеспечения вертикального перемещения платформы по направляющим в режиме холостого и рабочего хода. Ход литейной платформы ограничен конечными выключателями.

В таком случае для управления скоростью литья и контроля длины слитка гидравлическая станция должна быть оборудована регулирующим клапаном расхода и расходомером гидравлической жидкости.

Платформа литейной машины представляет собой пространственную раму с роликами. В верхней плоскости платформа крепится к плунжеру. Платформа служит для установки поддонов и поддержания слитков в процессе полунепрерывного литья.

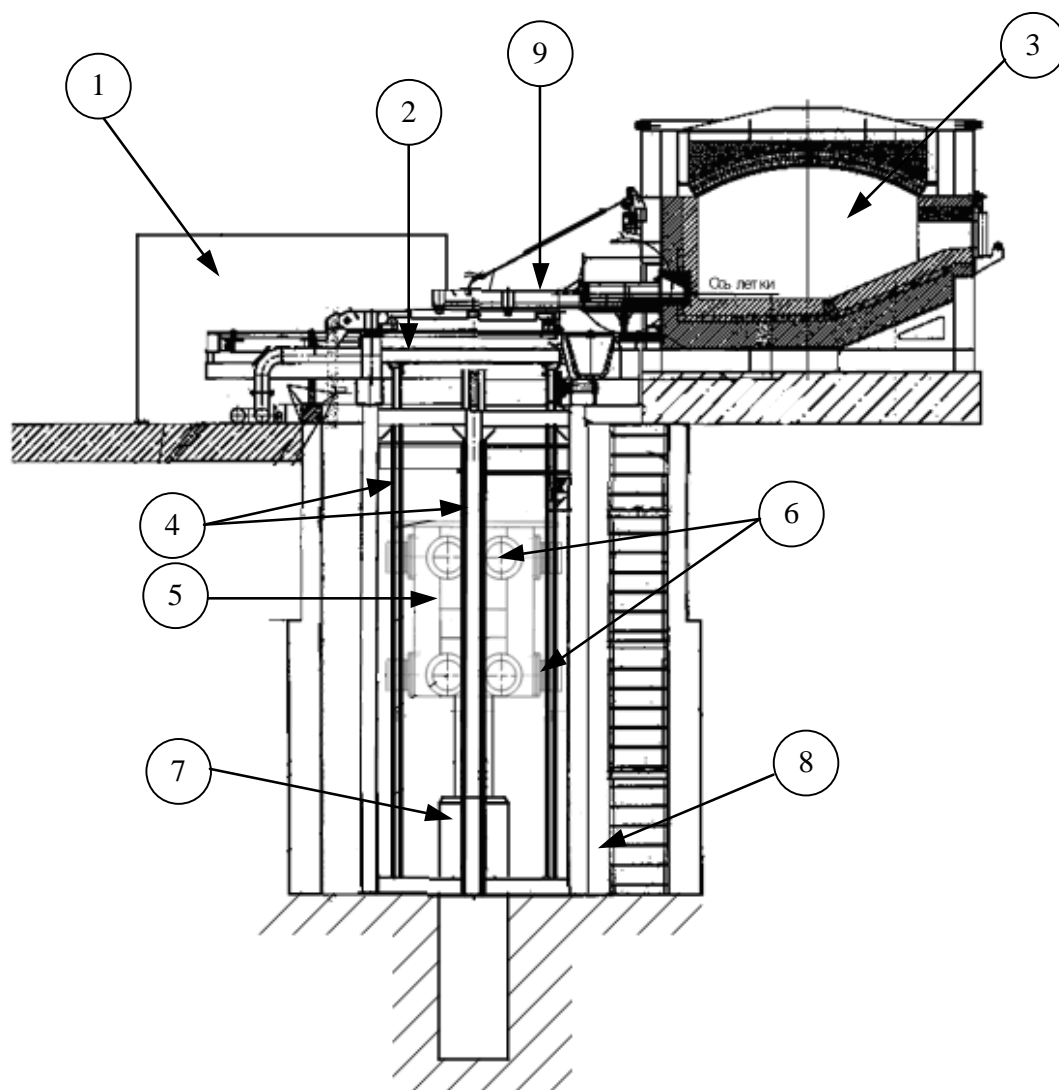


Рисунок 1.4[12] – Схема гидравлической машины полунепрерывного действия:
 1-маслостанция, 2-стол литейный, 3-раздаточный миксер, 4-направляющие
 рельсы, 5-платформа, 6-ролики платформы, 7-плунжер, 8-кессон с лестницей; 9-
 литейная коробка.

Кессон представляет из себя приямок прямоугольного сечения глубиной 11,5 м. Над кессоном, на нулевой отметке, расположена площадка обслуживания литейной машины.

Откидной стол представляет собой прямоугольную раму с патрубками для подвода охлаждающей воды в коллектор, который крепится на столе. Для подъема и опускания стола на литейной машине имеется гидронасосная станция с трубопроводами и двумя гидроцилиндрами.

Система водоподвода охлаждающей воды включает в себя трубопровод Ду-219 и на нем последовательно установлены-затвижка механическая Ду-200, фильтр, клапан регулирующий, затвижка с электроприводом; на гидравлической машине дополнительно установлена затвижка с электроприводом для слива воды из рамы литейного стола. Дренажная система предназначена для откачки воды из кессона и состоит из трубопровода и насосной установки.

Конструкция литейной машины Wagstaff ShurCast предназначена для литья цилиндрических и прокатных слитков. Литейная машина ShurCast состоит из литейного цилиндра одностороннего действия с внутренними направляющими, ограничителя усилия затяжки, монтажного кольца цилиндра и клиньев для выравнивания, точно обработанной стальной плиты и маслостанции. Для обеспечения эксплуатационных параметров все модели цилиндров изготавливаются с жесткими допусками [8].

Автоматизированная система управления измеряет и дозирует гидравлическое масло, выходящее из цилиндра, обеспечивая постоянную и управляемую скорость литья. Так как цилиндр снабжен внутренними направляющими, отпадает необходимость в наладке и ремонте колонн с внешними направляющими и направляющих башмаков.

Шток цилиндра изготовлен из нержавеющей стали, ограничитель усилия затяжки защищает внутренние направляющие цилиндра от повреждений при воздействии вращательной силы на шток цилиндра. Плита цилиндра крепится к верхней части ограничителя и обеспечивает плоскую и устойчивую поверхность для платформы с поддонами.

При эксплуатации литейной машины ShurCast происходит подключение электромагнитного клапана, открывающего тарельчатый клапан. После этого приводятся в действие клапан регулирования подачи гидравлической жидкости и расходомер для измерения массового расхода. Перепад давления, который мог бы стать причиной подъема или падения плиты литейной машины, отсутствует.

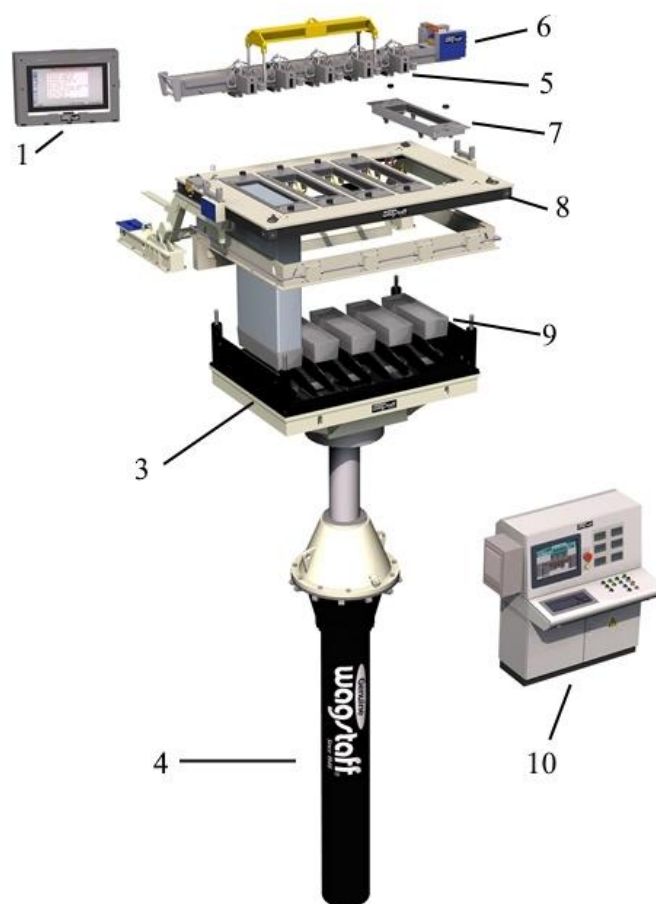


Рисунок 1.5 - Схема литейной системы Wagstaff для прокатных слитков: 1 – информационный дисплей; 2 – поворотный механизм литейного стола; 3 – платформа для поддонов ShurStart; 4 – литейный цилиндр ShurCast; 5 – система лазерного регулирования уровня металла в кристаллизаторе; 6 – распределительный желоб; 7 – кристаллизатор Epsilon; 8 – литейный стол; 9 – поддоны; 10 – пульт управления системы AutoCast [9].

Литейная машина ShurCast [9] может работать до тех пор, пока не прекратится подача охлаждающей воды и металла. Это обеспечивается тем, что цилиндр во время литья работает под действием силы притяжения, а не гидравлических насосов. Гидронасосы в системы Wagstaff используются только при движении литейного цилиндра вверх и для системы поворотного стола. Автоматизированная система управления Wagstaff также отключает гидронасосы после пятиминутного бездействия на пульте управления и при начале литья, продлевая таким образом срок службы насосов.

Скорость литья регулируется с помощью современной гидравлической системы управления, постоянно обеспечивающей плавное и точное опускание плиты цилиндра. Система рециркуляции обеспечивает чистоту масла. Расходомер для измерения массового расхода гидравлической жидкости и регулирующий клапан регулируют скорость литья, что обуславливает постоянство рабочих характеристик.

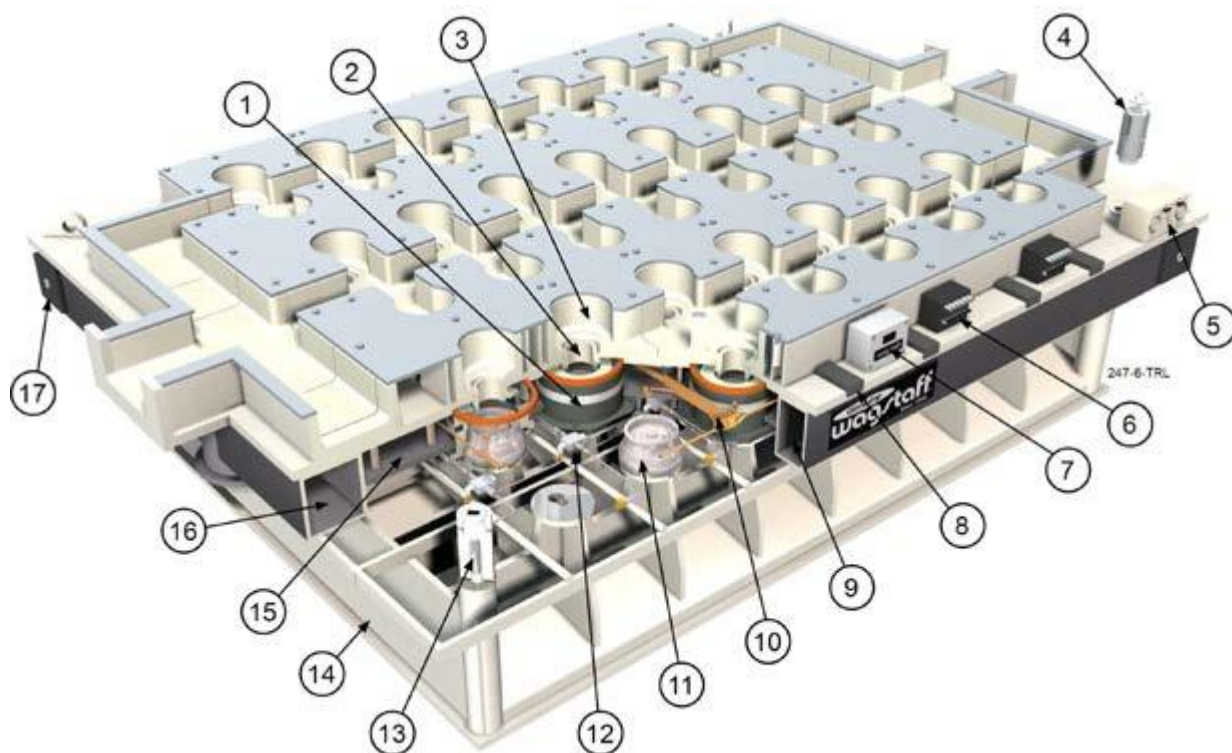


Рисунок 1.6 - Схема литейного стола Wagstaff для производства цилиндрических слитков: 1 – Кристаллизатор; 2 – Верхняя тепловая насадка; 3 – Огнеупор; 4 – Индикатор высоты платформы; 5 – Манометр; 6 – Регуляторы расхода; 7 – Массовый расходомер/Дисплей; 8 – Система обнаружения утечки воды; 9 – Водяной коллектор; 10 – Система подачи газа; 11 – Поддон; 12 – Система подачи масла с инжекторами; 13 – Штифт блочного подъемника; 14 – Платформа; 15 – Нижняя плита; 16 – Люки для чистки.

За один цикл на литейной системе Wagstaff отливается до 160 цилиндрических слитков, диаметром от 80 до 1223 мм. В состав литейной системы Wagstaff с тепловыми насадками для литья цилиндрических слитков входят

литейный стол (рис.1.6) с плотно расположенными кристаллизаторами и платформа для поддонов. Модель платформы для поддонов WagstaffShurStart выбирается в зависимости от размера плиты литейной машины и конфигурации литейной ямы [5].

Кристаллизаторы Wagstaff для цилиндрических слитков используют самоцентрирующиеся поддоны, изготовленные из одного стального блока. Самоцентрирующаяся конструкция обеспечивает точное совмещение с кристаллизатором каждый раз при подъеме поддонов в позицию для начала литья. Таким образом, нет необходимости центровать поддоны и кристаллизаторы вручную, как в обычных литейных системах. Это приводит к сокращению времени литейного цикла и облегчает подготовку оборудования на литейной яме [10].

1.3. Метод полунепрерывного литья

Метод полунепрерывного литья основывается на том, что после каждой отлитой плавки, требуется разборка и подготовка оснастки для следующей партии.

В обычных случаях необходимо, чтобы температура расплава в раздаточной печи была примерно на 50° выше точки ликвидуса сплава, при этом остывание металла на пути из печи в кристаллизатор не превысит допустимой величины. Высокая температура металла в раздаточной печи нежелательна из-за возможности насыщения его газом и угара.

Из раздаточного миксера, через летку и металлотракт, металл поступает в кристаллизаторы литейной машины.

Основные требования к движению расплава на всем пути от миксера в кристаллизатор: исключение перепада и бурления расплава, разрывов поверхностной оксидной пленки и замешивания ее в расплав, обеспечение подачи металла из миксера под уровень расплава в промежуточном распределительном устройстве и подачи металла из этого устройства под уровень расплава в кристаллизаторе [5].

Наиболее распространенные методы подачи металла из миксера - через летку, представляющую собой шамотную плиту с отверстием диаметром 30—40 мм, укрепленную в стенке миксера. Летка закрывается стальным ломиком (пикой), конец которого обматывают огнеупорным шнуром или керамикой: этой же пикой регулируют подачу металла. Схема подачи расплава через летку с регулировкой уровня расплава в кристаллизаторе поплавком показана на рисунке 1.7. Расплав из летки поступает в промежуточную коробку, в которой чаще всего устанавливают фильтр из стеклосетки с ячейкой 1,0 x 1,0 мм, и далее через два распределительных носка поступает в кристаллизатор. Расплав из носков должен поступать плавно, без бурления, параллельно широким граням по направлению к узким боковым граням. Такое распределение расплава способствует уменьшению брака по трещинам [13].

После открытия летки миксера и непосредственного начала литья, уровень металла в лотке и коробке поддерживается таким, чтобы обеспечить непрерывность подачи струи расплава в кристаллизаторы. При этом на многих литейных машинах уровень наблюдается непосредственно человеком и отверстие миксера тоже открывается вручную с помощью пики.

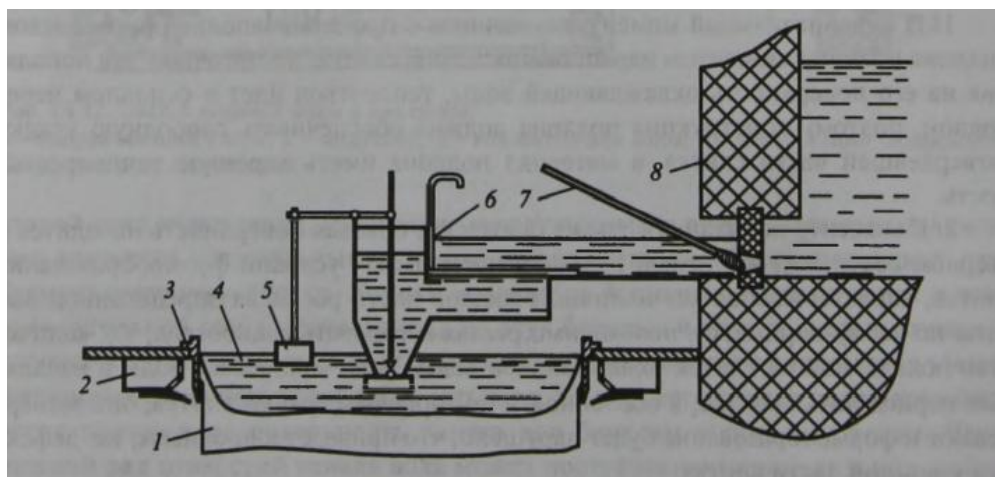


Рисунок 1.7 - Схема регулирования уровня расплава в кристаллизаторе поплавком: 1 - слиток; 2 - коллектор для воды; 3 - гильза кристаллизатора; 4 - лунка; 5 - поплавок; 6 - желоб; 7 - пика; 8 - миксер

Технологический процесс получения плоских слитков осуществляется с помощью метода полунепрерывного литья, схематично изображенного на рисунке 1.8 [8]. Процесс литья состоит из двух основных периодов: разгон и рабочий ход. Разгон представляет собой период времени от старта литья до выхода скорости платформы и расхода охлаждающей воды на рабочий ход. В это время происходит плавное увеличение скорости литья и расхода воды. Это необходимо для того, чтобы успела сформироваться затвердевшая донная часть слитка и начала формироваться застывавшая корка по периметру слитка, при этом внутри слитка металл еще остается в жидкой фазе.

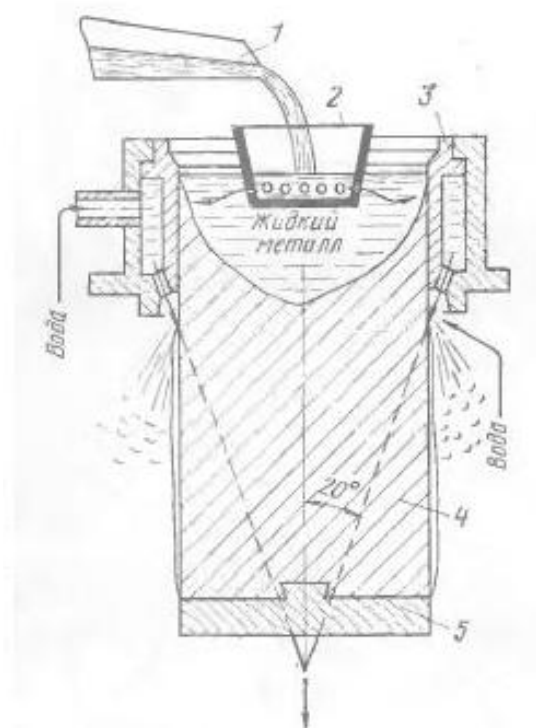


Рисунок 1.8 – Схема полунепрерывного литья: 1 – желоб; 2 – распределительная воронка; 3 – кристаллизатор; 4 – слиток; 5 – поддон.

В зависимости от сплава и размеров отливаемых слитков, разрабатываются различные рецепты литья, таблицы 1.3, 1.4 [15].

Во время литья, скорость опускания платформы и расход охлаждающей воды регулируются автоматически по заранее выбранному рецепту.

Таблица 1.3 – АТЧ 400х1260 кристаллизатор скольжения.

Параметр	Начальная	T0-T1	T1-T2	T2-T3	T3-T4	T4-T5
Скорость						
Время, сек		36,72	36,72	36,72	36,72	51
Скорость, мм/мин	25	30	35	40	55	65
Вода						
Время, сек		120	180	61	37	37
Расход воды, куб/час	90	100	110	150	180	220

Таблица 1.4 – АМЦ 300х1025 кристаллизатор скольжения.

Параметр	Начальная	T0-T1	T1-T2	T2-T3	T3-T4	T4-T5
Скорость						
Время, сек		36,72	36,72	36,72	36,72	51
Скорость, мм/мин	25	30	35	40	55	65
Вода						
Время, сек		61,2	51	36,72	36,72	30,6
Расход воды, куб/час	90	100	110	140	160	180

После прохождения последней ступени разгона, необходимо поддерживать стабильное, неизменное значение скорости литья и расхода воды до окончания ходки, пока слиток не достигнет заданной длины.

При достижении необходимой длины, прекращают подачу металла в кристаллизатор, движение платформы останавливают. Подача воды не прекращается до тех пор, пока слиток полностью не закристаллизуется. Затем слитки извлекают из литейной машины грузоподъемными механизмами и производят подготовку оснастки для следующей плавки.

1.4. Анализ существующих систем управления литейными агрегатами

Независимо от типа литейной машины, основные технологические параметры, которые необходимо регулировать в процессе литья, это [16]:

1. Скорость литья (движения платформы);
2. Расход охлаждающей воды;
3. Температура металла в миксере.

Управление вышеприведёнными параметрами происходит с помощью исполнительных устройств, сигнал на которые формируется в ПЛК в зависимости от режима управления и заданного рецепта. В автоматическом режиме управляющие сигналы формируются ПИД-регулятором на основании заданной уставки. В ручном режиме оператор задаёт необходимое количественное значение технологического параметра и ПИД-регулятор формирует сигнал на исполнительный механизм, для поддержания уставки.

Wagstaff является одним из ключевых зарубежных поставщиков оборудования для полунепрерывного литья на предприятиях РУСАЛа (крупнейшего производителя алюминия в России). Оборудование различных модификаций применяется на Красноярском, Братском, Новокузнецком, Волгоградском, Саяногорском, Тайшетском алюминиевых заводах.

Система Вагстафф автоматического управления процессом литья AutoCast контролирует и автоматически регулирует процесс литья. После того как литейщик начал процесс литья, система AutoCast регулирует работу системы смазки кристаллизаторов, подачу модификатора зерна, скорость литья, длину слитка и расход воды в кристаллизаторах. Помимо этого, система контролирует и отображает температуру металла в печи и на литейном столе, расход воды в кристаллизаторах, температуру воды в кристаллизаторах, длину слитка и скорость литья [17,18].

Система AutoCast состоит из следующих компонентов:

1. Пульт управления литейщика;
2. Экраны интерфейсов для литейщиков;
3. Механизмы кнопочного регулирования особо важных литейных функций;
4. Управляющий компьютер/сервер Dell;
5. ПЛК Siemens;

6. Цифровые дисплеи;
7. Сигнальный звуковой/предупредительный индикатор;
8. Регулятор уровня металла в желобе;
9. Регулятор уровня металла в кристаллизаторах;
10. Регулятор расхода воды в кристаллизаторах;
11. Регулятор скорости литья и длины слитка.

Все графические дисплеи, экраны интерфейса литейщиков и управляющий компьютер/сервер объединены в сеть с ПЛК, управляющим процессом литья. Регламенты литья вводятся в ПЛК через управляющий компьютер, рисунок 1.9 [18].

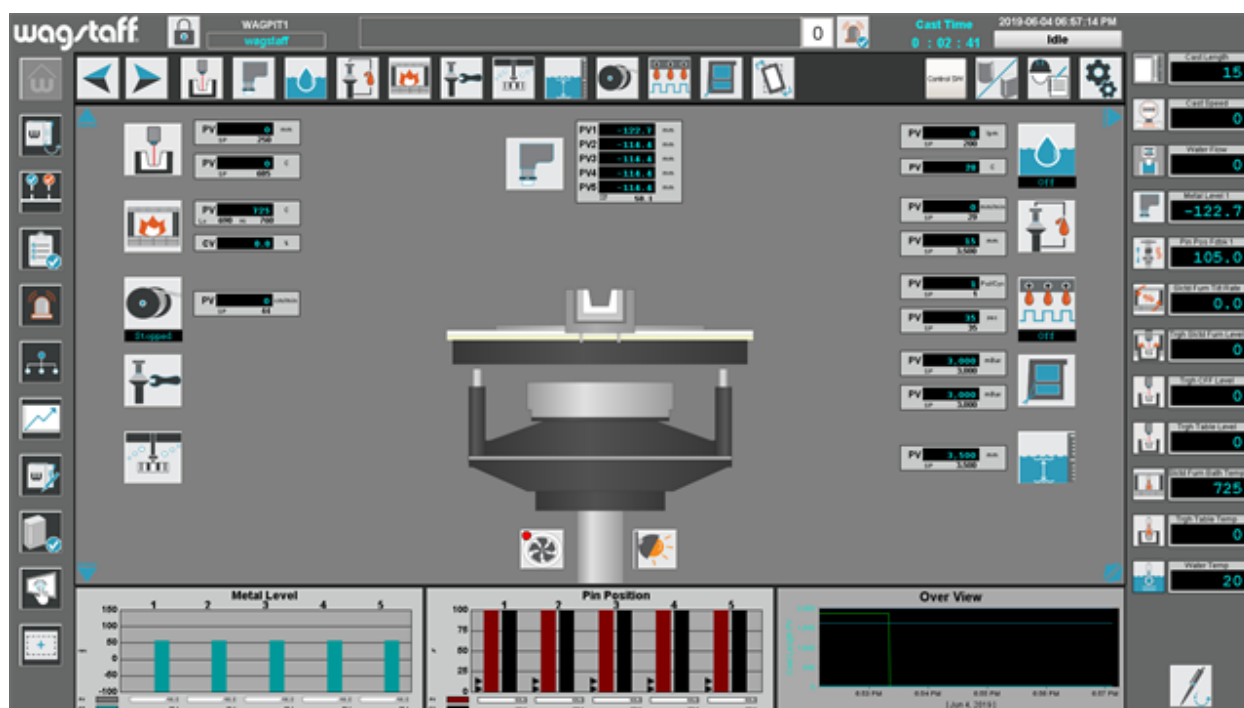


Рисунок 1.9 – Интерфейс SCADA WagStaff

ПЛК регулирует параметры литейного процесса, в том числе автоматическую динамику изменения расхода воды и скорости литья в начале литья. Система выдает выходные управляющие сигналы в зависимости от заданного регламента литья. ПЛК активизирует сигнальные устройства, когда какие-либо технологические параметры выходят за допустимые пределы. ПЛК

также регулирует: проверку правильности регламента литья; проверку на готовность к литью; допуски к литью; скорость литья; расход воды.

Экран интерфейса литейщика заменяет нажимные кнопки и позволяет управлять многими параметрами системы либо вручную, либо посредством ПЛК. Здесь же отображаются основные параметры процесса, такие, как положение или состояние периферийного устройства, обзор регламента литья или расход воды.

Система регулирования уровня металла в кристаллизаторах для прокатных слитков снабжена дифференциальным лазерным датчиком [19], рисунок 1.10. Дифференциальный датчик оптически удлиняет лазерный луч до поверхности расплава алюминия и анализирует уровень в нескольких точках, что позволяет определить уровень металла в кристаллизаторе. ПЛК анализирует данные, считываемые с датчика, и приводит в действие электрический линейный исполнительный механизм, который регулирует позицию стопора и, соответственно, подачу металла в кристаллизатор. Этот регулятор обеспечивает разрешение 1 мм на расстоянии от 100 мм до 130 метров.

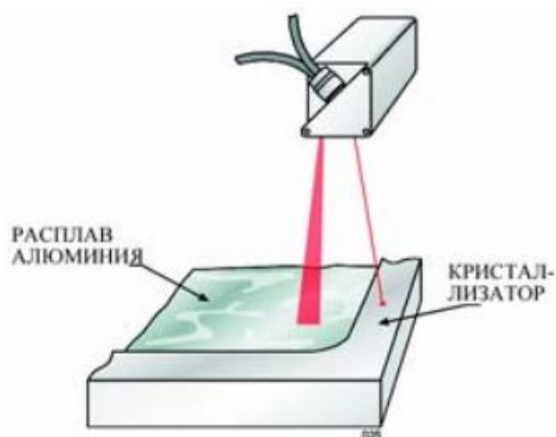


Рисунок 1.10 - Принцип действия лазерного датчика.

Для контроля за расходом воды в системе подачи воды используется магнитный расходомер, а для регулирования расхода до контрольной точки - регулирующий клапан с электроприводом. Кроме того, система снабжена отсечным водяным клапаном с электроприводом для прекращения подачи воды к

литейному столу, а также клапаном отвода, обеспечивающим циркуляцию воды без подачи ее в кристаллизаторы. На пульте управления располагается дисплей для считывания показателей расхода воды.

Регулирование скорости литья - жидкость, выходящая из литейного цилиндра, измеряется посредством точного массового расходомера, оснащенного замкнутой системой управления с обратной связью. Для обеспечения точного регулирования скорости отливки ПЛК управляет работой гидрораспределителя с электроприводом [20].

В дополнительной системе смазки кристаллизаторов Вагстафф используются индивидуальные масляные инжекторы, подающие масло на каждый отдельный участок кристаллизатора. Нагнетательный насос обеспечивает подачу масла к инжекторам. Роторный насос автоматически заполняет резервуар нагнетательного насоса.

Система смазки вмонтирована непосредственно в верхнюю часть кристаллизатора. Масло попадает на торцы или боковые части кристаллизатора и распределяется по каналам, расположенным по периметру рабочей поверхности. Масло подается в канал через небольшие отверстия и стекает вниз по рабочей поверхности, смазывая литейную поверхность. Эта конструкция обеспечивает равномерную смазку и предотвращает проблемы, связанные с засорениями при чистке рабочей поверхности кристаллизатора наждачной бумагой [21].

Несмотря на лидерство литейных машин Wagstaff в полноте датчикового оснащения и заметный прогресс российских машин в базовом контроле параметров, системы управления на обоих типах оборудования остаются на уровне автоматизированного регулирования (АСУ ТП 2.0). Ни для Wagstaff, ни для российских машин на заводах РУСАЛа не обнаружено внедренных промышленных решений на основе цифровых двойников процесса литья слитков. Нет данных о создании виртуальных динамических моделей, прогнозирующих дефекты, оптимизирующих режимы в реальном времени или управляющих процессом через симуляцию.

Существующие системы управления (включая AutoCast™) выполняют реактивные и ПИД-регулирующие функции, но не реализуют:

- Предиктивное управление качеством на основе моделей кристаллизации.
- Оптимизацию параметров литья (скорость, охлаждение) под конкретные марки сплавов с использованием машинного обучения.
- Прогнозирование и предотвращение дефектов (fir tree, горячие трещины, пористость) до их возникновения.
- Как далее будет отмечено, не обеспечивают безопасности процесса.

Настройка режимов и устранение неполадок по-прежнему сильно зависят от навыков технологов и операторов, а не от рекомендаций интеллектуальных систем.

1.5. Литейный агрегат как объект автоматизации

Рассмотрим литейный агрегат как объект автоматизации, на основе литейного агрегата №3, литейного отделения №2 Красноярского Аллюминиевого Завода. Для дальнейшего изучения литейный агрегат разделен на три независимые части: миксер, металлотракт и литейная машина.

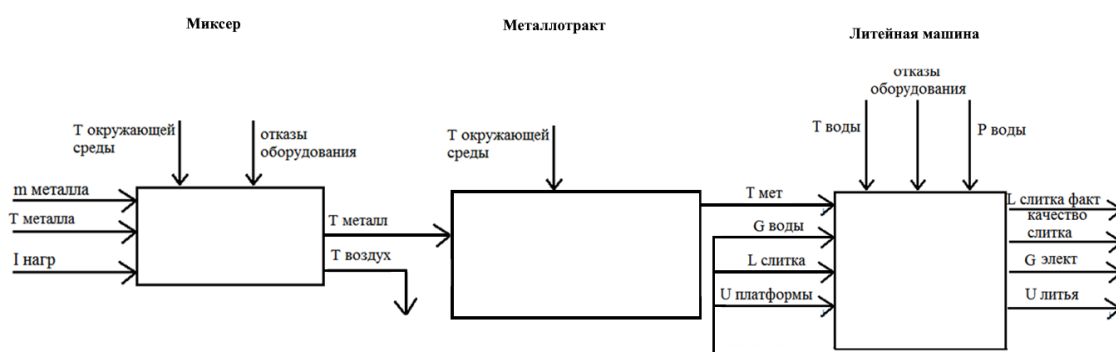


Рисунок 1.11 – Литейный агрегат как объект управления.

Миксер (рис. 1.11) 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, но необходимо также знать температуру греющей среды (Т воздуха).

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 относится длина и качество самого отлитого слитка, расход электроэнергии и скорость литья.

Полностью входы, выходы и возмущения на объектах приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Технологические параметры литейного агрегата.

Обозначение	Полное название	Диапазон изменения	Единицы измерения
T окр среды	Температура окружающей среды	-40 ... +50	С
m металла	Масса металла в миксере	0 ... 35000	кг
T металла	Температура металла	-40 ... 1100	С
T воздух	Температура воздушной среды	-40 ... 1100	С
I нагр	Ток нагревательных элементов	0 ... 400	А
T воды	Температура охлаждающей воды	+10 ... +40	С
P воды	Давление охлаждающей воды	0 ... 1	МПа
U платформы	Скорость движения платформы	0 ... 220	мм/мин
G воды	Расход охлаждающей воды	0 ... 400	м ³ /час
L слитка	Длина слитка	0 ... 6500	мм
G элект	Расход электроэнергии	0 ... 900	кВт/час
Отказы оборудования	Время простоя оборудования	...	час
L слитка факт	Длина отлитого слитка	0 ... 6500	мм
U литья	Скорость движения платформы фактическая	0 ... 220	мм/мин
Качество слитка	Анализ макроструктуры, размер зерна и т.д.	Удовлетворительно / неудовлетворительно	

1.6. Показатели качества процесса полунепрерывного литья

По результатам практических и теоретических исследований, разные авторы [8, 22 - 27] выделяют следующие элементы процесса производства, непосредственно влияющих на качество получаемых изделий:

1. Продолжительность разливки, плавки;
2. Взаимодействие расплава с твердыми газообразными и жидкими веществами в процессе доставки металла от миксера до изложницы (кристаллизатора);
3. Взаимодействие металла со смазкой изложницы (кристаллизатора) или непосредственно с материалом изложницы;
4. Форма и размеры струи металла;
5. Масса, размеры, материал и форма изложницы (кристаллизатора);
6. Температура литья;
7. Температура изложницы;
8. Скорость и направление охлаждения слитка;
9. Кристаллизация слитка;
10. Усадочные явления при кристаллизации.

Для получения качественного слитка каждый фактор имеет большое значение и математически рассчитать их общее взаимное влияние на процесс литья очень сложно, поэтому на практике ограничиваются подбором нескольких основных параметров для отработки технологии производства. При этом используются основные знания физических, технологических и физико-химических свойств цветных металлов и сплавов [26].

Возможные дефекты, возникающие при отклонении технологических либо технических параметров описаны в работе В.И. Напалкова [5]. Брак слитков возникает в результате нарушений технологии приготовления сплава и литья, неисправности оборудования и литейной оснастки или недостаточной отработки параметров технологического процесса.

Трещины. Различают два типа трещин: холодные и горячие. К холодным трещинам относятся донные, головные и боковые. Холодные трещины образуются во время литья и даже после затвердевания всего слитка. К горячим трещинам относятся поверхностные трещины, чаще всего выявляющиеся после фрезерования. Виды трещин показаны на рисунке 1.12. Донные трещины в слитках высоколегированных сплавов возникают вследствие попадания в донную часть включений, наличия трещин в подливке, что связано с использованием перегретого алюминия или алюминия с превышением содержания кремния над содержанием железа, несплава основного сплава к подливке или ее недостаточной толщины. Холодные головные и боковые трещины, а также горячие поверхностные трещины образуются при несоблюдении скорости литья, температуры металла, неравномерном охлаждении по периметру слитка, неправильном распределении расплава в кристаллизаторе. Поверхностные трещины образуются также из-за несоответствия химического состава установленным требованиям по основным компонентам и примесям.

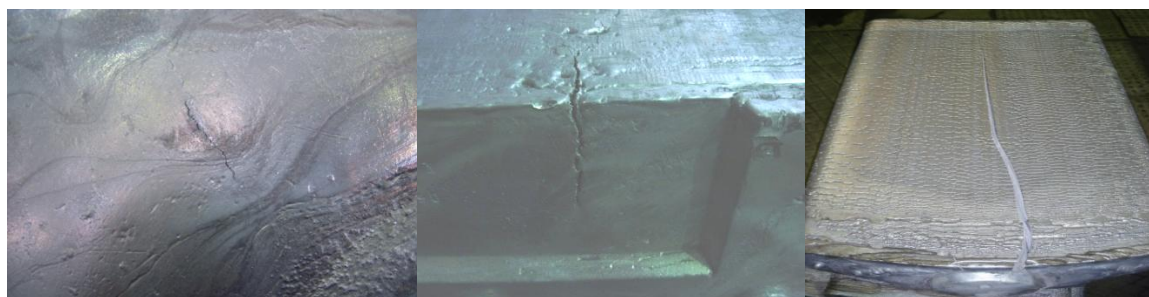


Рисунок 1.12 - Виды трещин: а - донная; б - угловая; в - поверхностная.

Неслитины. В плоских слитках неслитины образуются прежде всего по узким граням вследствие более интенсивного их охлаждения. Основные причины образования неслитин: занижение скорости литья, температуры металла, непостоянство уровня металла в кристаллизаторе, неправильная установка кристаллизатора.

Неслитины - дефекты поверхности слитка, они увеличивают съём стружки при фрезеровании, что приводит к снижению выхода годного. Кроме того, они могут послужить началом образования боковых трещин.

Ликвационные наплывы. Величина ликвационных наплывов на поверхности плоских слитков зависит от сплава. Наибольшая интенсивность ликвационных наплывов наблюдается на слитках высоколегированных сплавов, например Д16; слитки алюминия практически не имеют ликватов. Образование их связано с выдавливанием остаточной жидкости на поверхность слитка через междендритные каналы корочки слитка, образовавшейся в кристаллизаторе. Поэтому, например, при завышении скорости литья или температуры расплава корочка еще более утоняется и ликвационные наплывы увеличиваются. К подобному явлению приводит общий или местный недостаток воды. Ликвационные выделения можно уменьшить интенсификацией охлаждения слитка и кристаллизатора, уменьшением высоты кристаллизатора и зазора между слитком и стенками кристаллизатора. Ликваты удаляют фрезеровкой слитков.

Волнистость - поверхностный дефект преимущественно слитков алюминия, представляет собой периодически повторяющиеся выпуклости и впадины, перпендикулярно расположенные по отношению к продольной оси слитка. Волнистость образуется в результате оплавления и изгиба корочки слитка после образования воздушного зазора между слитком и стенками кристаллизатора. Для устранения волнистости применяют те же меры, что и для уменьшения ликвационных наплывов.

Надиры, надрывы - поверхностные дефекты, образуются в результате разрыва корочки слитка при трении ее о стенки кристаллизатора. К надирам и надрывам приводят плохая полировка и смазка кристаллизаторов, неправильная их установка, разрывы оксидной пленки на поверхности расплава в кристаллизаторе.

Белые полосы. Поверхностный дефект, представляющий собой отложение солей на поверхности слитка вследствие местного недостатка воды и ее интенсивного испарения. Грубые белые полосы на широких гранях слитков, как правило, сопровождаются горячими поверхностными трещинами. Белые полосы

можно устранить регулировкой положения козырьков, чисткой охладителей, установкой и периодической проверкой фильтров для очистки воды.

Кривизна - возникает обычно из-за неисправностей литейной машины: кривизны направляющих, большого люфта между рамой поддонов и направляющими, неправильной установки поддонов и кристаллизаторов. Для устранения кривизны слитков требуется регулярная проверка и тщательная наладка литейной машины.

Пористость - внутренний дефект слитков. Наибольшая пористость возникает в поверхностных слоях слитка толщиной 15-30 мм. Пористость наблюдается в слитках, отлитых из расплава с высокой газонасыщенностью или при использовании непросушенной и непрогретой литейной оснастки: сифона, распределительной коробки. Устранение пористости достигается автоматическим регулированием температуры в процессе приготовления плавки, что исключает перегрев расплава в печах, применением рафинирующих средств, не содержащих влагу, и тщательной просушкой и подогревом литейной оснастки и инструмента перед литьем.

Неметаллические включения — обычно шлак, кусочки футеровки и оксидные пленки, попадающие в слиток вместе с жидким металлом. Больше всего включений встречается в донной части слитков вследствие разрывов и замешивания оксидной пленки при заполнении коробки и кристаллизаторов, когда металл поступает не под уровень расплава, а открытой струей.

Наиболее эффективно попадание неметаллических включений в слиток предупреждается фильтрацией расплава в распределительной коробке через сетчатые фильтры из стеклоткани, пенокерамические фильтры и отбором металла на 50-80 мм выше уровня подины миксера. Неметаллические включения могут быть причиной образования трещин в слитке, темных полос, расслоений и плен в листах и плитах.

Интерметаллиды. Интерметаллические включения наблюдаются в слитках сплавов АМц, АМгб-1, АК4, АК4-1 и ряда других, легированных такими компонентами, как марганец, хром, цирконий, титан, ванадий, никель, железо.

Особенно грубые скопления интерметаллидов образуются в виде настывлей на поверхности распределительных носков литейной коробки. Для уменьшения или исключения образования интерметаллидов регулируют химический состав по содержанию интерметаллидообразующих элементов, перегревают расплав при приготовлении сплавов с целью обеспечения полного растворения интерметаллических кристаллов лигатур, ведут литье при повышенных температурах, подогревают литейную оснастку, готовят и используют лигатуры с низким содержанием тугоплавких элементов.

Немерность. Брак по размерам — это несоответствие фактической длины слитков заданной, что приводит к увеличению отходов при разрезке слитков. Устранение этого вида брака достигается регулярной проверкой работы литейной машины, измерительных приборов, чисткой приемков. Дефекты в виде шлака, грубых ликвационных наплывов, неслитин, пористости и трещин вызывают увеличение отходов при разрезке и фрезеровке, что также может вывести слиток из допусков [5,8].

Описанное выше достаточно редко реализовано в виде формул, пригодных для расчета качества слитка, вероятности брака. Рассмотрим далее зависимость возникновения брака от технологических параметров и возможностей управляющей системы.

Для оценки вероятности возникновения холодных трещин, также целесообразно оценить остаточное напряжение в слитке. Исследования остаточных напряжений в плоских слитках немногочисленны. Один из методов приводится в работе А.А. Неуструева. Для двумерного температурного поля распределение температур в рассматриваемом сечении можно получить методом перемножения температурных критериев. Соответствующее уравнение применительно к рассматриваемому случаю можно записать в виде

$$\frac{t - t_{\Pi}}{t_K - t_{\Pi}} = \left(1 - \frac{x_1^2}{X_1^2}\right) \left(1 - \frac{x_2^2}{X_2^2}\right) \quad (1.6.1)$$

где t_n – температура поверхности; x_1 и x_2 – толщина и ширина слитка соответственно; t_k – температура кристаллизации.

Величина остаточных напряжений для рассматриваемого случая

$$\sigma(x_1, x_2) = \frac{\alpha E}{1-\nu} \left[\left(1 - \frac{x_1^2}{X_1^2} \right) \left(1 - \frac{x_2^2}{X_2^2} \right) - \frac{4}{9} \right] \quad (1.6.2)$$

Примененный метод позволяет достаточно надежно определить распределение напряжений в слоях, расположенных на глубине, не превышающей половины диаметра слитка, т.е. области сжимающих напряжений [8].

Ливанов В.А. говорит о том, что опыт литья слитков самых разнообразных сечений показывает, что образование трещин зависит от трех параметров: толщины слитка b и скорости вытягивания (литья) v_L . Скорость литья, обеспечивающая отсутствие горячих трещин, должна быть несколько ниже, чем

$$v_L = \frac{K_1}{b^m} \quad (1.6.3)$$

где m – показатель степени, равный 1,5; K_1 – постоянная, зависящая от природы сплава.

Скорость литья, обеспечивающая отсутствие холодных трещин

$$v_L = K_2 b \left(\frac{n}{n+1} - a \right) \quad (1.6.4)$$

где K_2 – постоянная, зависящая от природы сплава; a – коэффициент, равный 0,5; n – кратность между толщиной и шириной слитка [28].

Авторы И. Н. Будилов, Ю. В. Лукашук, С. Ю. Лукашук [29] при рассмотрении дефектов связанных с усадкой слитков используют коэффициент усадки (критерий Нийямы), характеризующий дефект отливок:

$$M = \frac{G}{\sqrt{L}} \quad (1.6.5)$$

Где G – Модуль температурного градиента, определяемый формулой

$$G = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2} \quad (1.6.6)$$

L – скорость охлаждения, определяемая по зависимости

$$L = \left| \frac{T_{up} - T_{low}}{\tau_{up} - \tau_{low}} \right| \quad (1.6.7)$$

$T_{up} - T_{low}$ - верхняя и нижняя границы температуры диапазона, в котором оценивается скорость охлаждения, $\tau_{up} - \tau_{low}$ - времена достижения соответствующих границ температурного диапазона.

Очень важным фактором процесса является его безопасность. Всякий раз, когда две жидкости с сильно различающимися температурами вступают в контакт, может произойти взрыв. Этот взрыв — чисто физическое явление [30, 31]. Существует дополнительная проблема с алюминием, поскольку это очень реактивный химический элемент, который имеет сильное химическое притяжение к кислороду. В работе Alex W. Lowery [33] проведен анализ категоричности взрывов в зависимости от их мощности. Но коренной причиной их образования всегда является контакт расплавленного металла с водой в момент выхода из кристаллизатора. В данной области отсутствует возможность визуального и технического контроля толщины закристаллизовавшейся корки металла. В случаи недостаточной толщины происходит прорыв жидкого металла через корку и попадание в кессон, наполненный водой, в результате чего образуется интенсивный выброс пара и находящийся в кристаллизаторе металл выбрасывает вверх. При условии, что достаточно большой объем жидкого металла контактирует с водой в ограниченном пространстве, последствия бывают катастрофическими. Они характеризуются значительным ущербом имуществу и разбросом металла на расстояние более 15 м. Часто металл исчезает, а остается белый порошок — оксид алюминия. Пример взрыва силой 3 балла показан ниже на рисунке 1.13.

В апреле 2022 года произошел взрыв расплавленного металла, в результате которого погибли пять рабочих и было разрушено литейное производство [32]. Эта трагедия уникальна по нескольким причинам: из-за огромных размеров здания и того факта, что произошло несколько взрывов. Ударная волна от взрыва в первом кессоне спровоцировала смещение кристаллизатора и прорыв металла в наполненные водой соседние кессоны.



Рисунок 1.13 – Взрыв силой 3 балла произошел в ноябре 2020 года, в результате чего погибли 3 человека и 7 получили ранения, Китай.

Трое рабочих во время литья слитков покинули литейный агрегат, для выполнения других задач поблизости. Жидкий алюминий просочился через недостаточно закристаллизовавшуюся корку, не был вовремя обнаружен и попал на трос и обводные блоки привода литейной машины – рисунок 1.14.



Рисунок 1.14 – Привод тросовой литейной машины.

В результате произошел обрыв троса и падение платформы в кессон. 902,16 кг расплавленного алюминия упали в кессон с водой, что привело к взрыву. В несчастном случае погибли 5 рабочих.

Таким образом, нахождение способов расчета толщины корки в опасной зоне является важной задачей.

1.7. Цифровые двойники для процессов и агрегатов

В последние десятилетия индустриальный ландшафт претерпел глубокие трансформации благодаря стремительному развитию цифровых технологий. Среди этих изменений особое место занимает концепция цифровых двойников, открывающая новые горизонты для повышения эффективности, безопасности и устойчивости производства. Цифровые двойники — это виртуальные репрезентации физических объектов, процессов или систем, которые позволяют моделировать, анализировать и оптимизировать их поведение в реальном времени.

Истоки этой технологии можно проследить до первых компьютерных моделей и симуляций, однако лишь в последние годы стало возможным интегрировать их в реальный производственный процесс благодаря расширению возможностей вычислительной техники, сенсорных технологий и развитой

аналитической инфраструктуре. Современные цифровые двойники могут задействовать обширные массивы данных, получаемых с помощью Интернета вещей (IoT), машинного обучения и анализа больших данных, что делает их незаменимыми инструментами для современных промышленных предприятий.

Применение цифровых двойников охватывает множество аспектов промышленного производства — от прогнозирующего технического обслуживания и оптимизации рабочих процессов до планирования новых продуктов и обеспечения устойчивости цепочек поставок [34-37]. Эта технология позволяет не только предвидеть и предотвращать потенциальные сбои и дефекты, но и экспериментировать с различными сценариями без риска и затрат, связанных с физическими изменениями.

Разработка и применение цифровых двойников сегодня регламентируется согласно ГОСТ Р 57700.37-2021 [27]. В данном документе определены необходимые термины и определения, такие как:

1. Математическая модель – Модель, в которой сведения об объекте моделирования представлены в виде математических символов и выражений.

2. Цифровая модель – Система математических и компьютерных моделей, а также электронных документов изделия, описывающая структуру, функциональность и поведение вновь разрабатываемого или эксплуатируемого изделия на различных стадиях жизненного цикла, для которой на основании результатов цифровых или иных испытаний по ГОСТ 16504 выполнена оценка соответствия предъявляемым к изделию требованиям.

3. Цифровой двойник – система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием и его составными частями.

В настоящее время много говорится о цифровых двойниках, но не так много статей, где публикуются примеры реального применения этой технологии. Наиболее известные работы Боровкова, который является популяризатором этой новой технологии.

Модели проходят в своем развитии несколько этапов: геометрическая модель, геометрическая плюс сборочная, затем добавляется модель инженерного

анализа CAE, на определенном этапе формируются так называемые «умные математические модели», обладающие высоким уровнем адекватности реальному материалу, объекту или процессу. Согласно определению А. И. Боровкова, «умные» модели агрегируют в себе все знания, которые применяются при проектировании, производстве и эксплуатации изделия/ продукта/ конструкции/ машины/установки/технической или киберфизической системы [39].

В работе Прохорова А. и Лысачева М. [40] приводится пример реализации цифрового двойника райзера для морского бурения (рис. 1.15). В 2017 г. General Electric опубликовала данные о создании и испытании цифрового двойника водоотделяющей колонны (watertrapcolumn, waterseparatorcolumn) (райзера, marineriser) для морского бурения, которая предназначена для разведки и добычи полезных ископаемых (нефти и газа) и для безопасного бурения скважины.

Эксплуатация в тяжелых климатических условиях создает проблемы для эффективного развертывания и обслуживания морских райзеров. Высокие эксплуатационные нагрузки приводят к повреждению оборудования, в том числе в виде усталостных разрушений.

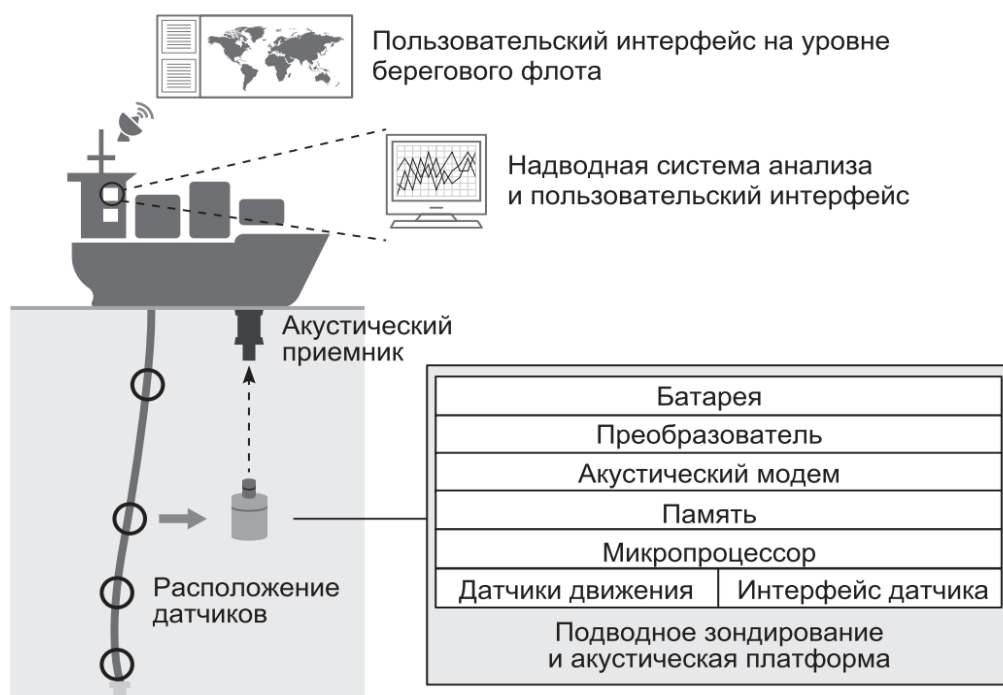


Рисунок 1.15 – Схема цифрового двойника райзера для морского бурения.

Использование ЦД оказывается особенно эффективным в условиях ограниченного доступа к оборудованию, испытывающему тяжелые условия эксплуатации. Для анализа состояния райзера GE создала цифровой двойник (физическую и виртуальную модель райзера) с целью сокращения времени простоев и оптимизации графиков осмотра дорогих элементов подводной буровой инфраструктуры, которые могут простираться на несколько миль. Цифровой двойник позволяет General Electric Oil & Gas предоставлять операторам буровой установки возможность анализировать состояние объектов во время экстремальных условий эксплуатации [40].

Изначально понятие «цифровые двойники» применялось в условиях и к задачам машиностроения – изготовление агрегата, установки, новой конструкции, испытания на модели. Но терминология указанного выше ГОСТа может быть применена и к разработке цифровых моделей и двойников технологических процессов и оборудования, на котором эти процессы реализуются. В частности, металлургических процессов. Модели и двойники такого рода необходимы для эффективного управления технологическим процессом или производственным участком.

В работе [41] представлен «Виртуальный электролизер» - цифровой двойник процесса электролитического получения алюминия.

Программа «Виртуальный электролизер» предназначена для:

- обучения технологического персонала управлению различными типами электролизеров, приемам диагностики состояния электролизера;
- динамического моделирования реакции электролизёра на изменение установок и настроек АСУТП электролиза алюминия;
- динамического моделирования технологического процесса производства алюминия и прогнозирования состояния электролизера, в зависимости от первоначальных условий и изменяющихся внутренних и внешних воздействий на процесс электролиза;

– оптимизации ведения технологического процесса за счет использования инструментов моделирования, модификации алгоритмов управления и анализа накопленной технологической информации.

Программный комплекс состоит из следующих основных блоков: библиотеки конструкций электролизеров, блока имитации динамики процесса, блока управления, блока ввода – вывода результатов (в виде таблиц и графиков), блока оптимизации [41].

В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин, Г.Л. Бекларян [42] приводят пример имитационной модели типового добывающего предприятия. Модель оперирует непрерывными сырьевыми и финансовыми потоками и поэтому разрабатывается с использованием методов системной динамики. При этом важными ресурсными характеристиками являются основные фонды предприятия, в частности, новый фонд скважин и старый фонд скважин, дифференцируемые по месторождениям. Переход скважин из нового фонда в старый осуществляется по истечении некоторого временного интервала (как правило, пяти лет), с соответствующим изменением объема добычи, что отражено в производственной функции, учитывающей различный вклад новых и старых скважин соответственно.

Модель позволяет оценивать влияние матрицы «отключений» месторождений на динамику дисконтированного финансового потока. Показано, что в условиях отсутствия жестких ограничений на минимально необходимый суммарный объем добычи сырья (план по добыче), возможно существенное увеличение чистой приведенной стоимости по портфелю месторождений за счет исключения из эксплуатации малодебитных скважин и месторождений с относительно высоким уровнем операционных затрат.

В статье авторов P. Saxena, M. Papanikolaou, E. Pagone, K. Salonitis [43] описано, что моделирование и симуляция в литейном производстве являются частью обширного понятия – интеллектуальное производство.

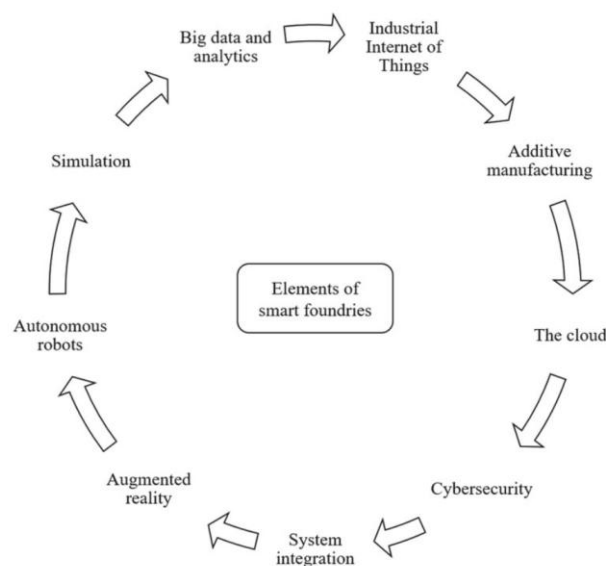


Рисунок 1.16 – Элементы интеллектуального производства.

Литейный цех можно смоделировать задолго до его настройки, а влияние простоя, планирования и любых изменений в операциях можно реализовать заранее. Это помогает экономить время и ресурсы и может быть выполнено даже на этапе проектирования.

Моделирование также находит свое применение в создании цифрового двойника (или виртуального представления) физического процесса. Полученные знания и анализ впоследствии могут быть перенесены в реальную систему, тем самым образуя замкнутую киберфизическую систему. Взаимодействие двух технологий может масштабировать обмен данными и их анализ, что может способствовать более быстрому принятию решений, обеспечивая интеллектуальное производство на литейных заводах будущего.

В работе «Digital Twin for Design and Optimization of DC Casting Lines» [44] авторами К. О. Tveito and А. Håkonsen представлен цифровой двойник, предназначенный для моделирования заполнения металлотракта литейного агрегата и первичного заполнения кристаллизаторов (рис.1.17).

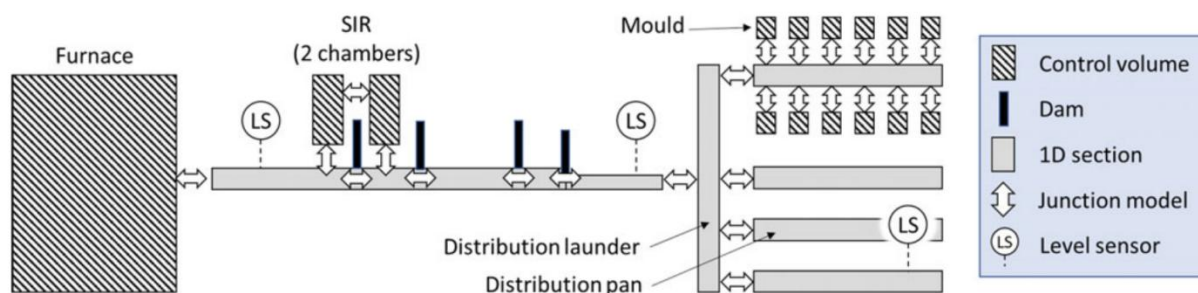


Рисунок 1.17 - Схематическое изображение реализации литейной линии в Digital Twin.

С модульным подходом цифровой двойник можно использовать для анализа различных схем/конструкций желобов, дегазаторов и фильтров, а также их влияния на ключевые параметры, такие как температура запуска, скорости заполнения и контроль уровня. Демонстрируется использование цифрового двойника в разработке и внедрении новой литейной линии Nucast LPC, а его прогнозы сравниваются с экспериментальными данными. Продемонстрированы результаты верификации цифрового двойника, авторам удалось добиться достаточной точности модели – прогнозируемое время заполнения металлотракта и кристаллизаторов 43,3 секунды, измеренное 43 секунды.

Выводы по главе 1

В первой главе диссертационной работы проведен всесторонний анализ современного состояния технологии полунепрерывного литья алюминия и управляющих систем для данного процесса. На основе выполненного обзора можно сделать следующие ключевые выводы:

1. Технологическая сложность - Полунепрерывное литье слитков является высокоинтегрированным процессом, где качество конечной продукции критически зависит от точного согласования и стабильности множества параметров на всех стадиях (плавка, подача металла, кристаллизация, литье слитка, охлаждение);

2. Ограничения существующих АСУТП - Анализ применяемых в промышленности (как отечественных, так и, в частности, систем фирмы Wagstaff) автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) 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 глубокой прогностической способности: Системы слабо используют модели для предсказания возникновения дефектов или отклонений до их появления в реальном процессе.

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

- Слабая интеграция знаний о дефектах: 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.

3. Потенциал цифровых моделей - Обзор передовых тенденций указывает на растущую роль цифровых моделей (цифровых двойников) агрегатов как основы для создания систем управления нового поколения. Однако, существующие

реализации часто ограничиваются либо имитацией отдельных узлов, либо функциями пост-анализа, не будучи глубоко интегрированными в контур реального управления.

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

Таким образом, возникает настоятельная необходимость в разработке:

Целостной цифровой модели литейного агрегата, способной с достаточной точностью и в реальном времени отражать физические процессы (теплоперенос, кристаллизация) во всех ключевых зонах с учетом их взаимосвязи.

Алгоритмов прогностического и оптимизирующего управления, базирующихся непосредственно на этой цифровой модели. Такие алгоритмы должны обеспечивать:

1. Прогноз возникновения дефектов на основе текущих и прогнозируемых параметров.
2. Оптимизацию управляющих воздействий (скорости литья, расхода охлаждающей жидкости) не только для стабилизации, но и для предотвращения отклонений и дефектов.

Разработка такой модели и основанных на ней алгоритмов управления является ключевой научной и практической задачей последующих глав настоящей диссертации, направленной на преодоление выявленных ограничений и достижение нового уровня эффективности управления процессом полунепрерывного литья.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИТЬЯ ПЛОСКИХ СЛИТКОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АВТОМАТИЗАЦИИ

Глава посвящена разработке математической модели литейного агрегата, способной с достаточной точностью и в реальном времени отражать физические процессы (теплоперенос, кристаллизация) во всех ключевых зонах с учетом их взаимосвязи.

2.1. Обзор существующего программного обеспечения для моделирования литейных процессов

В настоящее время компьютерное моделирование применяется для конструирования аппаратов, для разработки новых литейных технологий. Нашей задачей является применить моделирование для разработки новых алгоритмов управления. Рассмотрим существующее программное обеспечение для моделирования литейных процессов.

Из большого количества программ для моделирования литейных процессов в первую очередь необходимо выделить те, которые имеют возможность моделирования непрерывного и полунепрерывного литья. Одним из самых распространенных решений является программа ProCAST.

Основная часть модулей ProCAST используют для решения соответствующих дифференциальных уравнений метод конечных элементов (МКЭ). Кроме модуля расчета газовой и усадочной микропористости (Advanced PorosityModule), использующего метод конечных разностей (МКР). А также модуля расчета процесса зарождения и роста зеренной структуры (SAFE), в котором используются уравнения МКЭ и клеточные автоматы. При использовании МКЭ происходит разбиение исходной геометрической модели отливки на конечные элементы (чаще всего – тетраэдры), благодаря чему более эффективно учитывается геометрия отливки и выявляются даже незначительные дефекты.

Также в пакет программы входит Hot Cracking module (только для Continuous casting) – модуль, проводящий анализ возможности образования горячих трещин при непрерывном и полунепрерывном литье. Модуль работает по следующему алгоритму - как только температурное поле достигает устойчивого состояния, параллельно скорости разливки чертят набор профилей, чтобы определить положение изотермы TCG (температура при слиянии зерен) и значение компонентов температурного градиента в этом положении. Высоколегированные сплавы более чувствительны к этому дефекту [45].

Например, в работе [46] представлены описания алгоритма и модели для численного моделирования процесса полунепрерывного литья плоских алюминиевых слитков, реализованного в пакете ProCAST в соответствии с заданным графиком технологического процесса в реальном физическом времени (рис 2.1).

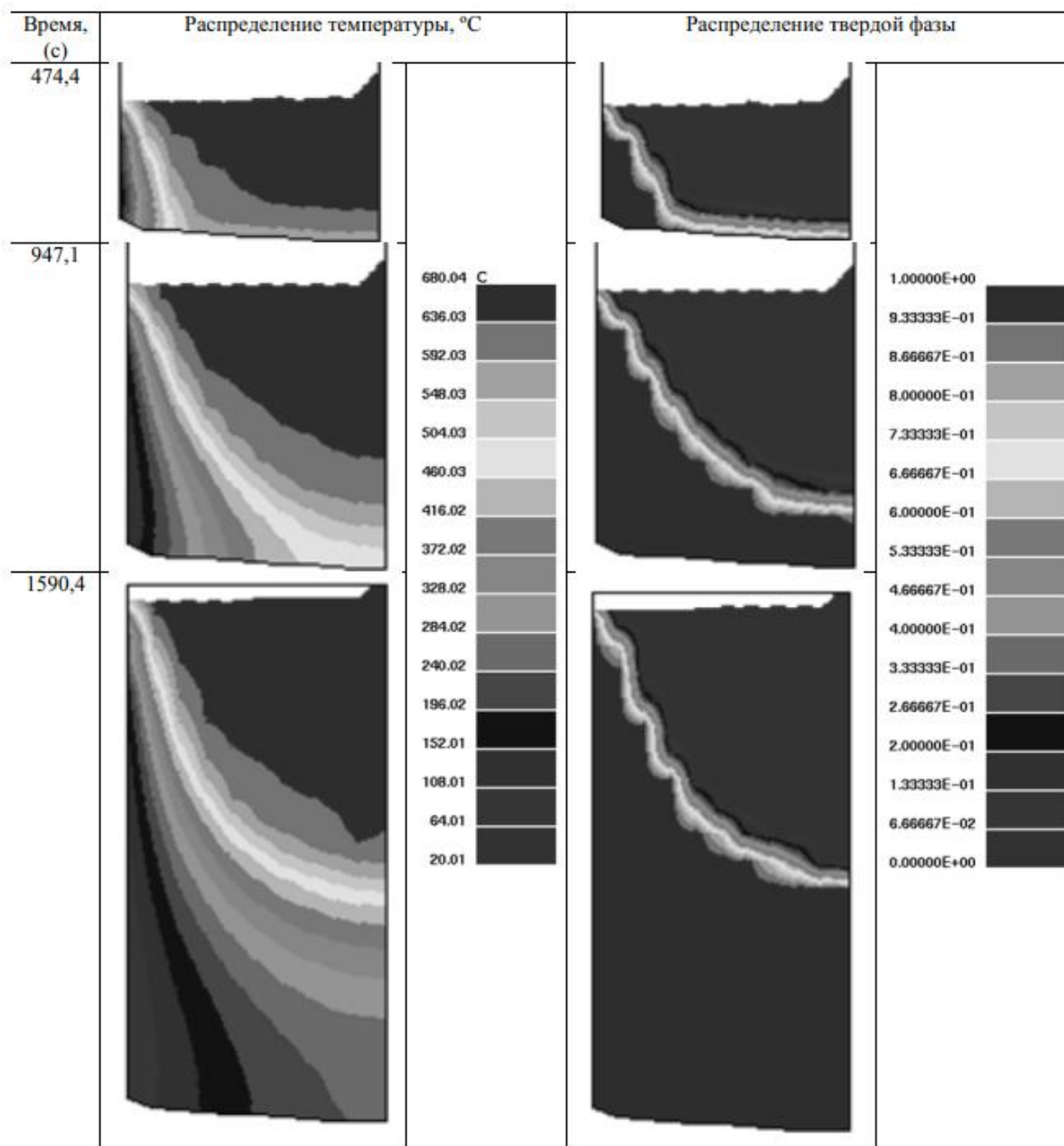


Рисунок 2.1 – Распределение температуры и твердой фазы в процессе полунепрерывного литья алюминиевого плоского слитка.

В отличие от программы ProCAST, в SolidCast [47] используется метод конечных разностей (МКР). Данный метод показывает себя хуже при выявлении усадочной пористости в отливках ответственного назначения. При использовании данного метода, на исходную геометрию накладывается прямоугольная сетка с постоянным шагом, и в случае, если отливка имеет относительно тонкостенные

области больших размеров, необходимо использовать большое число расчетных ячеек.

К сожалению, пока нет информации о том, что SolidCast поддерживает моделирование процессов непрерывного литья металлов и сплавов. SolidCast используется для моделирования процессов технологического литья, таких как литье в кокиль, литье в песчаные формы, центробежное литье и литье под давлением.

Основные функции программы: Моделирование процесса заполнения формы, анализ кристаллизации и охлаждения, анализ деформаций и напряжений (рис 2.2).

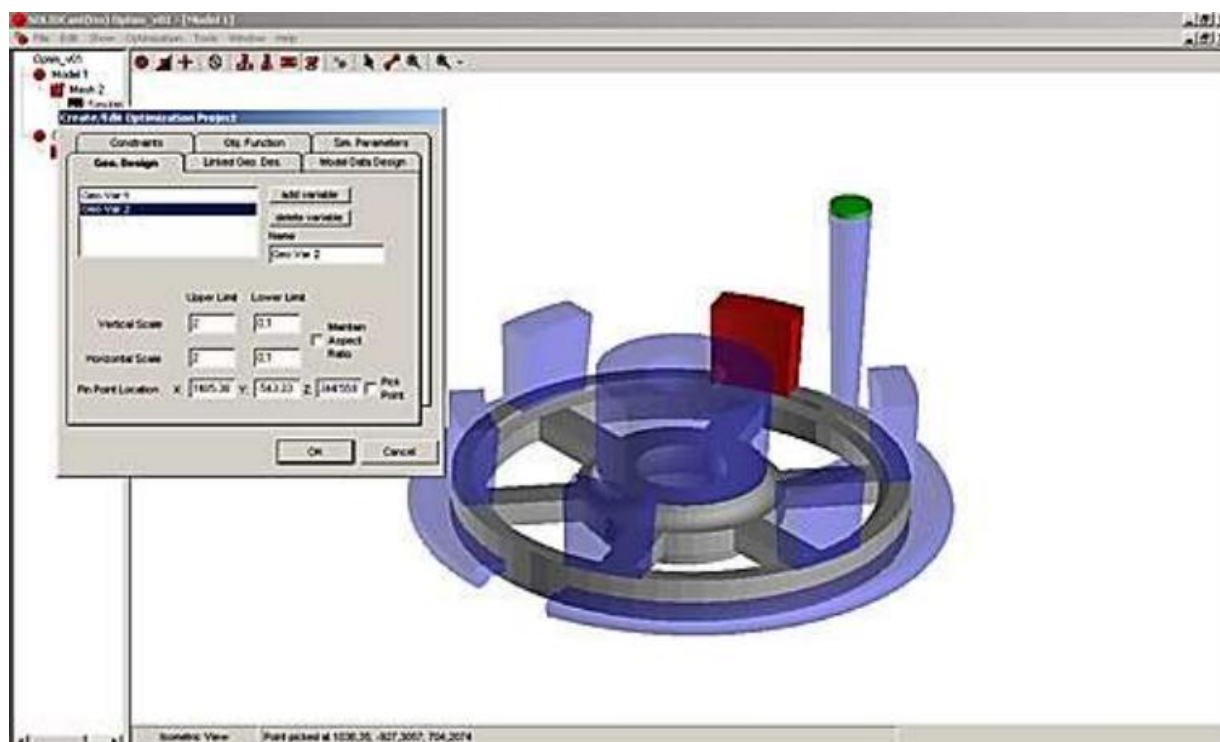


Рисунок 2.2 – Интерфейс программы SolidCast.

FLOW-3D обеспечивает моделирование течений со свободной поверхностью, используя метод конечных объёмов. Широко используется во всем мире, как в коммерческих, так и в научных проектах для решения сложных задач в самых разных областях [48].

Для создания поверхностной и объемной сетки FLOW-3D использует подход «свободное формирование сетки», который позволяет независимо между собой изменять сетку и геометрию модели.

Непрерывное литье возможно моделировать как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении, в том числе в динамическом режиме с непрерывным анализом температурных режимов. Есть возможность выполнить визуализацию теплораспределения и кристаллизации во время постобработки (рис 2.3), а также оценить охлаждение формы и заготовок, скорость течения расплава, перегрев, геометрию, движение и заполнение формы.

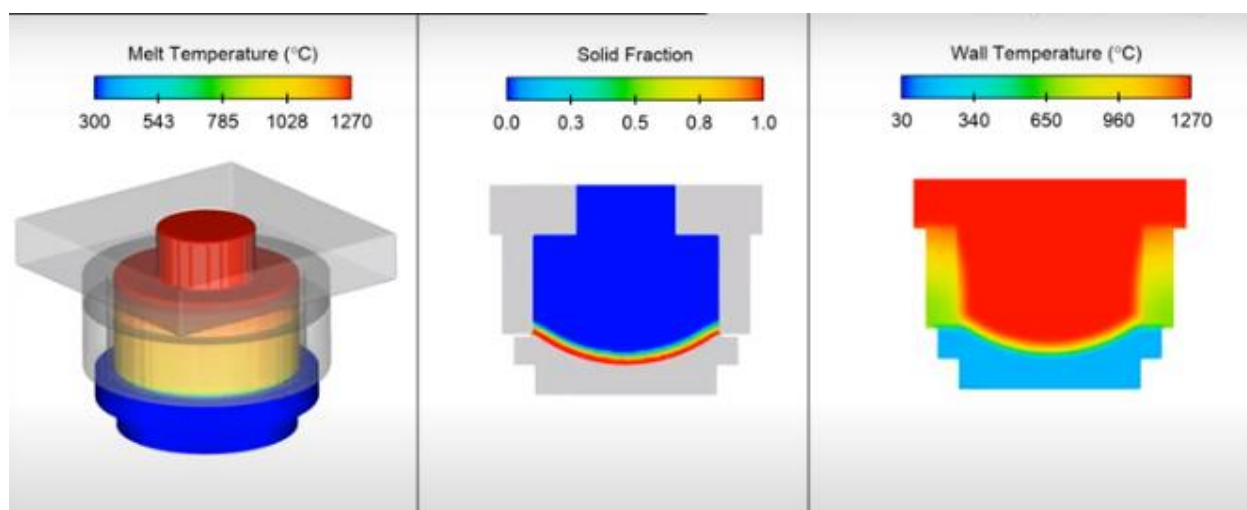


Рисунок 2.3 – Модель непрерывного литья с прямым охлаждением FLOW-3D.

ProCAST и Flow3D удовлетворяют требованиям по моделированию процесса непрерывного и полунепрерывного литья алюминиевых слитков. Имеют возможность выделить положение фронта кристаллизации, определить форму и размер лунки жидкой фазы, определить распределение температуры и твердой фазы в процессе литья.

Однако нет возможности интегрирования рассмотренного программного обеспечения в существующую систему АСУТП литейных каскадов по производству алюминиевых слитков, в первую очередь из-за длительного времени расчета. Интегрирование специально разработанных «быстрых» моделей даст возможность производить моделирование в реальном времени параллельно

протекающему процессу на действующем оборудовании, с использованием текущих технологических параметров.

Также в рассмотренном программном обеспечении не предусмотрено внесение в «виртуальный процесс» управляющих воздействий.

2.2. Моделирование литья плоских слитков в ProCast

Как выше было отмечено, для системы управления необходимы упрощенные модели, в которых время расчета технологических ситуаций опережает реальное время. Но указанное выше программное обеспечение мы будем использовать для тестовых расчетов и проверки адекватности своих разработанных моделей. Иметь такой инструмент проверки адекватности важно, так как очень мало возможности натуральных измерений на реальном объекте.

Рассмотренное ПО имеет достаточно широкий функционал, позволяющий решать тепловые и гидродинамические задачи, а также производить расчет напряженно-деформированного состояния системы, тем самым определяя такие дефекты как пористость, трещины, деформации и т.д. [49, 50].

Но в нашем случае, ограничимся процессами теплораспределения и кристаллизации, анализа которых будет достаточно для определения адекватности разработанной математической модели процесса литья плоских слитков для решения задач автоматизации.

Возможность моделирования процесса полунепрерывного литья осуществляется как в стационарном, так и в динамическом (MiLEAlgorithm) режиме. Динамический режим основывается на функции Accordion, которая заключается в том, что при настройке модели, задается область, изначально состоящая из определенного количества слоев нулевой толщины. Но далее, в процессе литья, эта область постепенно раскрывается, таким образом увеличивается длина слитка. Геометрическая модель для данного режима должна иметь вид начального положения компонентов литейной машины, то есть донник находится внутри кристаллизатора. Затем, когда начинается процесс непрерывной

литья (рис. 2.4), нижний домен (2) перемещается вниз (в то время как домен 1 остается в том же положении).

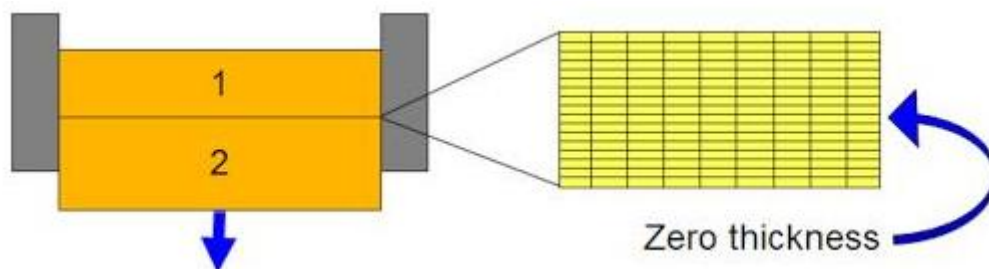


Рисунок 2.4. Принцип действия MiLEAlgorithm.

Была проведена подробная настройка модели в программном обеспечении для достижения необходимой точности результатов. Настройка включала следующие шаги:

1. Работа в пакете Visual-Mesh. Геометрическое моделирование включало в себя построение трехмерной модели слитка, донника и кристаллизатора с учетом их формы, размеров и расположения относительно друг друга, проверку геометрии на ошибки, построение поверхностной и объемной сетки (рис. 2.5). Тело слитка было разделено на две части, с целью применения функции Accordion между ними.

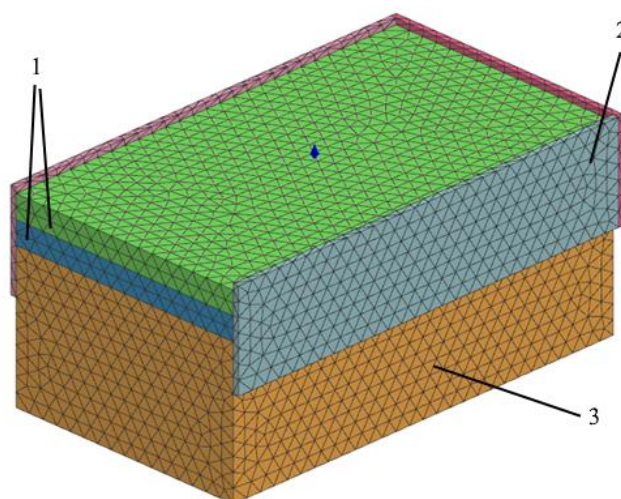


Рисунок 2.5. Объемная модель для полунепрерывного литья (размер ячейки сетки 25 мм): 1 – слиток; 2 – кристаллизатор; 3 – донник.

2. Работа в пакете Visual-Cast. На данном этапе были указаны свойства материалов, используемых для литья, температура плавления, теплоемкость, коэффициенты теплообмена для всех участвующих в процессе сред и другие параметры, которые будут влиять на процесс литья и распределение температуры.

SL	Name	Type	Entity	Boundary Cond.	Area(Sq. mm)
1	Accordion_1	Accordion	INTF_PART_1_1_PART_1_2 INTF_PART_1_2_PART_1_1	BC_Accordion_1	560000.0000
2	Periodic_1	Periodic	INTF_PART_1_1_PART_1_2 INTF_PART_1_2_PART_1_1	...	560000.0000
3	Translate v(t)_1	Translate v(t)	PART_1_2 PART_1_7	BC_Translate v(t)_1	
4	Heat_1	Heat	USER_Heat_1	BC_Heat_4	361225.6560
5	Heat_2	Heat	USER_Heat_2	BC_Heat_2	88000.0000
6	Heat_3	Heat	USER_Heat_3	BC_Heat_5	830000.0000
7	Temperature_1	Temperature	USER_Temperature_1	T=690C	234223.2385

Рисунок 2.6. Раздел Process Condition Manager.

Также в разделе Process Condition Manager выполнено описание условий процесса. Охлаждение было описано тремя отдельными условиями:

- Первичное охлаждение кристаллизатора (коэффициент теплоотдачи - 2000 Вт/(м·К), средняя температура охлаждающей воды в зоне первичного охлаждения - 25 °С);

- Охлаждение донника (коэффициент теплоотдачи - 3000 Вт/(м·К), средняя температура охлаждающей воды - 40 °С);

- Вторичное охлаждение слитка (коэффициент теплоотдачи - 3000 Вт/(м·К), средняя температура охлаждающей воды в зоне вторичного охлаждения - 40 °С).

Помимо этого, для того чтобы исключить задвоение условий охлаждения внутри кристаллизатора, коэффициент теплоотдачи для зоны вторичного охлаждения необходимо задавать с помощью пользовательской функции (рис. 2.7).

```

real hcoeff ;
hcoeff = 0;
if (z_coor < -0.15 )
hcoeff = 3000. ;
else
hcoeff = 0. ;
return hcoeff ;

```

Рисунок 2.7. Функция определения коэффициента теплоотдачи.

Скорость движение донника и нижней части слитка задана функцией $\text{Translate}(t)$, со скоростью 65 мм/мин. Температура металла в центральном канале 690 °С. Количество слоёв для функции accordion – 1000, толщиной 5 мм.

3. Работа в пакете Visual-Viewer. На данном этапе производится анализ теплораспределения и распределение твердой фазы в сплаве (рис. 2.8).

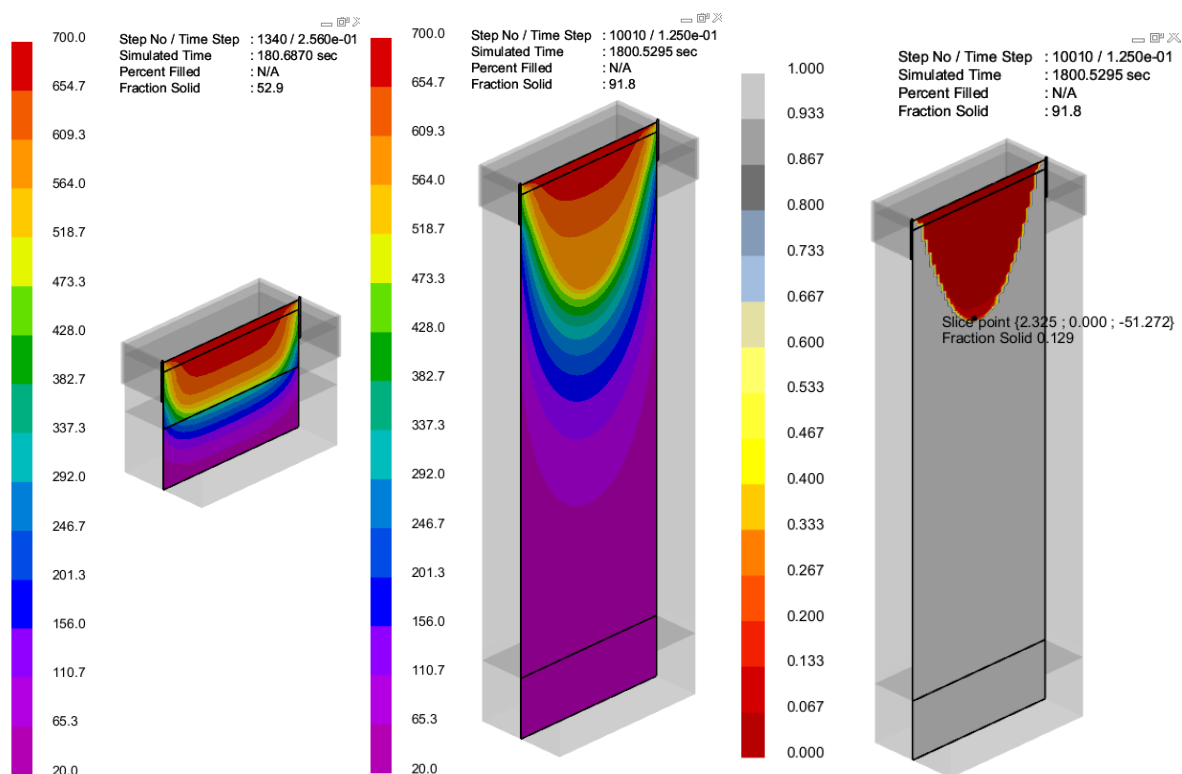


Рисунок 2.8. Результаты моделирования литья слитка: 1 – теплораспределение $t=180$ с, 2 – теплораспределение $t=1800$ с, 3 – кристаллизация $t=1800$ с.

На рисунке 2.8 представлена визуализация теплораспределения в слитке в момент времени $t=180$ с и $t=1800$ с, а также распределение фракций и отношение жидкой и твердой фазы в момент времени $t=1800$ с.

2.3 Разработка моделей составляющих литейного агрегата

Литье слитков из сплавов на основе алюминия производят преимущественно методом полунепрерывного литья. Для этого используют литейные агрегаты, состоящие из миксеров, металлотракта и литейных машин. В соответствии с рассмотренным выше технологическим процессом для разработки полной цифровой модели работы литейного агрегата, аппаратов и их взаимодействия, нужно рассматривать нагрев металла в миксере, выпускание металла из миксера, протекание металла по металлотракту, розлив металл в отделения литейной машины и, собственно, сам процесс отлива слитков. Последний пункт самый сложный и многостадийный.

2.3.1 Подача металла из миксера в металлотракт

Электрические отражательные печи (миксеры) предназначены для приготовления расплава, поддержания его заданной температуры и подачи расплава на литейную машину [5].

Миксер оснащен необходимой лоткой, для перелива расплавленного металла в металлотракт с целью его подачи в литейную машину. Необходима возможность регулирования количества поступающего из миксера металла для поддержания требуемого уровня в металлотракте. В зависимости от типа миксера – поворотный либо стационарный, используются разные методы регулирования подачи металла.

Поворотный миксер

В поворотном миксере (рис. 2.9) лотка расположена выше уровня металла, а его подача осуществляется с помощью наклона миксера в сторону лотки и далее металл движется самотеком [8]. Количество выходящего металла регулируется углом наклона миксера с постоянным контролем человека.

Рассмотрим один из реализованных примеров автоматического регулирования уровня металла. Задается необходимый уровень металла в разливочном лотке. На основе заданного и измеренного значения, на основе

некоторой эмпирической зависимости, ПИД-регулятор в СРУ литейной машины формирует управляющий сигнал в процентах (%). Далее в СРУ поворотного миксера этот управляющий сигнал используется как уставка задания скорости поворота. Исходя из заданной скорости поворота в СРУ производится расчет необходимого угла наклона (градусы). Далее ПИД-регулятор, основываясь на значении текущего угла поворота миксера и необходимого угла, формирует сигнал управления на гидрораспределитель [51].

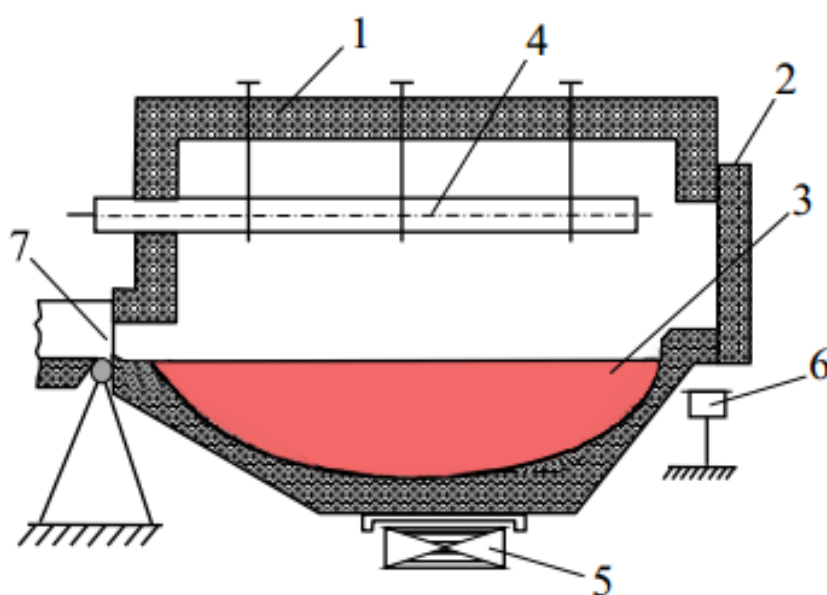


Рисунок 2.9 – Эскиз поворотного электрического миксера: 1 – футерованная огнеупорным материалом ванна; 2 – форкамера; 3 – расплав; 4 – нагревательные элементы; 5 – МГД-перемешиватель; 6 – гидроцилиндр подъема; 7 – летка.

Предложим модель для управления подачей металла из миксера.

В случае стационарного миксера широкое распространение на сегодняшний день имеет следующий способ подачи. Летка расположена в нижней части стенки миксера. Регулирование расхода металла происходит вручную с помощью пики из огнеупорного материала [5]. Литейщик должен постоянно визуально контролировать уровень металла в лотке и при необходимости изменять количество поступающего металла перемещением пики (рис. 2.10). Известно

усовершенствование данного способа с помощью внедрения позиционера с электроприводом (для регулирования расхода металла и управления перемещением пики) и оптического лазера (для измерения уровня металла в лотке) [5]. Но алгоритм автоматического управления позиционером в литературе не описан.

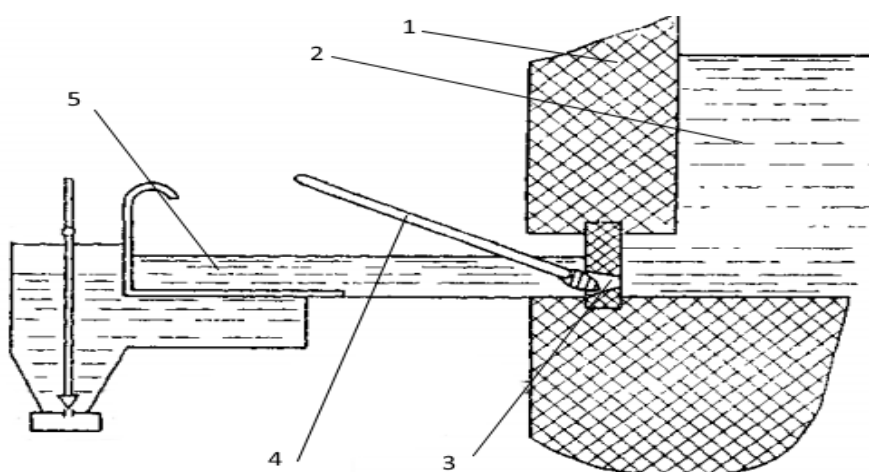


Рисунок 2.10 – Схема регулирования уровня расплава: 1 – миксер; 2 – металл; 3 – лотка; 4 – пика; 5 – лоток

Модель для стационарного миксера

Для стационарного миксера при поддержании уровня металла в лотке H_M необходимо контролировать объем металла V_M , поступающего из миксера.

Тогда разницу между необходимым уровнем и измеренным можно записать как:

$$\Delta H_M = \frac{V_{M\text{зад}} - V_{M\text{тек}}}{S_{\text{сеч.л}}} \quad (2.3.1)$$

где $V_{M\text{зад}}$ – объем металла в лотке при достижении заданного H_M , $V_{M\text{тек}}$ – текущий объем металла в лотке, $S_{\text{сеч.л}}$ – площадь поперечного сечения лотка.

Из формулы 2.3.1.1 видим, что $\Delta H_M \rightarrow 0$ при $\Delta V \rightarrow 0$. Это отклонение высоты от заданной мы можем измерить с помощью оптического лазера

$$\Delta H_M = \Delta V / S_{сеч. л} \quad (2.3.2)$$

Отсюда находим ΔV , которое надо ликвидировать за счет открывания отверстия в миксере.

$$\Delta V = \Delta H_M \cdot S_{сеч. л} \quad (2.3.3)$$

Эта величина может быть как положительной, так и отрицательной. Если она положительная, надо добавлять металл, если отрицательной, надо прекратить или уменьшить подачу металла.

Для определения скорости металла, вытекающего из летки, используется закон Торричелли: $v = \mu \sqrt{2gh}$.

Тогда расход металла через летку можно рассчитать:

$$Q_M = S_{летки} \cdot n \cdot \mu \sqrt{2gh}, \quad (2.3.4)$$

где $S_{летки}$ – площадь поперечного сечения летки, n – процент открытия летки, h – уровень металла в миксере, μ – динамическая вязкость жидкого металла.

Тогда можем найти время открытия (закрытия) задвижки при полном открытии (закрытии) задвижки, либо время при открытии задвижки с фиксированным n задвижки.

$$t = \Delta V / Q_M, \quad (2.3.5)$$

Расход металла, необходимый для обеспечения стабильного уровня металла в кристаллизаторах, можно получить, зная площадь поперечного сечения кристаллизатора $S_{сеч.кр}$ и скорость движения платформы $v_{пт}$:

$$Q_M = S_{сеч.кр} \cdot v_{пт} \cdot m \quad (2.3.6)$$

где m – количество кристаллизаторов.

Исходя из формулы 4 и зная расход металла из формулы 6 можно получить n – необходимый процент открытия летки, для поддержания равенства расхода металла на летке и на кристаллизаторах.

$$n = \frac{Q_M}{S_{\text{летки}} \cdot \mu \sqrt{2gh}} \quad (2.3.7)$$

Перед началом ходки известен уровень металла в миксере h , от объема поступившего в миксер металла и габаритов миксера. Далее объем металла в миксере начинает уменьшаться пропорционально объему металла, поступившему в кристаллизаторы литейной машины. Вследствие этого, уменьшается и h металла в миксере, что имеет влияние на скорость течения металла через летку.

Во время процесса литья уровень металла в миксере изменяется за некоторый промежуток времени Δt на величину $\Delta h = \frac{Q_M \cdot \Delta t}{S_{\text{микс}}}$, где

$S_{\text{микс}}$ – площадь зеркала металла в миксере.

После непосредственного начала литья происходит стадия разгона – скорость движения литейной платформы плавно возрастает, пока не достигнет скорости рабочего хода. Следовательно, расход металла тоже увеличивается (формула 2.3.6). Тогда $h_i = h_{i-1} + \Delta h$.

На основе приведенных формул и технических данных литейного агрегата было произведено математическое моделирование с целью определения необходимого процента открытия летки стационарного миксера.

На рисунке 2.11 изображен график изменения скорости движения литейной платформы и процент открытия летки, который обеспечивает такой расход металла, чтобы уровень в лотке сохранялся неизменным. Аналогичный график изображен на рисунке 2.12 для стадии рабочего хода.

На основе представленной модели был разработан алгоритм управления подачей металла. В работе [52, 53] нами приводится модель для расчета необходимого наклона поворотного миксера.

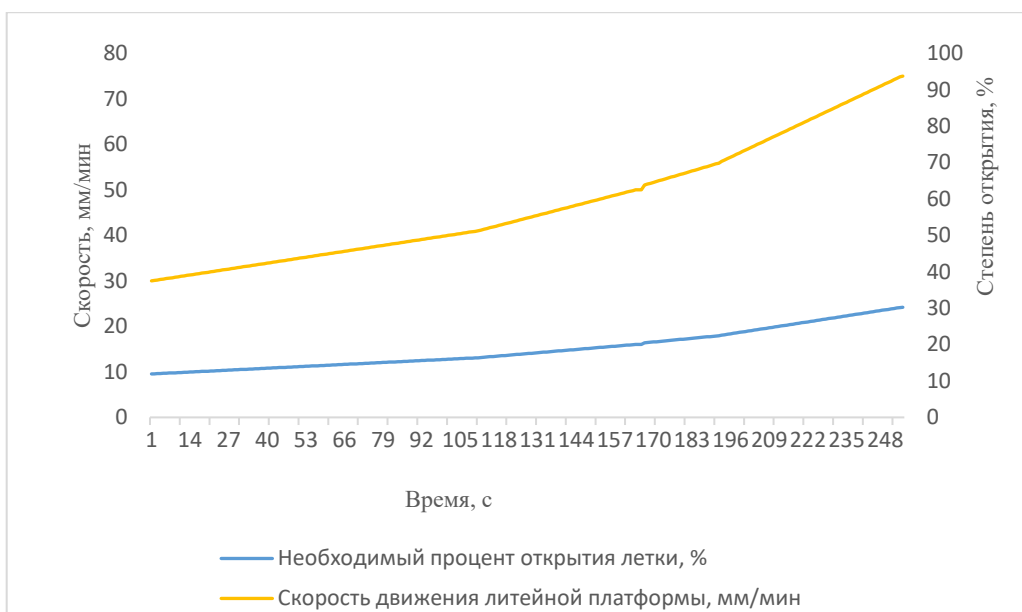


Рисунок 2.11 – Необходимый процент открытия летки при разгоне

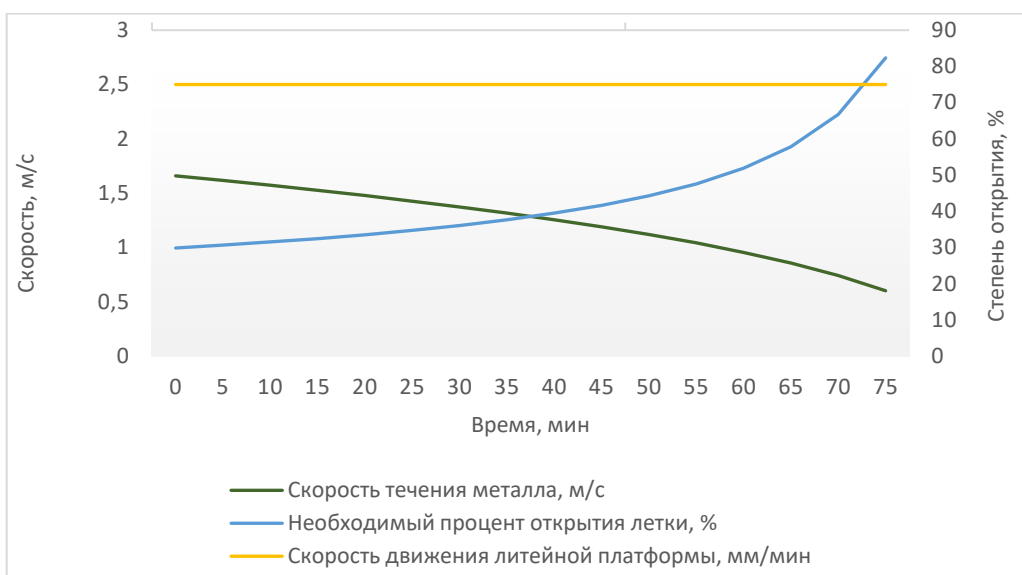


Рисунок 2.12 – Необходимый процент открытия летки в режиме рабочего хода

Как упоминалось ранее, в поворотном миксере для регулирования расхода металла необходимо управлять углом наклона миксера. Чтобы обеспечить постоянный расход металла Q_m , печь должна выливать металл с постоянной скоростью (2.3.8):

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{\alpha_0 - \alpha_{\text{конечн}}}{T} \quad (2.3.8)$$

где $\frac{d\alpha}{dt}$ – скорость изменения угла наклона миксера, °С/с; α_0 – угол наклона миксера, при котором начинается выливка металла, °С; $\alpha_{\text{конечн}}$ – максимальный угол наклона миксера, °С; T – время, за которое с заданным расходом выливается весь металл, с.

$$\alpha_0 = \text{arcctg} \left(\frac{2 \cdot V_{\text{пустоты}}}{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot d} \right) \quad (2.3.9)$$

где d – диаметр миксера на уровне поверхности металла, м; $V_{\text{пустоты}}$ – объём, не занятый металлом в миксере, находящемся в вертикальном положении, м³.

2.3.2 Модель охлаждения металла при движении по металлотрактору

Первым узлом агрегата является миксер для приготовления расплава. Нам известна температура металла на выходе из миксера, поступающая в металлотракт $T_{\text{Мо}}$.

При установившейся скорости литья $U_{\text{л}}$, мм/мин и размере одного кристаллизатора 700x400 мм, расход металла на литейном столе из 4 кристаллизаторов будет равен:

$$Q_M = 4 \cdot S_{\text{кр}} \cdot U_{\text{л}} \quad (2.3.10)$$

Где Q_M – расход металла, м³/ч; $S_{\text{кр}}$ – площадь поперечного сечения кристаллизатора, м².

При условии, что уровень в лотке поддерживается на одном уровне, можно считать расход металла в лотке равным расходу на литейном столе. Зная размеры лотка, рассчитываем площадь его поперечного сечения $S_{\text{л}}$, м².

Тогда скорость движения металла в лотке U_M , м/с, при его заполнении на 80 %:

$$U_M = \frac{Q_M}{S_{\text{л}} \cdot 0,8} \quad (2.3.11)$$

Для расчёта температуры металла в лотке используем уравнение теплопроводности для движущейся среды. В стационарном случае, пренебрегая теплопроводностью по сравнению с адвективным переносом, аналогично работе [43], получаем уравнение:

$$\rho \cdot c \cdot U_M \cdot \frac{dT_M}{dx} = -K_{M-B}(T_M - T_B) - K_{M-ДН}(T_M - T_{ДН}) - K_{M-СТ}(T_M - T_{СТ}) \quad (2.3.12)$$

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/м²·К; $K_{M-ДН}$ - коэффициент теплообмена металл-дно, Вт/м²; K_{M-B} - коэффициент теплообмена металл-воздух, Вт/м²; $T_{СТ}$ - температура стенок, °С; $T_{ДН}$ - температура дна, °С; T_B - температура воздуха, °С.

Начальное условие для уравнения (2.3.12):

$$T_M(x_0) = T_{M_0}$$

Найдем его аналитическое решение:

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

Обозначим $k = K_{M-B} + K_{M-ДН} + K_{M-СТ}$, $a = K_{M-B} \cdot T_B + K_{M-ДН} \cdot T_{ДН} + K_{M-СТ} \cdot T_{СТ}$

$$\int \frac{dT_M}{-T_M \cdot k + a} = \int \frac{dx}{\rho \cdot c \cdot U_M}$$

$$\frac{1}{\rho \cdot c \cdot U_M} = b$$

$$\ln|T_M \cdot k - a| = -b \cdot x + C$$

$$|T_M \cdot k - a| = e^{-b \cdot x + C}$$

$$T_M \cdot k - a = \pm e^C \cdot e^{-b \cdot x + C}$$

$$\pm e^C = C_1$$

$$T_M = \frac{C_1 \cdot e^{-b \cdot x} + a}{k}$$

$$T_{M_0} = \frac{C_1 \cdot e^{-b \cdot 0} + a}{k} = \frac{C_1 + a}{k} \Rightarrow C_1 = T_{M_0} \cdot k - a$$

$$T_M = \frac{(T_{M(0)} \cdot k - a) \cdot e^{-b \cdot x} + a}{k} \quad (2.3.13)$$

В таблице 2.1 представлены исходные данные для расчетов.

Таблица 2.1 – Исходные данные.

Параметр	Значение	Размерность
Плотность жидкой фазы алюминия (ρ)	2450	кг/м ³
Теплоёмкость жидкой фазы алюминия (c)	1100	Дж/(кг·К)
Скорость литья (U_L)	75	мм/мин
Площадь кристаллизатора (S_{KR})	0,28	м ²
Площадь поперечного сечения лотка (S_L)	0,0279	м ²
Коэффициент теплообмена металл-стенки (K_{M-CT})	400	Вт/м ² ·К
Коэффициент теплообмена металл-дно ($K_{M-ДН}$)	400	Вт/м ² ·К
Коэффициент теплообмена металл-воздух ($K_{M-В}$)	50	Вт/м ² ·К
Температура стенок (T_{CT})	80	°С
Температура дна ($T_{ДН}$)	90	°С
Температура воздуха ($T_{В}$)	20	°С
Начальная температура металла (T_0)	705	°С
Длина лотка	2,5	м

В таблице 2.2 приведены результаты расчета остывания металла по формуле 2.3.13.

Таблица 2.2 – Моделирование охлаждения металла в тракте.

Расстояние от летки, м	$T_m(x)$, °C	Расстояние от летки, м	$T_m(x)$, °C	Расстояние от летки, м	$T_m(x)$, °C
0	705	0,9	701,65	1,8	698,31
0,1	704,62	1	701,27	1,9	697,95
0,2	704,25	1,1	700,90	2	697,58
0,3	703,88	1,2	700,53	2,1	697,21
0,4	703,50	1,3	700,16	2,2	696,84
0,5	703,13	1,4	699,79	2,3	696,47
0,6	702,76	1,5	699,42	2,4	696,10
0,7	702,39	1,6	699,05	2,5	695,74
0,8	702,02	1,7	698,68		

Модель учитывает ряд факторов, таких как начальная температура металла, геометрические параметры металлотректа, теплопроводность материалов, скорость потока и температура охлаждающей среды.

Результаты, полученные с помощью представленной модели охлаждения металла при прохождении по металлотректу, 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 металлотректа, шаг измерения по длине – 10 см. Сравнение показало хорошее согласование между моделью и измерениями, что подтверждает адекватность модели [54].

2.3.3 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, как делают авторы статей [55 - 63]. Но наша задача сделать упрощенные модели и схемы для быстрых расчетов в АСУТП. При этом проблему трехмерного процесса попытаемся разложить в двух измерениях: по высоте слитка; по ширине слитка.

Также процессы нужно разделить по стадиям литья: начальная стадия – заполнение форм; стадия разгона – постепенное увеличение скорости литья и расхода воды; установившийся режим – движение платформы с постоянной скоростью.

Изложенные ниже модели подходят для всех стадий, но расчеты будем выполнять для установившегося режима, с постоянной скоростью опускания литейной платформы.

На рисунке 2.13 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, охлаждается кристаллизатор;
- III. Начало подачи воды на стенки слитка, присутствует лунка;
- IV. Все поверхности в воде, лунка отсутствует.

Глубину лунки в плоских слитках можно выразить равенством из [8, 64]:

$$h_{л} = \frac{[q + \frac{1}{2}c \cdot p(T_{кр} - T_{н})] \cdot U_{л} b^2}{2\lambda \cdot (T_{кр} - T_{н})}. \quad (2.3.14)$$

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; $T_{н}$ – температура наружной поверхности, °С.

В дальнейшем глубина лунки может быть пересчитана при моделировании теплообмена.

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.

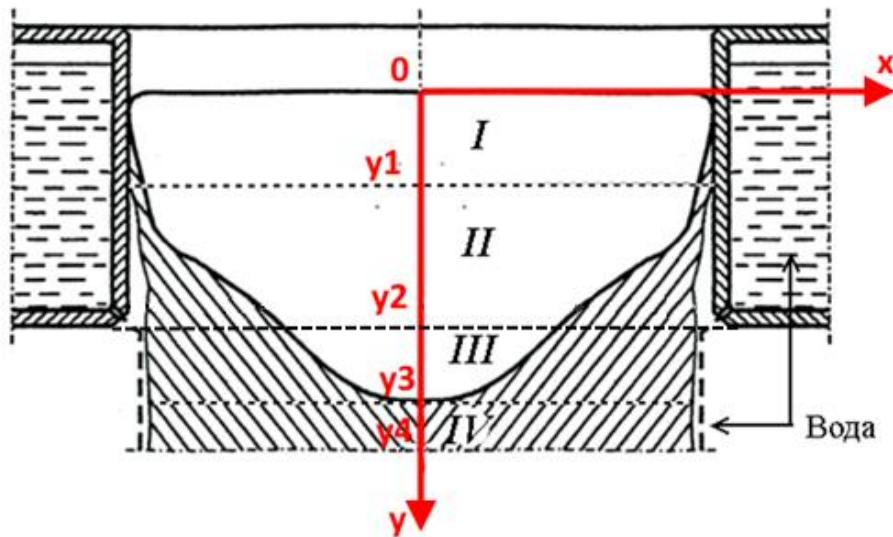


Рисунок 2.13 - Разделение слитка на области в процессе литья. Введение системы координат.

Распределение температур по высоте слитка с учетом скорости его движения рассматриваем аналогично модели распределения температуры и кристаллизации движущегося металла в литейном колесе [65]. Рассматриваем движение по оси y и соответственно температуру только по этой оси $\hat{T}(t, y)$. Более того, сделаем допущения, что все динамические изменения по оси y заключаются в изменении скорости литья, в нашей терминологии скорости движения металла.

Полное уравнение распределения тепла в движущихся средах приводиться, например, в [66]. В наших допущениях, исходным является следующее уравнение:

$$\rho C U_{\text{л}} \frac{\partial T}{\partial y} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q. \quad (2.3.15)$$

Где T – температура движущейся среды, °С; ρ – плотность, кг/м³; C – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К; Q – внутренние источники тепла, Дж; x, y – координаты.

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

$$\hat{T} = \frac{1}{\delta} \int_{-X/2}^{X/2} T(x, y) dx. \quad (2.3.16)$$

Здесь δ – толщина слитка (по длинной стороне), м, $\delta = X$ – продольный размер слитка. Проинтегрируем уравнение (6) по толщине слитка:

$$\rho C U_{\text{л}} \frac{d\hat{T}}{dy} = \frac{\lambda}{\delta} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=-\frac{X}{2}} - \frac{\lambda}{\delta} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\frac{X}{2}} + Q. \quad (2.3.15)$$

$$Q = L \cdot \frac{dm}{V_{\text{cris}} dt}.$$

L – удельное тепло кристаллизации металла, Дж/кг; $\frac{dm}{dt}$ – скорость кристаллизации, кг/с; $V_{\text{cris}} (\text{м}^3)$ – объем, в котором происходит кристаллизация, м³.

Используем граничные условия:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=-\frac{X}{2}} = \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\frac{X}{2}} = \alpha_i (\hat{T}_M - T_i), \quad (2.3.16)$$

T_i – температура внешней среды на текущей стадии расчета ($i = 1, 2, 3, 4$ – кристаллизатор, зазор, вода, вода) и α_i – соответствующий коэффициент теплообмена.

Тогда получим следующее уравнение изменения температуры в слитке по высоте:

$$\rho C U \frac{d\hat{T}}{dy} = -\frac{2\alpha_i}{\delta} (\hat{T} - T_i) + Q. \quad (2.3.17)$$

Начальным условием для уравнения (2.3.17) является температура металла на выходе из металлотректа, рассчитанная по формуле (2.3.13), источники Q присутствуют в областях I, II, III за счет выделения тепла при кристаллизации металла.

Сформулируем краевые задачи для процесса теплообмена по сечению слитка в выделенных областях.

Область I характеризуется координатами $0 \leq y \leq y_1; \frac{X}{4} \leq x \leq \frac{X}{2}$ (рис.1),

используется одномерное уравнение теплопроводности:

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}. \quad (2.3.18)$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} T_1 \Big|_{x=\frac{X}{4}} &= \hat{T}(y_1/2) = \hat{T}_I \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=\frac{X}{2}} &= -\alpha_1 (T_1 - T_{KP}) \end{aligned} \quad (2.3.19)$$

T_{KP} - температура кристаллизатора. Начальное условие: $T_1(x, 0) = T_M$

Область II - $y_1 \leq y \leq y_2; \frac{X}{4} \leq x \leq \frac{X}{2}$

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}. \quad (2.3.20)$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} T_2 \Big|_{x=\frac{X}{4}} &= \hat{T}(y_1 + \frac{y_2 - y_1}{2}) = \hat{T}_{II} \\ \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=\frac{X}{2}} &= -\alpha_2 (T_2 - T_{ВОЗД}) \end{aligned} \quad (2.3.21)$$

Начальное условие: $T_2(x, 0) = T_1(x, t_1)$, t_1 – время достижения металлом II области.

$$\text{Область III} - y_2 \leq y \leq y_3; \frac{X}{4} \leq x \leq \frac{X}{2}.$$

В этой области координата y_3 привязана к глубине лунки (2.3.14) и может меняться.

$$c_3 \rho_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2}. \quad (2.3.22)$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} T_3 \Big|_{x=\frac{X}{4}} &= \hat{T}(y_2 + \frac{y_3 - y_2}{2}) = \hat{T}_{III} \\ \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{x=\frac{X}{2}} &= -\alpha_3 (T_3 - T_{\text{ВОДЫ}}) \end{aligned} \quad (2.3.23)$$

Начальное условие: $T_3(x, 0) = T_2(x, t_2)$, t_2 – время выхода металла из II области.

Область IV - $y_3 \leq y \leq y_4$; $\frac{X}{4} \leq x \leq \frac{X}{2}$. В данной области металл полностью закристаллизовался, происходит охлаждение водой.

$$c_4 \rho_4 \frac{\partial T_4}{\partial t} = \lambda_4 \frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2}. \quad (2.3.24)$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} T_4 \Big|_{x=\frac{X}{4}} &= \hat{T}(y_3 + \frac{y_4 - y_3}{2}) = \hat{T}_{IV} \\ \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} \Big|_{x=\frac{X}{2}} &= -\alpha_4 (T_4 - T_{\text{ВОДЫ}}) \end{aligned} \quad (2.3.25)$$

Начальное условие: $T_4(x, 0) = T_3(x, t_3)$, t_3 – время выхода металла из III области.

2.3.4 Разностные схемы для расчета температуры слитка

Для перехода к численному решению задачи распространения температуры по высоте слитка, уравнение (2.3.17) представим разностной схемой, при условии, что T_{nc} (температура наружной стенки) различна для каждой области:

$$\rho CU \frac{T^n - T^{n-1}}{\Delta y} = -\frac{2\alpha_i}{\delta} (T^{n-1} - T_{nc}^n) + Q$$

$$T^n = T^{n-1} + \Delta y \cdot \frac{-\frac{2\alpha_i}{\delta} (T^{n-1} - T_{nc}^n) + Q}{\rho CU}. \quad (2.3.26)$$

Таким образом, по формуле (2.3.26) с установленными параметрами литья, мы получаем среднее по толщине слитка значение температуры $\hat{T}(y)$, которое мы будем по координатно использовать как начальное условие для расчета изменения температуры по толщине слитка.

Численное решение краевой задачи распространения температуры по ширине слитка находится по явной схеме. Вводится равномерная разностная сетка по координате $\Delta x = x_{i+1} - x_i$, $x_1 = X/4$, $x_{ii} = X/2$, $1 \leq i \leq ii$. Сеточные уравнения для внутренних точек, где Δt – шаг по времени (индекс n), запишутся:

$$c \cdot \rho \frac{T_i^n - T_i^{n-1}}{\Delta t} = \lambda \frac{(T_{i+1}^{n-1} - 2T_i^{n-1} + T_{i-1}^{n-1})}{\Delta x^2} \quad (2.3.27)$$

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

Среднее значение по высоте $T(y)$ подставляем на соответствующих высотах формирующегося слитка в координате по ширине равной $X/4$ так как из условий идентичности расчетов (в ProCast) средняя температура слитка находится между горячей серединой и холодной стенкой.

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

Представим граничное условие в разностном виде:

$$\begin{aligned} \lambda \cdot \frac{T_{ii} - T_{ii-1}}{\Delta x} &= -\alpha \cdot (T_{ii} - T_{HC}) \\ T_{ii} - T_{ii-1} &= \frac{-\alpha}{\lambda} \cdot \Delta x \cdot (T_{ii} - T_{HC}) \\ T_{ii} \left(\frac{\alpha}{\lambda} \cdot \Delta x + 1 \right) &= \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \Delta x \cdot T_{HC} + T_{ii-1} \\ T_{ii}^n &= \left(\frac{\alpha \cdot \Delta x}{\lambda} \cdot T_{HC} + T_{ii-1}^n \right) / \left(\frac{\alpha \cdot \Delta x}{\lambda} + 1 \right), \end{aligned} \quad (2.3.28)$$

где T_{HC} - температура наружной среды отличающаяся в областях, α коэффициент теплообмена с наружной средой, λ - теплопроводность металла в этой области слитка.

2.4 Расчет коэффициентов теплообмена для различных областей слитка

При моделировании процесса литья, как правило, подбираются статические коэффициенты теплообмена эмпирическим путем, без учета расхода охлаждающей жидкости [67 - 71].

Например, в работе [72] для зоны первичного и вторичного охлаждения используются статические коэффициенты теплообмена 1000 и 3000 Вт/(м·К). Авторы статьи [73], говорят о том, что множество факторов технологического и конструктивного характера, влияющих на теплообмен, осложняют вычисление коэффициентов теплообмена расчетным способом. Задачу определение коэффициентов теплообмена решают с помощью идентификации. В работе [65] была рассмотрена возможность учета расхода воды в коэффициенте теплообмена при моделировании охлаждения литейного колеса. Но расчеты проводились со статичным коэффициентом.

При разработке цифровой модели литья особенно важно учитывать коэффициенты теплообмена с зависимостью от расхода охлаждающей воды, так как это позволяет более точно смоделировать реальные условия процесса охлаждения. Для различных этапов литья расход воды может варьироваться в зависимости от температуры расплава, требуемой скорости охлаждения и характеристик оборудования. Учет этих изменений позволяет адекватно

отобразить динамику теплообмена между охлаждающей жидкостью и алюминиевым слитком, что влияет на точность модели.

Коэффициент теплообмена на границе вода-металл является динамическим и требует циклического пересчета в процессе моделирования получения слитка. Коэффициент зависит от расхода и температуры воды для охлаждения и является управляющим воздействием в задаче автоматизации. Существуют подходы для разработки методики его расчёта [76-77]. Для безопасности процесса и получения качественных слитков важно знать коэффициенты в зонах II и III.

В нашем случае зону II уместно рассматривать комбинированно с условиями:

- Верхняя часть зоны (10%) охлаждается за счёт струйной обдувки плоской поверхности из сопел одного диаметра, так как при охлаждении внешней поверхности кристаллизатора вода поступает из литейного стола через отверстия, расположенные в 2 ряда на расстоянии друг от друга и от поверхности.

- Нижняя часть (90%) охлаждается за счёт турбулентного движения среды по вертикальной плоской поверхности.

Для зоны III – турбулентное движение среды по вертикальной плоской поверхности, так как вертикальная поверхность слитка в этой зоне имеет достаточно высокую температуру, происходит пузырьковое кипение воды.

Расчёт коэффициента теплообмена для зоны II.

Учитывая описанные условия охлаждения во второй зоне, необходимо рассматривать комбинированный коэффициент охлаждения между водой и кристаллизатором:

$$\alpha_{II} = \frac{\alpha_{ВЕРХ} \cdot 0,1 + \alpha_{НИЗ} \cdot 0,9}{2} \quad (2.3.28)$$

При струйной обдувке плоской поверхности из сопел диаметром d , расположенных на расстоянии друг от друга s и от поверхности на расстоянии L , α_i находят по следующим формулам (2.3.28) - (2.3.30):

$$\alpha_{БЕРХ} = 0,332 \cdot \left(\frac{S}{d}\right)^{0,25} \cdot \text{Re}^{0,625} \cdot \text{Pr}_C^{0,33} \cdot \frac{\lambda_C}{s} \quad \text{при } 1 < \frac{L}{d} < 8, \quad (2.3.29)$$

$$\alpha_{БЕРХ} = 1,085 \cdot \left(\frac{S}{d}\right)^{0,25} \cdot \text{Re}^{0,625} \cdot \text{Pr}^{0,33} \cdot \frac{\lambda_C}{s} \quad \text{при } 8 < \frac{L}{d} < 50. \quad (2.3.30)$$

Здесь все параметры взяты при средней температуре среды и поверхности.

$$\text{Re} = w \cdot \frac{l}{\nu}, \quad (2.3.31)$$

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a},$$

где Re – критерий Рейнольдса; Pr – критерий Прандтля; l – характерный линейный размер (диаметр отверстий), m ; ν – коэффициент кинематической вязкости среды, m^2/c ; $a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$ – коэффициент температуропроводности среды, m^2/c ; здесь ρ – плотность среды, kg/m^3 , c – удельная теплоёмкость среды, $Дж/(кг \cdot K)$; λ – коэффициент теплопроводности среды, $Вт/(м \cdot K)$; w – скорость движения среды, m/c .

При охлаждении внешней поверхности кристаллизатора вода поступает из литейного стола через отверстия диаметром d , расположенных в 2 ряда на расстоянии S друг от друга и от поверхности на расстоянии L .

Расчеты проводим с учетом значений параметров таблицы 2.3. Для установившегося режима, когда в литье участвуют 4 кристаллизатора и отверстия для подачи воды на кристаллизатор расположены в 2 ряда, найдем скорость движения среды W через одно отверстие:

$$w = \frac{Q}{S_{сеч}} = \frac{Q_{общ} / (P_{крст} \cdot m \cdot n / (d + s))}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (2.3.32)$$

$$w = \frac{Q}{S_{сеч}} = \frac{220/3600 / (2,2 \cdot 4 \cdot 2 / (0,005 + 0,02))}{3,14 \cdot 0,005^2 / 4} \approx 4,42 \text{ м/с}$$

где Q – расход воды через одно отверстие, $\text{м}^3/\text{с}$; $S_{сеч}$ – площадь поперечного сечения отверстия, м^2 .

Таблица 2.3 - Значения параметров охлаждения

Обозначение	Наименование	Значение	4Единицы измерения
d	Диаметр сопел на литейном столе	0,005	м
s	Расстояние между соплами	0,02	м
L	Расстояние до поверхности кристаллизатора	0,02	м
ν	Коэффициент кинематической вязкости воды (при указанном значении температуры)	$0,903 \cdot 10^{-6}$ (25 °С) $0,549 \cdot 10^{-6}$ (50 °С) $0,282 \cdot 10^{-6}$ (100 °С)	$\text{м}^2/\text{с}$
ρ	Плотность воды (при указанном значении температуры)	997 (25 °С) 988 (50 °С) 917 (100 °С)	$\text{кг}/\text{м}^3$
c	Удельная теплоёмкость воды (при указанном значении температуры)	4180 (25 °С) 4180 (50 °С) 4320 (100 °С)	$\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$
λ	Коэффициент теплопроводности воды (при указанном значении температуры)	0,599 (25 °С) 0,648 (50 °С) 0,684 (100 °С)	$\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$
$Q_{общ}$	Расход воды на все кристаллизаторы	220	$\text{м}^3/\text{ч}$
m	Количество кристаллизаторов	4	шт
$P_{крист}$	Периметр одного кристаллизатора	2,2	м
n	Количество рядов с отверстиями для подачи воды	2	шт
ε_l	Коэффициент линейной усадки алюминия	1,7	%
x	Ширина слитка	0,7	м

Все параметры для среды в соответствии с [72] будем рассматривать при средней температуре среды и поверхности:

$$t_{CP} = 0,5 \cdot (t_c + t_{II})$$

$$t_{CP} = 0,5 \cdot (25 + 175) = 100 \text{ °С} \quad (2.3.32)$$

Так как отношение $\frac{L}{d} = \frac{0,02}{0,005} \approx 4$, то $\alpha_{БЕРХ}$ найдем по формуле (2.3.29).

Рассчитаем критерий Рейнольдса, характеризующий отношение сил инерции к силам вязкости в потоке и указывающий на режим течения среды:

$$Re = \frac{4,42 \cdot 0,005}{0,282 \cdot 10^{-6}} \approx 78425,8. \quad (2.3.33)$$

Учитывая, теплофизические параметры воды при температуре, близкой к 100 °С (таблица 2.3) получаем коэффициент теплообмена воды с поверхностью кристаллизатора:

$$\alpha_{БЕРХ} = 0,332 \cdot \left(\frac{0,02}{0,005}\right)^{0,25} \cdot 78425,8^{0,625} \cdot 1,67^{0,33} \cdot \left(\frac{0,684}{0,02}\right) \approx 21755,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (2.3.34)$$

Для расчёта коэффициента теплообмена нижней части зоны II, при турбулентном течении среды коэффициент $\alpha_{НИЗ}$ определяется по формуле (9)

$$\alpha_{НИЗ} = 0,021 Re_c^{0,8} \cdot Pr_c^{0,43} \cdot (Pr_c / Pr_{II})^{0,25} \cdot \frac{\lambda_c}{x} \quad (2.3.35)$$

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.

При расчете критерия Рейнольдса, считаем, что скорость движения среды такая же, как и в момент прохода через отверстия литейного стола. В качестве характерного линейного размера используем высоту второй зоны – 0,07 м. Тогда коэффициент теплообмена для нижней части 2 зоны можно рассчитать, как:

$$\alpha_{НИЗ} = 0,021 \cdot \left(\frac{4,42 \cdot 0,07}{0,282 \cdot 10^{-6}}\right)^{0,8} \cdot 1,67^{0,43} \cdot (1,67 / 3,54)^{0,25} \cdot \frac{0,683}{0,7} = 1899,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (2.3.36)$$

Согласно формуле (2.3.28):

$$\alpha_{II} = \frac{21755,9 \cdot 0,1 + 1899,4 \cdot 0,9}{2} = 1942,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (2.3.37)$$

С учетом того, что в зазоре между кристаллизатором и слитком параметры паровоздушной смеси являются нестабильными и неизвестными, эквивалентный комбинированный коэффициент теплообмена, учитывающий этот зазор, рассчитаем, как:

$$\alpha_{ЭКВ} = \frac{q_2}{t_{СЛ} - t_{КР}}, \quad (2.3.38)$$

где $t_{СЛ}$ - средняя температура поверхности слитка в области II, $t_{КР}$ - температура кристаллизатора, q_2 - удельный тепловой поток от кристаллизатора к слитку.

Считаем, что плотность теплового потока между водой и кристаллизатором равна плотности потока между кристаллизатором и слитком, $q_1 = q_2$.

$$\begin{aligned} q_1 = q_2 &= \alpha_{II} (t_{КР} - t_B) \\ q_1 = q_2 &= 1942,5 \cdot (150 - 25) = 242815,6 \text{ Вт}/\text{м}^2 \end{aligned} \quad (2.3.39)$$

Тогда эквивалентный коэффициент теплообмена для зоны 2 получится:

$$\alpha_{ЭКВ} = \frac{242815,6}{450 - 150} = 809,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (2.3.40)$$

Следует отметить особенную важность расчета коэффициента в этой зоне, так как правильное его определение в зависимости от расхода охлаждающей воды позволяет предсказать толщину застывшей части слитка при выходе из кристаллизатора непосредственно под струи воды.

Расчёт коэффициента теплообмена для зоны III.

Основными особенностями охлаждения слитка в 3 зоне являются следующие пункты:

1. Литье происходит в наполненный кессон, но данный участок еще не находится в общем объеме воды;
2. Вода стекает вертикально вниз, расход воды соответствует расходу на кристаллизаторах.

Исходя из вышеприведённых условий, для расчёта коэффициента теплообмена будем опираться на ситуацию – турбулентное движение среды по вертикальной плоской поверхности.

При турбулентном течении среды коэффициент α_{III} определяется по формуле (2.3.41)

$$\alpha_{III} = 0,021 Re_c^{0,8} \cdot Pr_c^{0,43} \cdot (Pr_c / Pr_{II})^{0,25} \cdot \frac{\lambda_c}{x}, \quad (2.3.41)$$

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.

При расчете критерия Рейнольдса, считаем, что скорость движения среды такая же, как и в момент прохода через отверстия литейного стола. В качестве характерного линейного размера используем высоту II-ей зоны 0,25м. Будем учитывать, что начальная температура воды в зоне вторичного охлаждения 50 °С.

$$Re_c = \frac{4,42 \cdot 0,25}{0,549 \cdot 10^{-6}} = 2014213. \quad (2.3.42)$$

Тогда коэффициент теплообмена для III зоны можно рассчитать, как,

$$\alpha_3 = 0,021 \cdot 2014213,58^{0,8} \cdot 1,67^{0,43} \cdot (1,67 / 1,17)^{0,25} \cdot \frac{0,683}{0,7} = 3088,75 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (2.3.43)$$

Следует отметить, что нами не рассмотрено пузырьковое кипение воды на стенках слитка в зоне III, коэффициент α_{III} при этом будет меньше рассчитанного.

Но эта сложная задача выходит за рамки потребности моделирования для управления процессом.

Проведем расчёт коэффициентов теплообмена для технологических параметров литья слитков АТЧ 400х700 в кристаллизатор скольжения. Параметры взяты из открытых источников [5,8].

Таблица 2.4 - Технологический рецепт для литья слитков АТЧ 400х700

Ступень разгона	Начальная	T1	T2	T3	T4	T5
Скорость литья, мм/мин	25	30	35	40	55	65
Расход воды, м ³ /час	90	100	110	150	180	220
Коэфф. тепл область 2, Вт/(м ² ·К)	433	466	498	618	703	809
Коэфф. тепл область 3, Вт/(м ² ·К)	1510	1643	1774	2273	2630	3088

В таблице 2.4 приведены 5 ступеней разгона (Т1-Т5) и требуемые технологические параметры скорости литья и расхода охлаждающей воды для каждой ступени. В соответствии с требуемыми параметрами рассчитан коэффициент теплообмена для области 2 и 3 по формулам (2.3.38), (2.3.41).

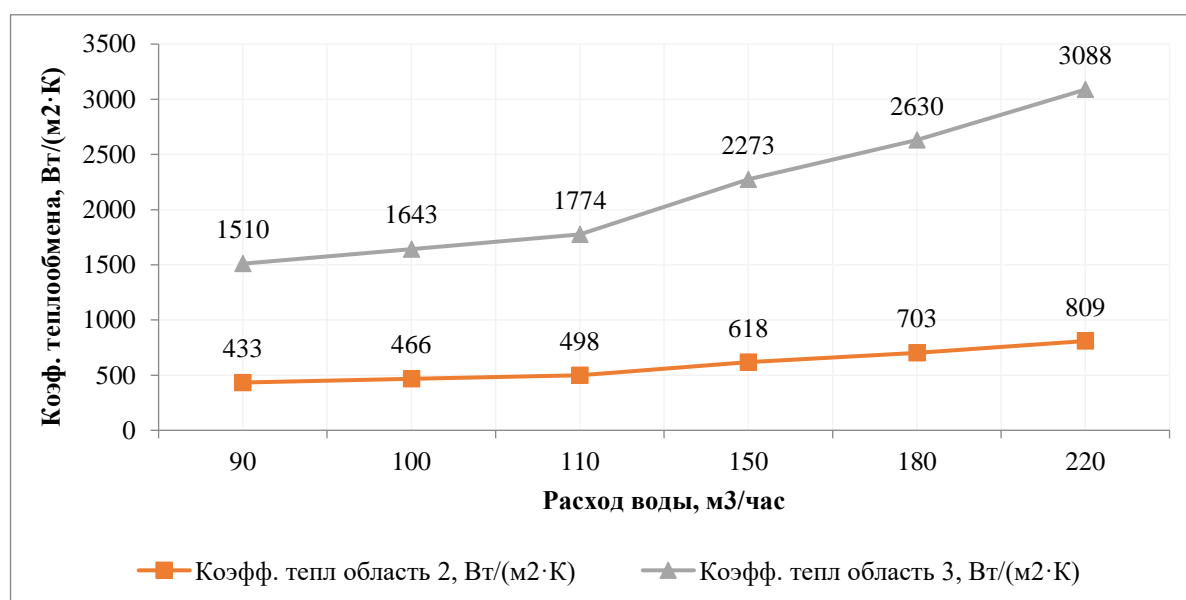


Рисунок 2.13 - График зависимости коэффициентов теплообмена для области 2 и 3 от расхода охлаждающей воды.

2.5 Расчетный алгоритм для модели литейной машины

Порядок расчета по имитационной модели работы литейной машины будет следующий:

1. В качестве начальных данные по температуре металла, используем температуру металла в раздаточном миксере. По формуле 2.3.13, 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 (2.3.14). Получаем значение высоты каждой области.

3. Производим расчёт динамических коэффициентов теплообмена для областей 2 и 3 в зависимости от расхода охлаждающей воды, формулы (2.3.38, 2.3.41) [76].

4. Численно решая уравнение (2.3.17), получаем распределение температуры по высоте слитка. Используем значение температуры внешней среды и коэффициенты теплообмена в зависимости от областей.

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 задачу (2.3.18) - (2.3.19), в течении времени нахождения металла в области I. Время нахождения металла в области (t_1) определяем по формуле:

$$t_1 = h_1 / U_{\text{л}} \quad (2.3.44)$$

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 (2.3.20) - (2.3.21), в течении времени нахождения металла в области II. Время нахождения металла в области (t_2) определяем по формуле:

$$t_2 = h_2/U_{\lambda} \quad (2.3.45)$$

7. В качестве начальных условий используем значение распределения температуры по ширине из области II в момент времени t_2 . Производим расчёт по толщине слитка и температуру стенок слитка, численно решая задачу (2.3.22) - (2.3.23), в течении времени нахождения металла в области III. Время нахождения металла в области (t_3) определяем по формуле:

$$t_3 = h_3/U_{\lambda} \quad (2.3.46)$$

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, численно решая задачу (2.3.24) - (2.3.25). В качестве контрольной точки рассматриваем срез на длине 1 м. Тогда время выдержки металла в области IV. Время нахождения металла в области (t_4) определяем по формуле:

$$t_4 = (1-h_4)/U_{\lambda} \quad (2.3.47)$$

9-10. Меняем высоту слитка, возвращаемся к расчету температуры металла (шаг 2).

Численное решение задач (2.3.19) – (2.3.25) осуществляется по разностным схемам (2.3.26)-(2.3.27).

Далее на рисунке 2.14 представлен алгоритм расчета температуры слитка по высоте и ширине.

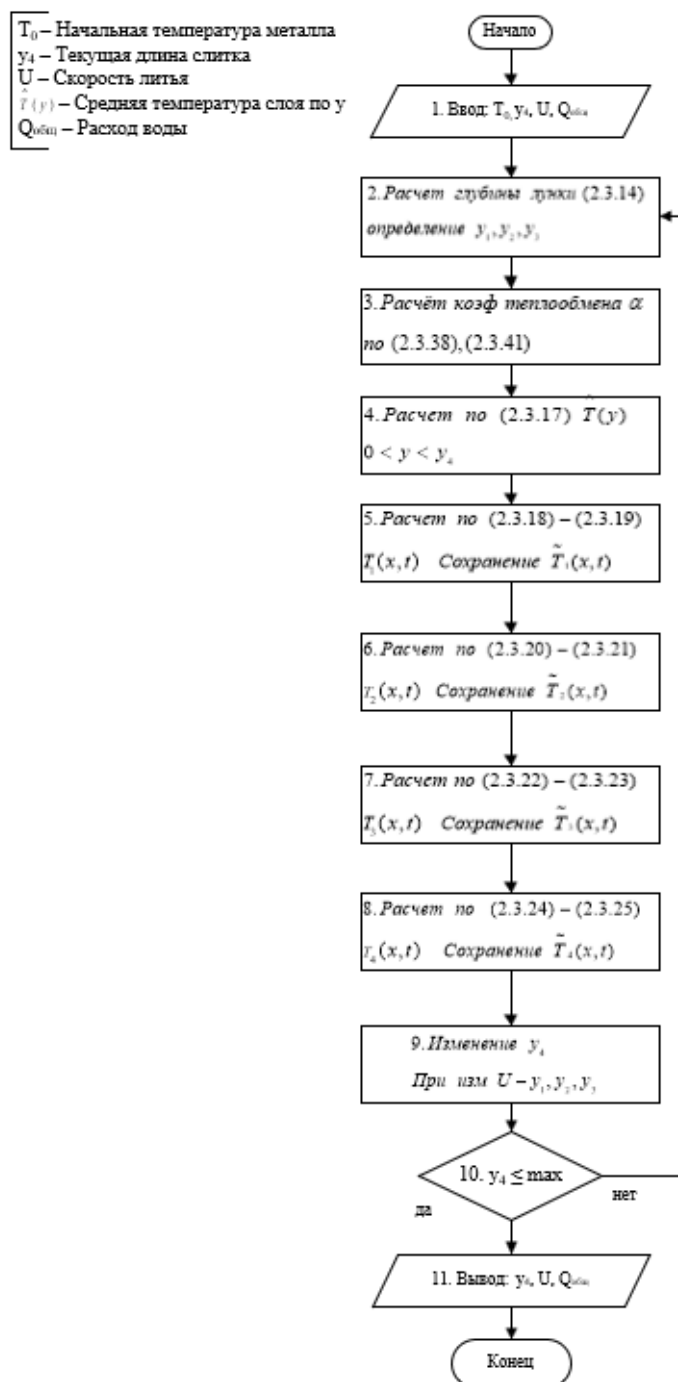


Рисунок 2.14 – Алгоритм расчета температуры слитка.

2.6 Тестовые расчеты температуры слитка заданной длины.

Были произведены тестовые расчеты распределения температур в слитке на основе полученных формул и представленного порядка расчета. Исходные данные

для расчета представлены в таблице 2.4. Для сравнительного анализа с тестовым расчетом Procast используем статические коэффициенты α .

Таблица 2.4 – Исходные данные для расчета.

Параметр	Значение	Размерность
Плотность жидкой фазы алюминия (ρ)	2450	кг/м ³
Теплоёмкость жидкой фазы алюминия (c)	1100	Дж/(кг·К)
Скорость литья ($U_{л}$)	0,00108	м/с
Шаг по длине (Δy)	0,01	м
Коэффициент α (металл-металл)	1000	Вт/м ² ·К
Толщина слитка (δ)	0,7	м
Температура кристаллизатора ($T_{кр}$)	200	°С
Температура воды	25	°С
Температура металла (T_0)	695	°С
Тепло кристаллизации	390000	Дж/кг
Коэффициент α (металл-воздух)	700	Вт/м ² ·К
Коэффициент α (металл-вода)	3000	Вт/м ² ·К
Температура воздушного зазора (Твозд)	300	°С
Температура ликвидус	622	°С
Температура солидус	570	°С
Плотность твердой фазы алюминия (ρ)	2710	кг/м ³
Высота лунки ($h_{л}$)	0,43	м
Теплоёмкость твердой фазы алюминия (c)	1027	Дж/(кг·К)
Теплопроводность алюминия (λ)	203,5	Вт/м·К

Расчеты производились в момент достижения слитком высоты 5 метров, на рисунке 2.15 представлено распределение температур по высоте слитка $T(y)$ для параметров литья таблицы 2.



Рисунок 2.15 - График расчета температуры слитка по высоте.

Приведем графики расчетов горизонтального распределения температур для области II (у от 0,15м до 0,2м). На рисунках 2.16 и 2.17 приведен расчет в разные моменты времени с начала расчета (с начала поступления нового металла в эту область).

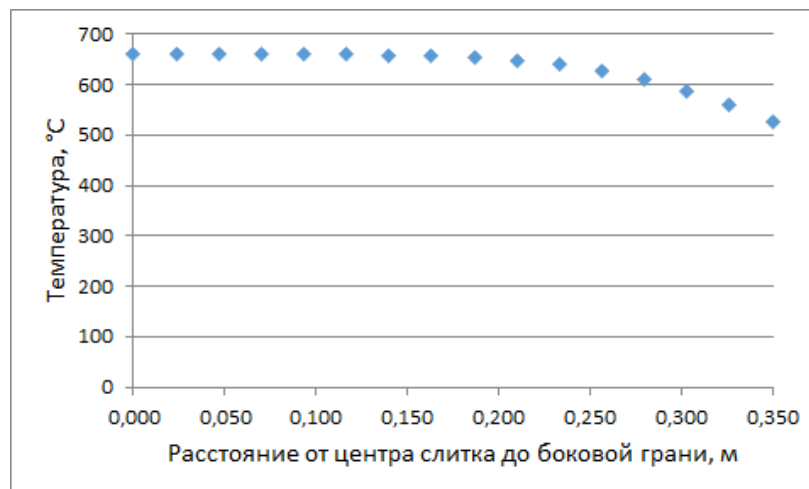


Рисунок 2.16 - График распределения температуры слитка по горизонтали область II в момент времени $t = 60$ с.

Видно, что распределение температур становится практически линейным через 5 мин после начала расчета (рис.4). При этом минимальная температура, достигнутая торцом слитка в этой области при длительном охлаждении 350 °C.

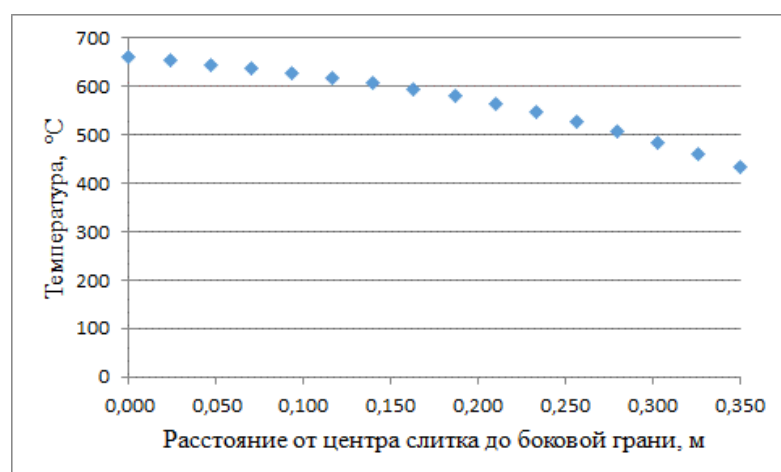


Рисунок 2.17 - График распределения температуры слитка по горизонтали область III в момент времени $t = 300\text{с}$.

Для анализа области III будем рассматривать не середину, а начало этой области, так как это место представляет наибольший интерес. Именно в этом месте, при недостаточно закристаллизовавшейся внешней корке, возможны проливы металла. Это место соответствует высоте слитка $y=0,2\text{м}$.

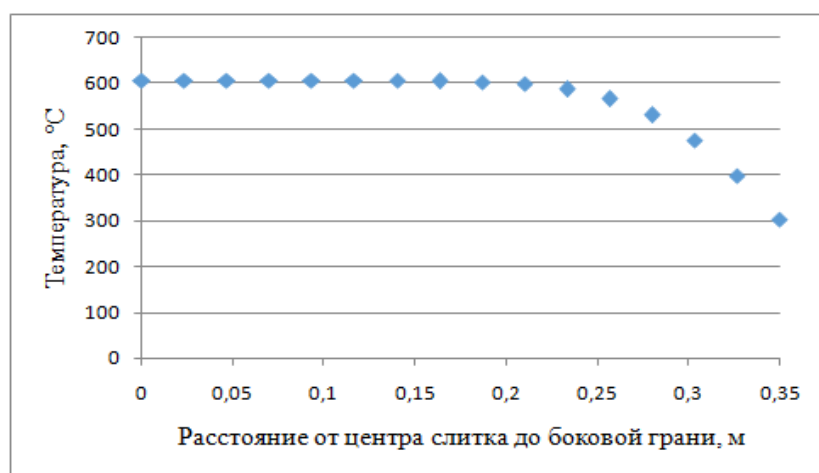


Рисунок 2.18 - График распределения температуры слитка по горизонтали область III в момент времени $t = 30\text{ с}$.

На рисунке 2.18 видно, что при заданных параметрах литья, точка Солидус находится в момент выхода слитка из-под кристаллизатора (через 30 сек после начала расчета) под струи воды на расстоянии 10 см от поверхности слитка. То есть

10 см затвердевшего металла имеется. Через 3-5 секунд после начала расчета точка солидус находится на расстоянии 4-5 см от торца слитка.

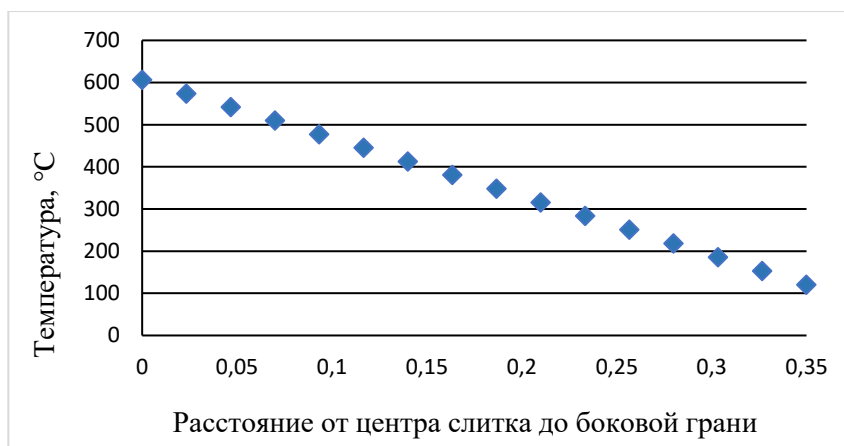


Рисунок 2.19 - График распределения температуры слитка по горизонтали область III в момент времени $t = 1200$ с.

Так, на рисунке 2.19 приведено установившееся распределение температур в слитке в области III, через 20 мин после начала расчета. Разумеется, за время эта область уже шла ниже, в область поступил новый металл и расчет имеет скорее тестовое значение, для проверки модели.

Результаты расчета для областей I и IV приведены в таблицах 2.5 и 2.6.

Таблица 2.5 - Результаты расчетов для области I

Время, с	Расстояние от центра слитка к внешней границе, м							
	0	0,046	0,093	0,14	0,21	0,26	0,3	0,35
0	675,0	675,0	675,0	675,	675,0	675,0	675,0	604,6
120	675,0	672,3	667,5	658,0	628,3	594,	547,1	488,6
1200	675,0	644,6	614,1	583,5	537,5	506,7	475,9	444,9

Таблица 2.6 - Распределение температуры в установившемся режиме для области 4 ($y=1$ м)

Время, с	Расстояние от центра слитка к внешней границе, м							
	0	0,046	0,093	0,14	0,21	0,26	0,3	0,35
1200	198,3	180,4	160,3	135,7	106,3	102,8	92,9	76,7

Для проверки адекватности модели необходимо проводить сравнение с экспериментальными данными. Но в описанном технологическом процессе возможно измерение температур только металла в металлотракте. Все остальные поверхности слитка и оснастки закрыты или находятся в воде. Нами были произведены измерения поверхностей только что извлеченного из литейной машины готового слитка и выполнены расчеты с использованием программного обеспечения ProCast [49].

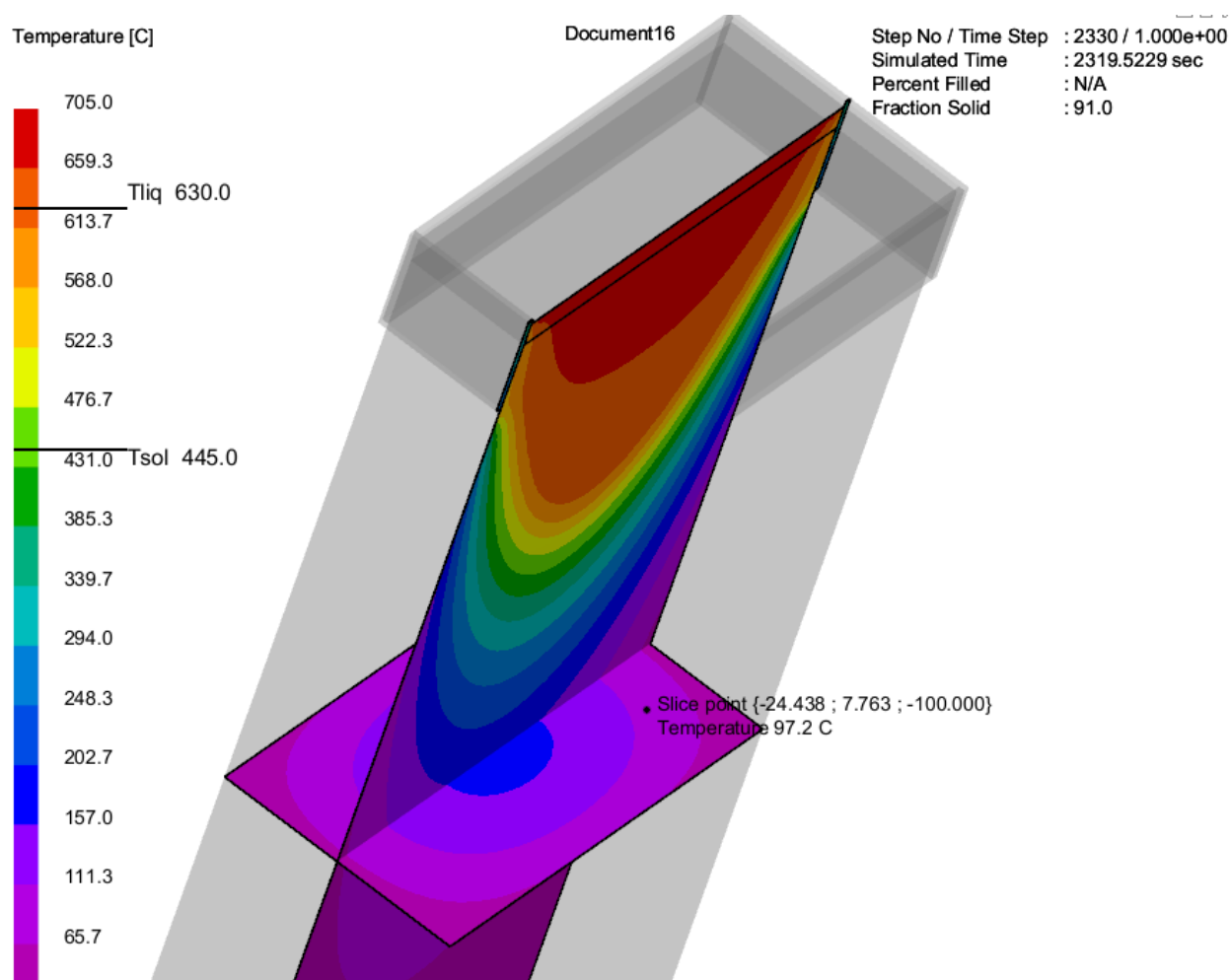


Рисунок 2.20 - Сечение слитка в плоскости XY на длине 1 м.

Расчетное среднее распределение температур по высоте слитка $T(y)$ на длине 1 м - 97,2 °С. Значение, полученное с помощью нашего моделирования – 95,5 °С.

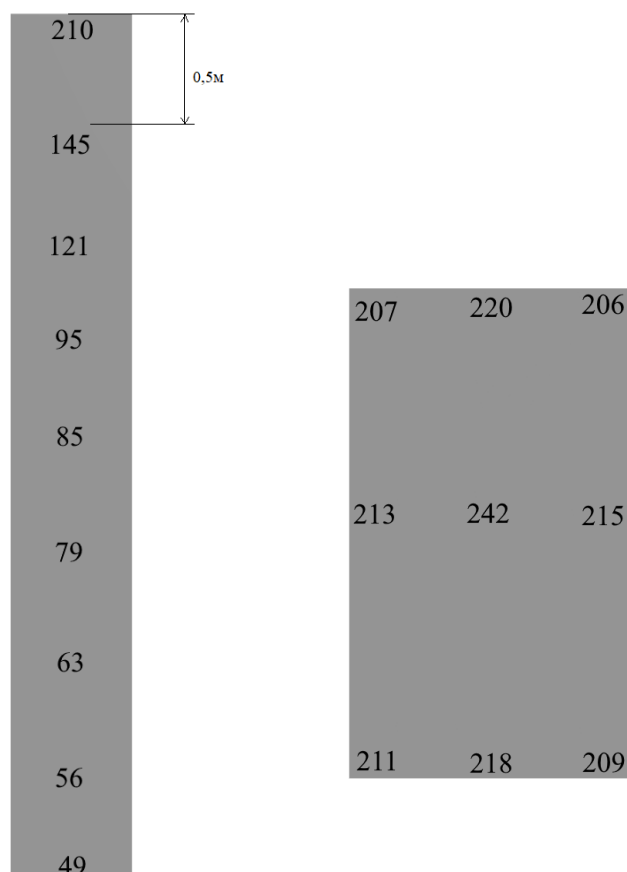


Рисунок 2.21 - Результаты измерения извлеченного из литейной машины слитка. а - боковая широкая сторона, б - верхняя торцевая сторона.

На рисунке 2.21 представлены результаты измерения наружной температуры извлеченного из литейной машины слитка. Время после окончания подачи металла 15 минут.

Результаты симуляций в программном обеспечении ProCast и результаты, полученные с помощью разработанной модели для сплава AlMg5 (1580) представлены в таблицах 2.7, 2.8, 2.9, 2.10.

Таблица 2.7 - Распределение температуры по слою для I области ($y=0,09\text{м}$)

Источник	Расстояние от центра слитка к внешней границе, м							
	0,187	0,210	0,233	0,257	0,280	0,303	0,327	0,350
ProCast	658,5	649,3	647,2	637,3	621,2	589,8	551,2	519,0
Модель	665,9	659,1	649,8	633,6	611,5	582,2	545,9	502,8

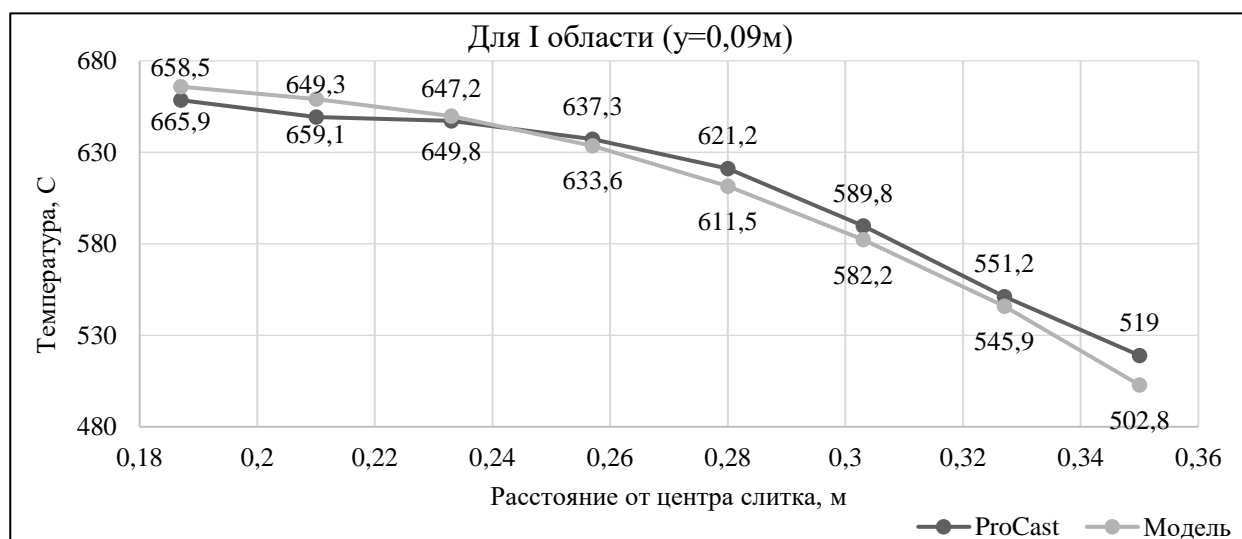


Рисунок 2.22 – Распределение температуры по слою в I области.

Для области 1 (рис. 2.22) критических расхождений не отмечено. Динамика кривой охлаждения соответствует. Максимальное отличие в точке 0,2м – 9,8 °С (менее 1 % от общего диапазона).

Таблица 2.8 - Распределение температуры по слою для II области ($y=0,17\text{м}$)

Источник	Расстояние от центра слитка к внешней границе, м							
	0,187	0,210	0,233	0,257	0,280	0,303	0,327	0,350
ProCast	633,5	619,6	603,2	595,0	542,9	510,1	462,5	412,1
Модель	644,5	621,6	596,64	569,5	539,7	506,9	470,8	431,7

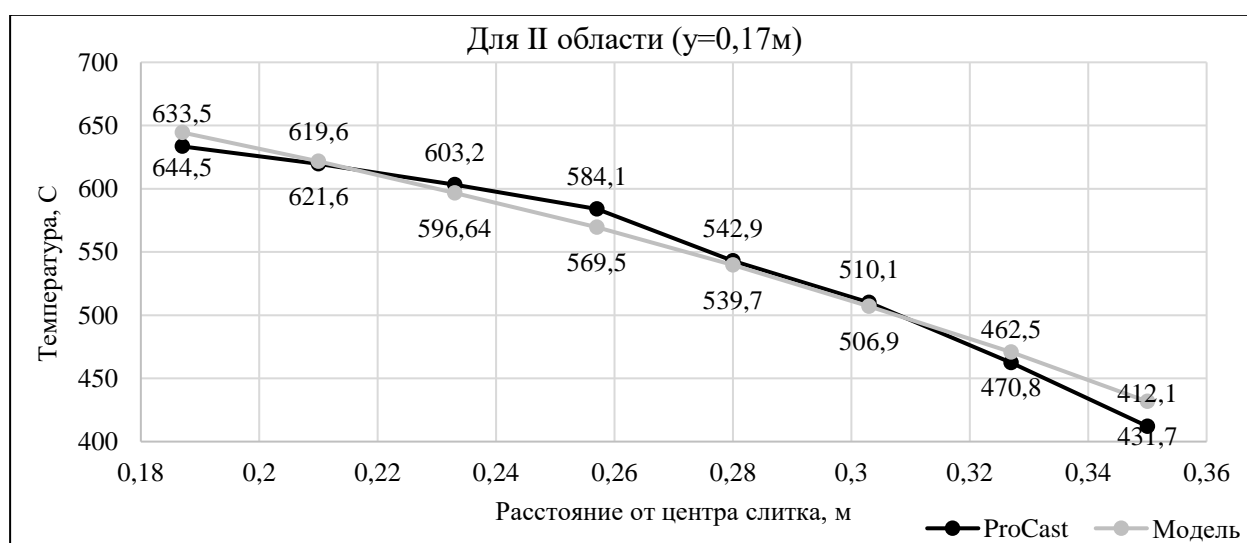


Рисунок 2.23 – Распределение температуры по слою в II области.

В области 2 (рис. 2.23) зафиксированы незначительные расхождения, связанные со сложностью процесса теплообмена в области кристаллизатора. В цифровой модели указанные отклонения будут минимизированы с помощью динамических коэффициентов теплообмена.

Таблица 2.9 - Распределение температуры по слою для III области ($y=0,4\text{м}$)

Источник	Расстояние от центра слитка к внешней границе, м							
	0,187	0,210	0,233	0,257	0,280	0,303	0,327	0,350
ProCast	385,4	365,3	335,4	306,8	260,6	227,6	183,7	145,0
Модель	382,3	364,9	344,4	319,5	286,9	248,8	205,4	157,8

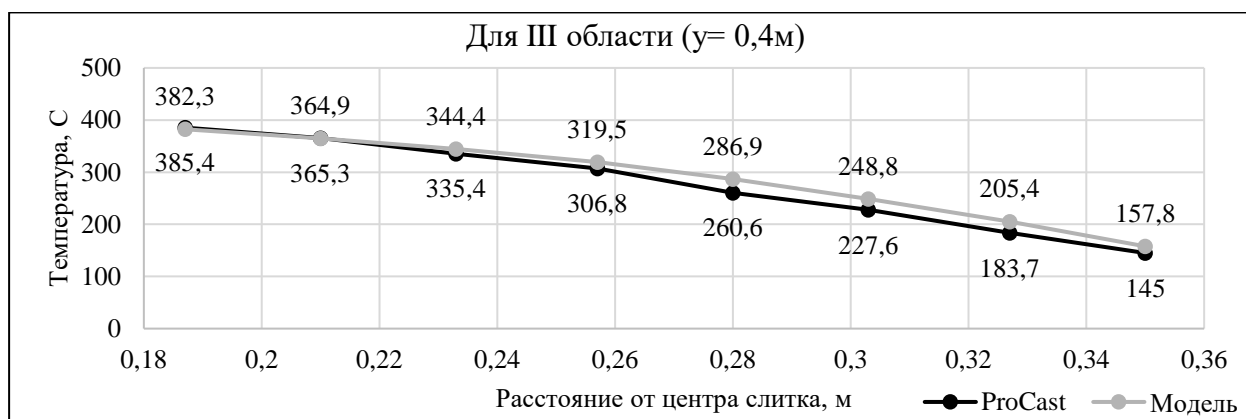


Рисунок 2.24 – Распределение температуры по слою в III области.

В области 3 (рис. 2.24) происходит пузырьковое кипение на поверхности слитка, из-за этого коэффициент теплообмена может быть нестабилен по всей области. По аналогии с областью 2 - отклонения будут минимизированы с помощью динамических коэффициентов теплообмена.

Таблица 2.10 - Распределение температуры по слою для 4 области ($y=1\text{м}$)

Источник	Расстояние от центра слитка к внешней границе, м							
	0,187	0,210	0,233	0,257	0,280	0,303	0,327	0,350
ProCast	97,2	93,1	86,0	76,6	69,0	60,2	54,4	46,8
Модель	95,5	94,2	90,5	85,2	78,9	71,1	62,2	52,4

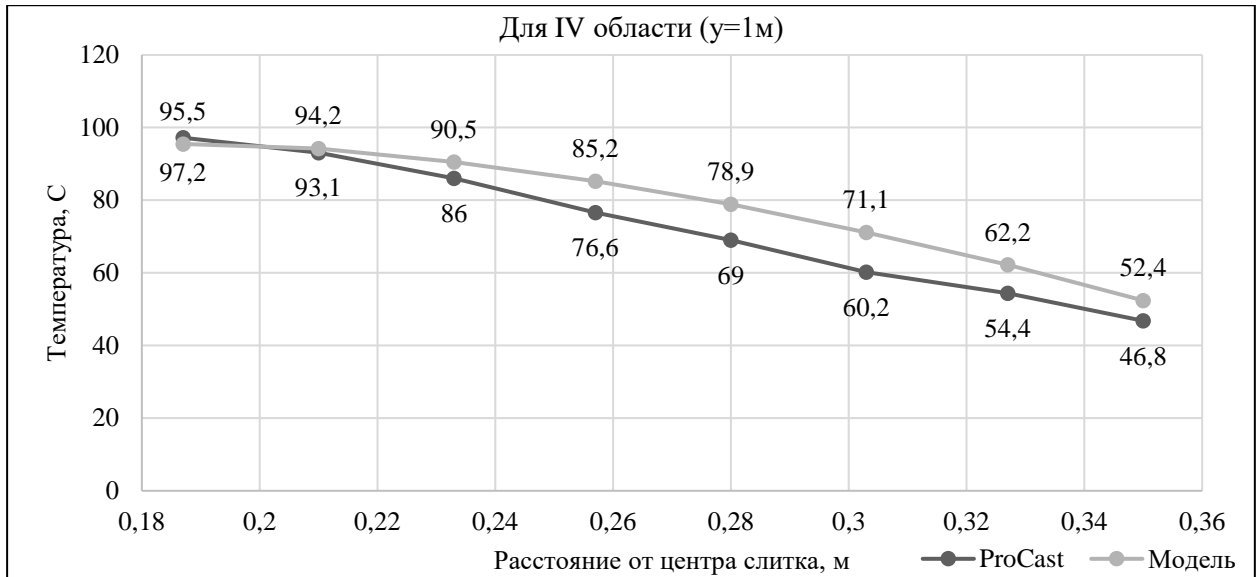


Рисунок 2.25 – Распределение температуры по слою в IV области.

Установленные локальные незначительные расхождения в области IV (рис 2.25) носят ожидаемый характер и объясняются, во-первых, в численных методах (разностные схемы vs. метод конечных элементов), во-вторых, в отсутствии учета теплообмена с нижней платформой оснастки слитка.

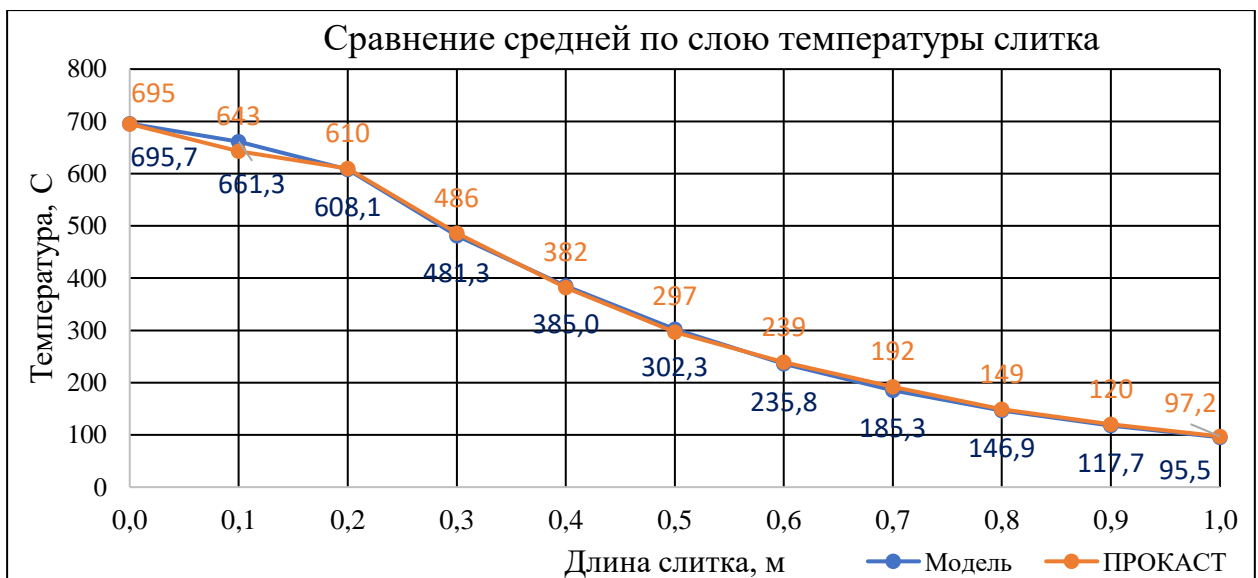


Рисунок 2.26 – Сравнение средней по слою температуры полученной с помощью разработанной модели и ProCast.

Более общую картину можно увидеть на рисунке 2.26, на котором в виде графика представлено сравнение средней температуры по слою слитка на всей длине до 1 м.

Значительных расхождений между собственной математической моделью, моделью ProCast и ранее обозначенными натурными измерениями не обнаружено, следовательно делаем вывод о возможном дальнейшем применении разработанной математической модели. Разработанная модель адекватно описывает процесс теплопереноса при кристаллизации слитка и пригодна для решения практических задач моделирования температурных полей в рамках исследуемой постановки.

Выводы по главе 2

Проведен критический анализ существующего программного обеспечения (ProCAST, SolidCast, FLOW-3D) для моделирования литейных процессов. Установлено, что, несмотря на высокую точность и широкий функционал, коммерческие пакеты непригодны для интеграции в систему АСУТП в режиме реального времени из-за значительной длительности расчетов и отсутствия интерфейсов для внесения управляющих воздействий. Это обусловило необходимость разработки специализированных «быстрых» математических моделей.

Разработана и апробирована в ProCAST модель-эталон процесса полунепрерывного литья плоского алюминиевого слитка. Данная модель, учитывающая геометрию оснастки, свойства материалов и условия теплообмена, послужила инструментом для проверки адекватности и верификации разрабатываемых упрощенных моделей.

Создан комплекс взаимосвязанных математических моделей ключевых технологических узлов литейного агрегата, ориентированный на решение задач автоматизации:

1. Для узла подачи металла предложены модели управления для стационарного и поворотного миксеров, позволяющие рассчитывать необходимый

процент открытия летки или угол наклона для поддержания стабильного уровня металла в раздаточном лотке;

2. Для металлотракта разработана аналитическая модель охлаждения металла при движении к кристаллизатору, показавшая хорошее согласование с натурными измерениями;

3. Для процесса литья слитка разработана основная математическая модель, которая:

- Разделяет сложный трехмерный процесс на расчет по высоте (осевое направление) и по толщине (поперечное направление) слитка.

- Четко выделяет четыре физически разнородные зоны теплообмена (кристаллизатор, воздушный зазор, зона вторичного охлаждения с лункой жидкого металла и зона полного затвердевания).

- Учитывает фазовый переход (кристаллизацию) и движение слитка.

Разработана методика расчета динамических коэффициентов теплообмена для зон II и III, зависящих от расхода охлаждающей воды, что является принципиальным отличием от широко применяемых статических подходов и позволяет точнее отражать реальные управляющие воздействия [78].

Для практической реализации модели предложены эффективные разностные схемы и детальный расчетный алгоритм, обеспечивающие возможность проведения быстрых вычислений, приемлемых для использования в контуре АСУТП.

Проведенная валидация разработанной модели путем сравнения результатов тестовых расчетов с данными, полученными в ProCAST, и с ограниченными натурными измерениями показала их удовлетворительное согласование. Установленные незначительные расхождения носят ожидаемый характер и связаны с различиями в численных методах и детализации моделей. Результаты моделирования, полученные собственной программой, демонстрируют высокую степень соответствия, как по характеру температурных полей, так и по значениям температуры в характерных точках и сечениях слитка. Модель адекватно описывает ключевые термодинамические процессы при формировании и литье

слитка, включая формирование необходимой корковой зоны, теплоперенос и фазовые превращения.

Таким образом, в главе решена задача: разработан комплекс математических моделей, который с достаточной для задач автоматизации точностью и в приемлемом для реального времени масштабе описывает тепловые процессы при литье плоских слитков, и который может быть интегрирован в АСУТП для прогнозирования как технологических параметров процесса, так и критериев безопасности.

ГЛАВА 3. АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛИТЕЙНЫМ АГРЕГАТОМ

В главе 1 были рассмотрены известные методы управления составляющими литейного агрегата. В настоящей главе автор предлагает как алгоритмы контроля и управления отдельными узлами литейного агрегата, так и всего цикла литья. При этом рассматриваются проблемы, не решенные ранее, не рассмотренные в литературе.

Разработаны алгоритмы контроля и управления отдельных агрегатов литейного каскада (миксер поворотный, миксер стационарный, литейная машина) и на основании этого представлен комплексный алгоритм управления.

3.1 Контроль температуры металла в миксере

Согласно технологии литья, перед началом ходки необходимо достичь определенной температуры металла. В миксере установлена одна термопара для металла, с помощью которой контролируется его температура [51]. Также имеется термопара, измеряющая температуру воздуха в печи [79].

Так как термопара имеет непосредственный контакт с жидким металлом, периодичность ее выхода из строя достаточно высокая. Оператор литейного каскада не всегда может оперативно определить необходимость замены термопары, потому что при частичном выгорании, оставшаяся часть термопары остается в воздухе. И в случае, если в оставшейся части термопары присутствует контакт между компенсационными проводами, то есть место горячего спая находится в воздухе, на панели оператора отображается недостоверная температура металла. Оператор начинает литье, ориентируясь на недостоверные показания температуры металла, с нарушением технологических параметров.

Собрана статистика и выявлено 10 подтвержденных случаев поломки термопар. Также собирались графики нормальной работы. Наиболее характерные представлены на графиках ниже.

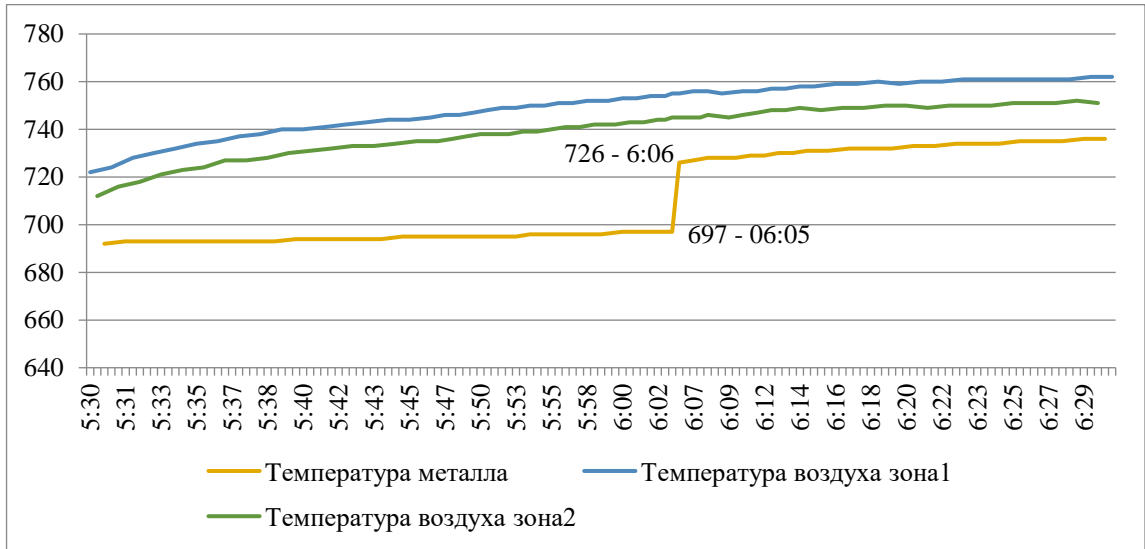


Рисунок 3.1 – График нагрева миксера М5.

Верхний уровень опрашивает контроллер с частотой 60 сек, поэтому для описания графика Т металла будем использовать $\Delta t = 60$ сек. На графике, изображенном на рисунке 3.1, явно виден резкий скачок температуры металла, где основной характеристикой этого скачка является его диапазон.

ΔT металла = Т металла (t_n) - Т металла (t_{n-1}) = 726 - 697 = 29 С при $\Delta t = 60$ сек.

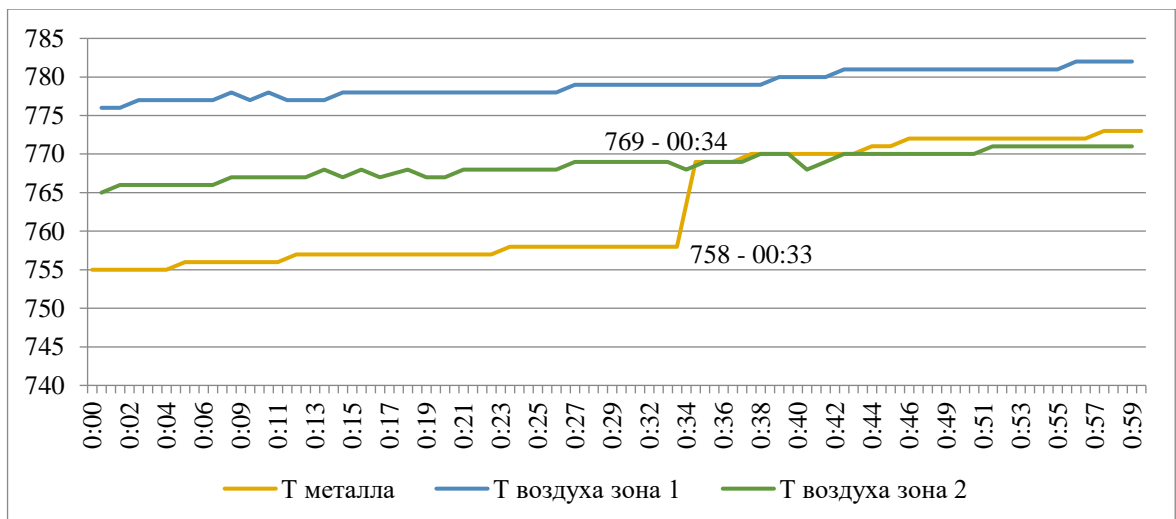


Рисунок 3.2 – График нагрева миксера М5.

На рисунке 3.2 представлен график содержащий скачок температуры металла, где

$$\Delta T \text{ металла} = T \text{ металла} (t_n) - T \text{ металла} (t_{n-1}) = 769 - 758 = 11\text{C}, \Delta t = 60 \text{ сек.}$$

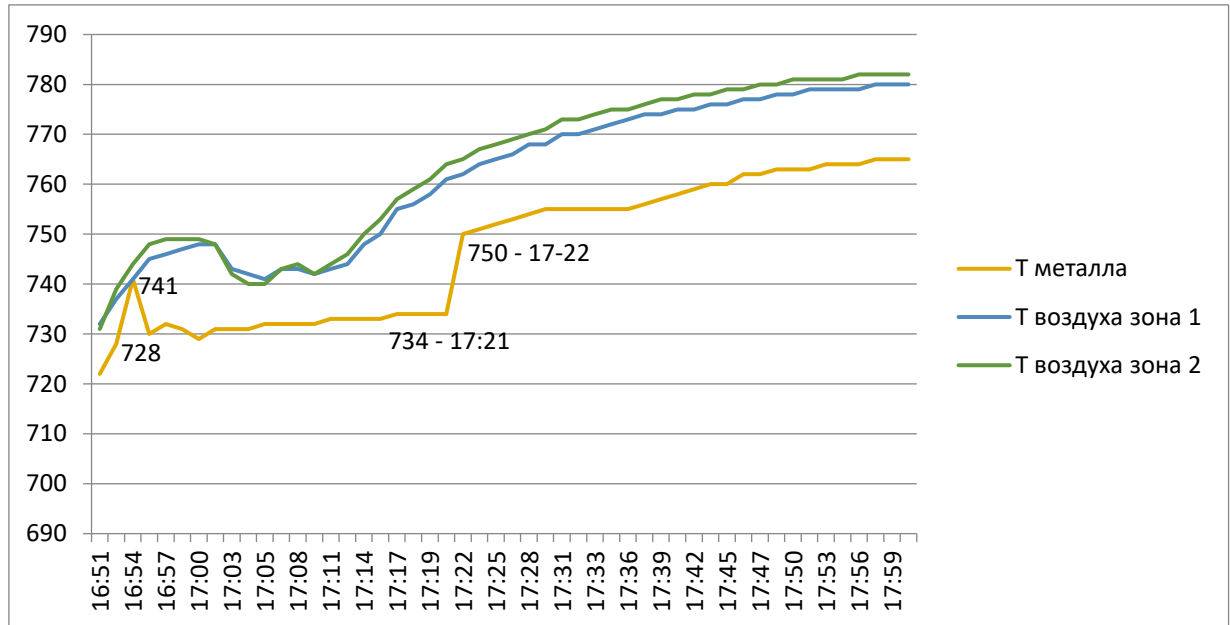


Рисунок 3.3 – График нагрева миксера МЗ.

На рисунке 3.3 представлен график температур миксера МЗ. На данном графике можно увидеть сразу два скачка температуры металла за период времени 30 минут.

Можно сделать вывод, что подобный выход из строя может сопровождаться несколькими непропорциональными скачками температур.

$$\Delta T \text{ металла} = T \text{ металла} (t_n) - T \text{ металла} (t_{n-1}) = 741 - 728 = 13\text{C}$$

$$\Delta T \text{ металла} = T \text{ металла} (t_n) - T \text{ металла} (t_{n-1}) = 750 - 734 = 16\text{C}$$

Анализ остальных случаев представлен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Анализ остальных случаев выхода из строя термопар.

Номер миксера	ΔT металла, °C
Миксер 3	15
Миксер 5	13
Миксер 5	18
Миксер 6	10
Миксер 5	12
Миксер 6	19
Миксер 8	17

Далее необходимо проанализировать графики температуры металла при нормальных условиях нагрева.

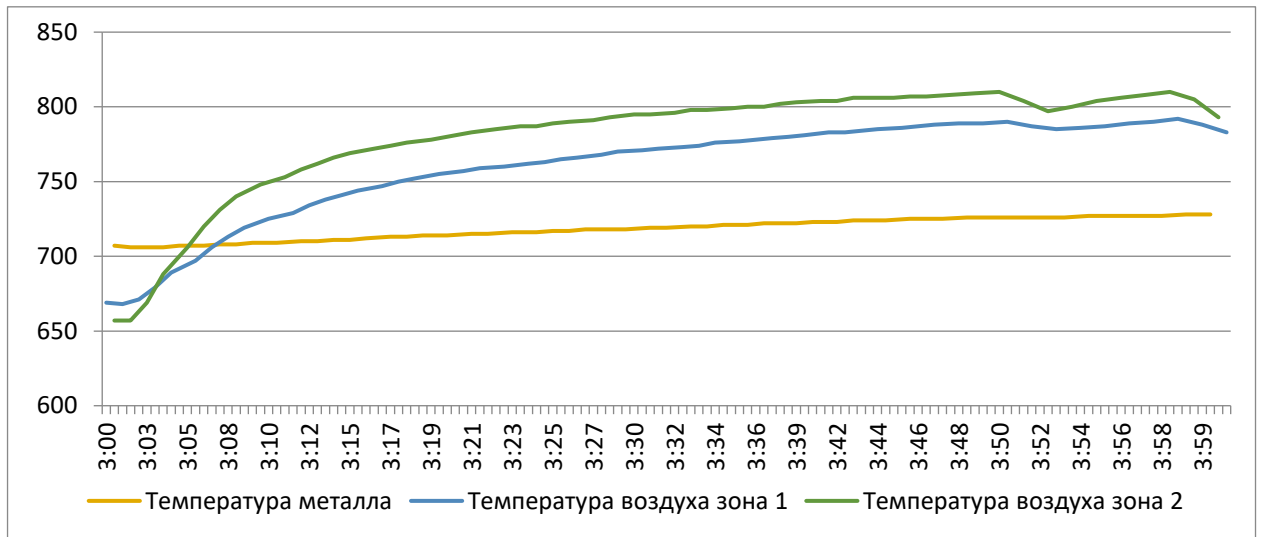


Рисунок 3.4 – График нагрева миксера М5.

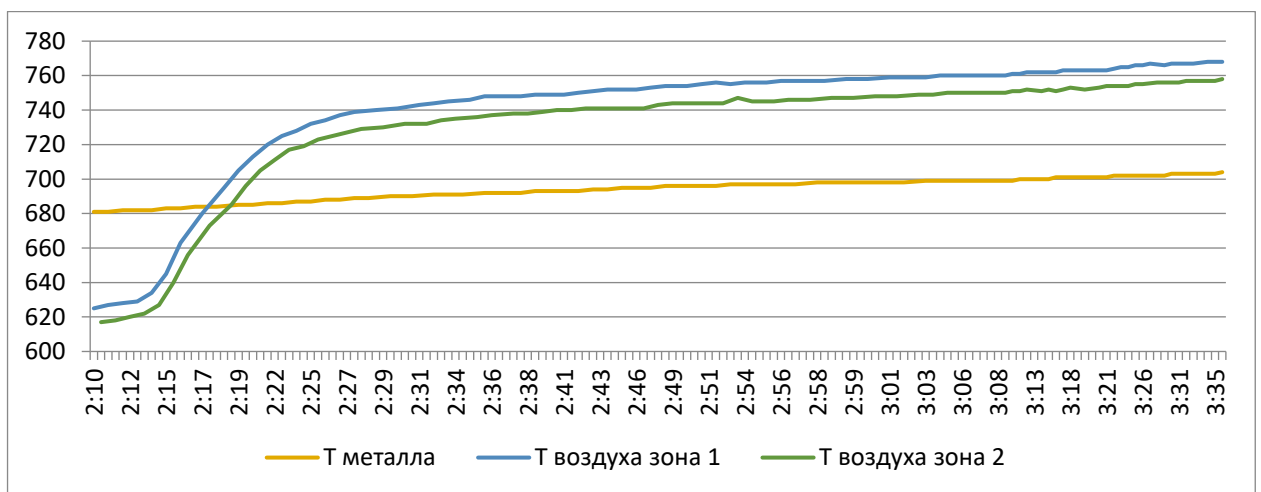


Рисунок 3.5 – График нагрева миксера М3.

Из графиков на рисунках 3.4, 3.5 видно, что при нормальных условиях нагрева ΔT металла ≤ 1 °C за период 60 секунд.

Исходя из вышесказанного, был разработан алгоритм автоматической проверки достоверности температуры металла [54]. Данный алгоритм проверки запускается один раз в 60 секунд. Чтобы исключить ложные срабатывания при разогреве миксера, минимальный порог работы алгоритма выставлен 600 °C. Один раз в минуту сравниваются текущая температура металла и температура, которая была 60 секунд назад, которая хранится в переменной "T_metall.old". После этого текущее значение температуры записывается в "T_metall.old", чтобы использовать его при следующей проверке. При превышении разницы температур более чем на 9 °C, формируется сообщение с предупреждением для панели оператора. Данный алгоритм представлен в виде блок-схемы на рисунке 3.6 и реализован в ПО TIA Portal [80] в АСУТП литейного отделения.

На рисунке 3.7 приведен скриншот программы ПЛК, на котором реализована дополнительная проверка достоверности температуры металла. Система управления литейным агрегатом реализована на ПЛК SIEMENS S7-317 PN\DP, на базе ПО TIA Portal V15, язык программирования SCL [81].

На рисунке 3.8 представлен алгоритм формирования слова сообщения об ошибке для панели оператора.

В результате внедрения алгоритма на стационарном миксере исключены ошибочные действия оператора, за счёт автоматического определения недостоверных показаний температуры металла, что исключило литье потенциальных 166, 32 т брака. Исключены 2 потенциально опасных ситуации (температура металла была фактически выше измеренной), за счёт своевременного оповещения технологического персонала о недостоверной температуре.

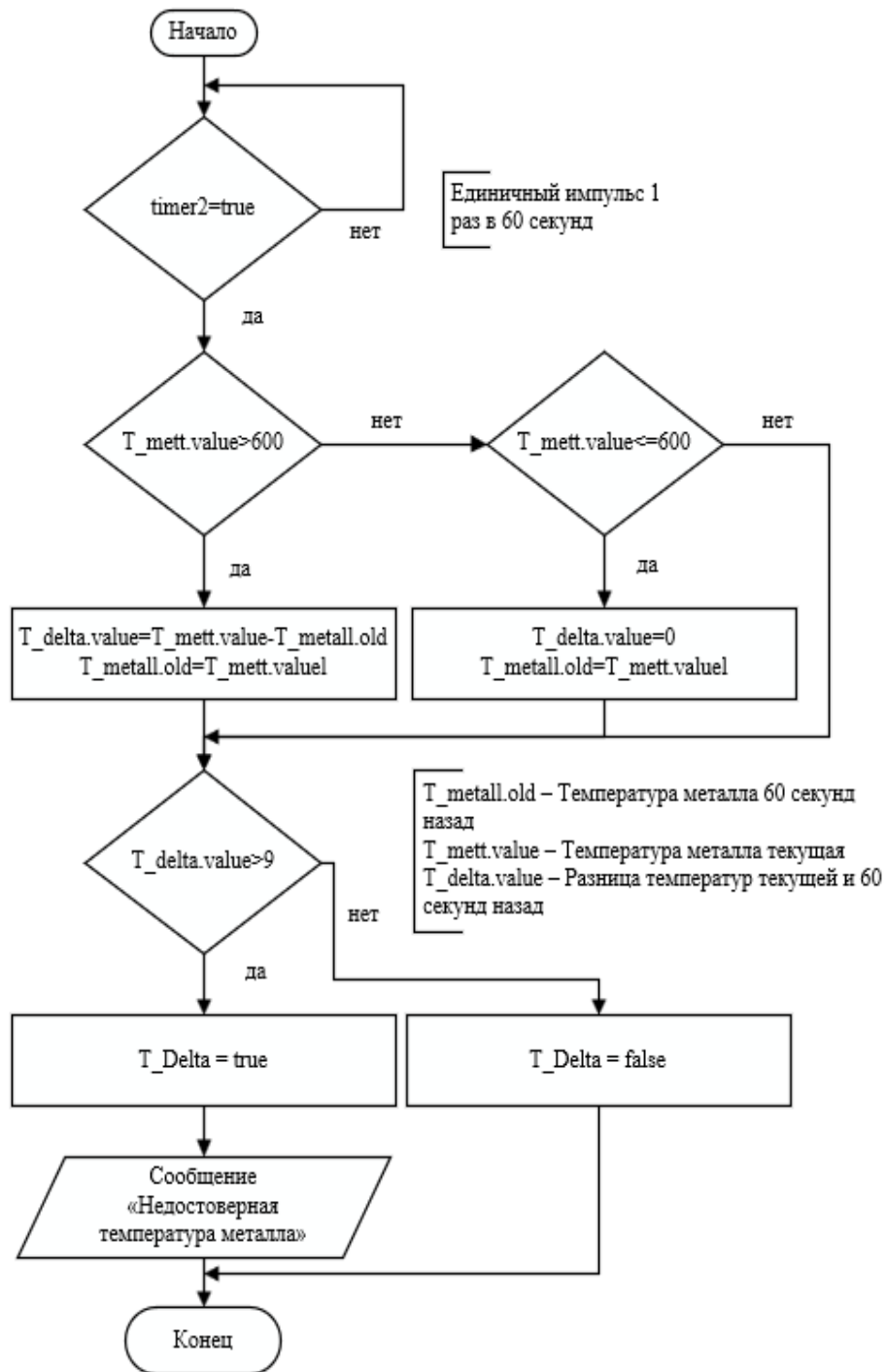


Рисунок 3.6 – Блок-схема алгоритма проверки температуры металла.

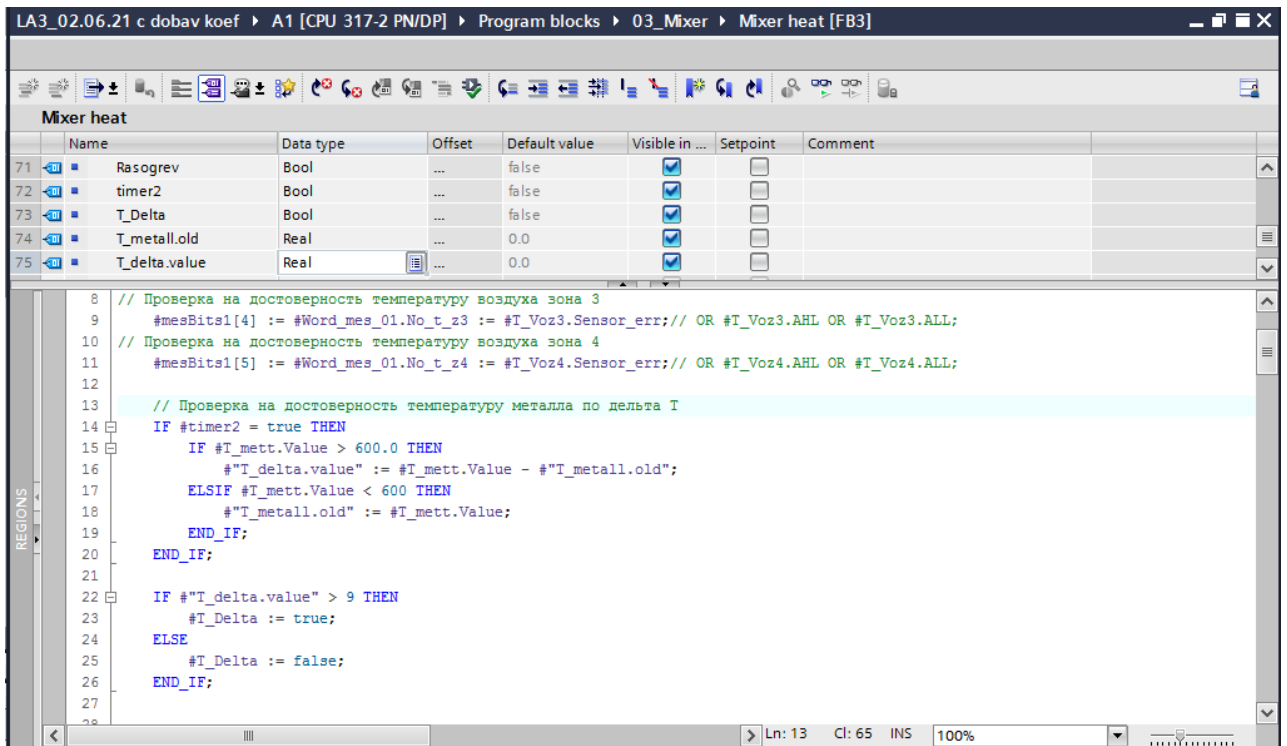


Рисунок 3.7 – Скриншот программы ЛА №3.

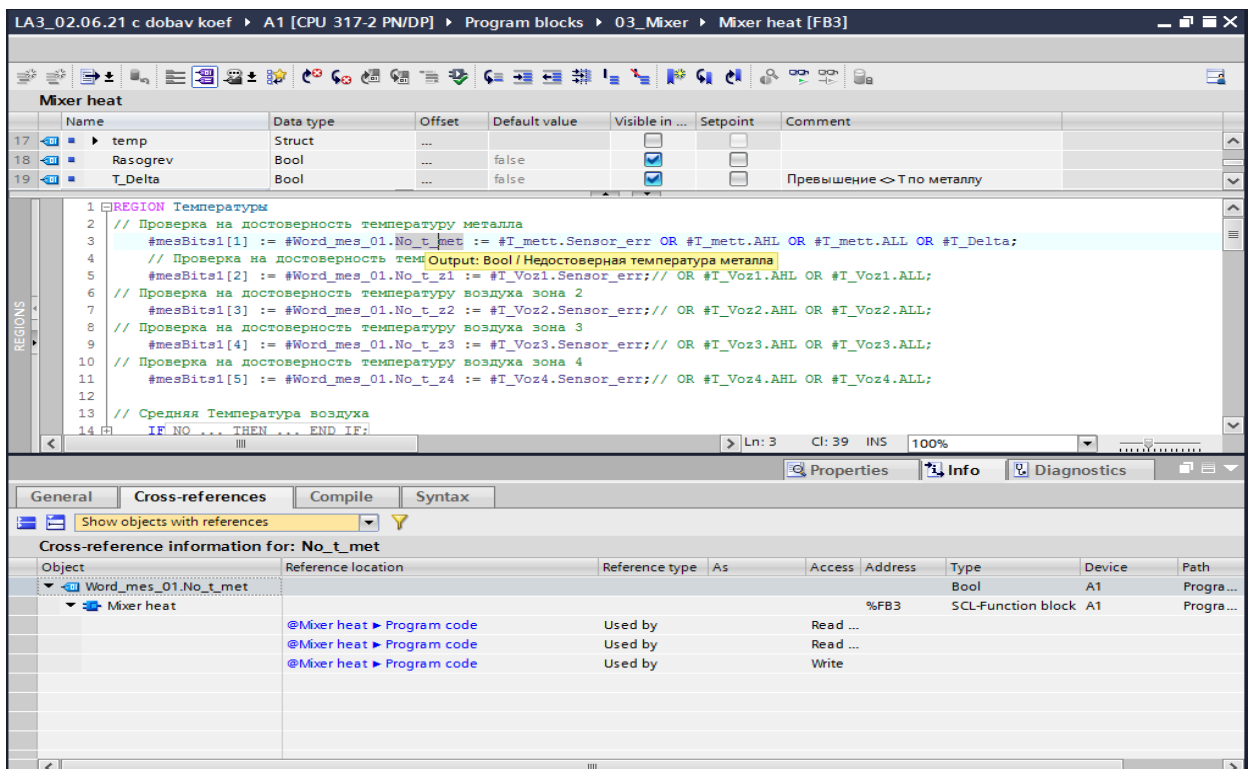


Рисунок 3.8 – Скриншот программы ЛА №3.

Добавлено оповещение оператора о недостоверной температуре металла в случае неудовлетворительной проверки по ΔT (Рисунок 3.9).

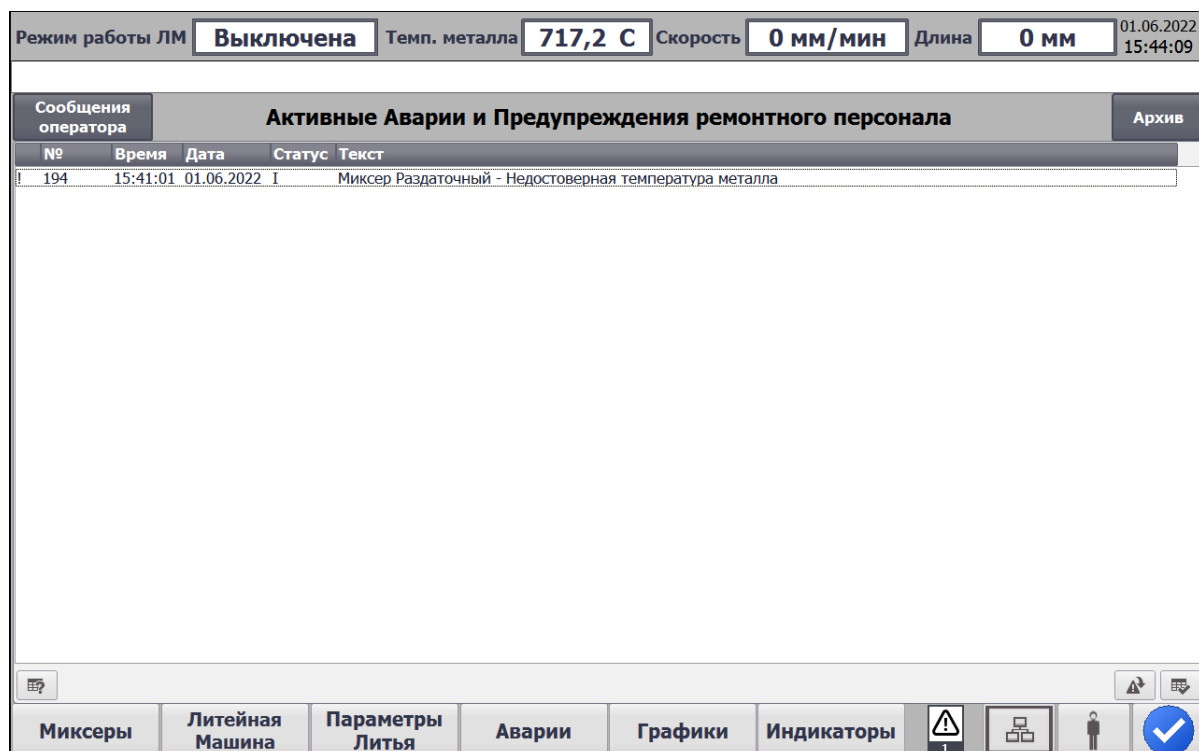


Рисунок 3.9 – Сообщение оператору о недостоверной температуре.

3.2 Контроль длины слитка на тросовых литейных машинах

Одним из составляющих тросовой литейной машины является барабан, накручивающий трос со смещением, а также система блоков и роликов, которые создают нелинейную зависимость между длиной троса и длиной слитка при литье. Измерение длины слитка производится косвенным методом, с помощью инкрементного энкодера, установленного на вал двигателя, который вращает барабан с тросом, поэтому проблемой является недостоверное измерение длины слитка.

Пересчет импульсов в длину слитка в настоящее время реализован с помощью статического коэффициента, подобранного экспериментальным путем. В результате, реальная длина слитка при завершении литья, не совпадает с расчетной длиной на панели оператора, которую видит литейщик. Разница составляет 100-120 мм.

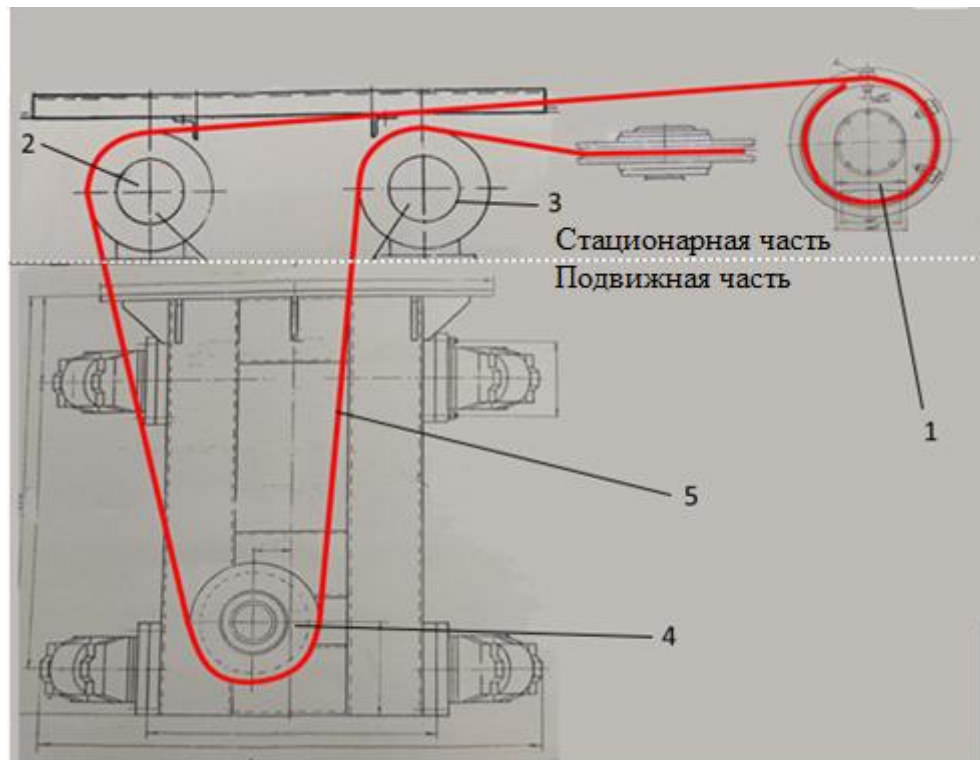


Рисунок 3.10 – Расположение троса при опускании платформы. 1 – приводной барабан; 2, 3 – обводные ролики; 4 – опорный ролик платформы; 5 – приводной трос.

На рисунке 3.10 изображена схема тросовой литейной машины. Она состоит из стационарной и подвижной части (обозначено на рисунке). Стационарная часть представляет собой жестко закрепленную металлоконструкцию, на которой имеют возможность вращаться барабан 1, обводные ролики 2, 3. Подвижная часть находится в подвешенном состоянии на тросе 5, который фиксируется опорным роликом 4. Подвижная часть (платформа) имеет возможность вертикального перемещения. При разматывании троса с барабана, платформа под собственным весом опускается вниз. Для подъема платформы необходимо чтобы барабан намотал трос обратно.

Проведя анализ расположения троса, можно увидеть, что он расположен в форме треугольника между роликами 2, 3 и 4 (Рис. 3.11). При движении платформы происходит изменение угла расположения троса между роликами.

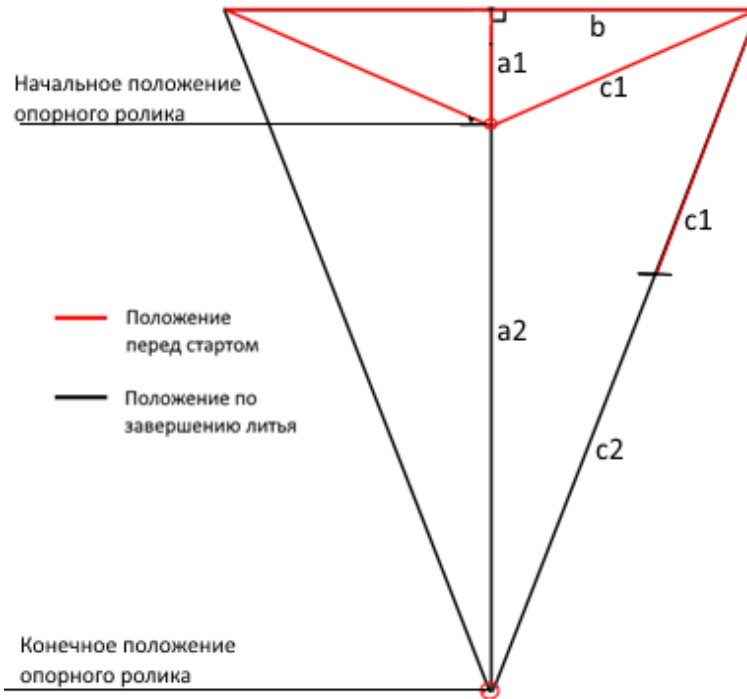


Рисунок 3.11 – Расположение троса при опускании платформы

Треугольник с высотой a_1 – начальное положение троса, c_2 – длина размотанного троса; a_2 – высота, на которую опускается платформа, то есть длина отлитого слитка [82, 83].

$$c_1 = \sqrt{a_1^2 + b^2}; \quad a = a_1 + a_2; \quad a_2 = \sqrt{(c_1 + c_2)^2 - b^2} - a_1 \quad (3.2.1)$$

Таким образом, мы рассчитываем длину слитка с помощью длины размотанного троса, определяемой достоверно по подсчету импульсов энкодера. В расчете мы используем половину длины размотанного троса.

3.2.1 Расчет смещения троса при накручивании на барабан

Барабан (Рисунок 3.12) состоит из 13 канавок, расстояние между которыми 28 мм. Таким образом положение троса на барабане смещается на 364 мм от начала до конца литья. Принимающий опорный ролик расположен относительно

центра барабана на расстоянии 3,7 метра. Но так как принимающий ролик расположен на относительно большом расстоянии от барабана, влияние погрешности на данном участке на итоговые показания длины незначительны. Что подтверждается расчетом ниже.

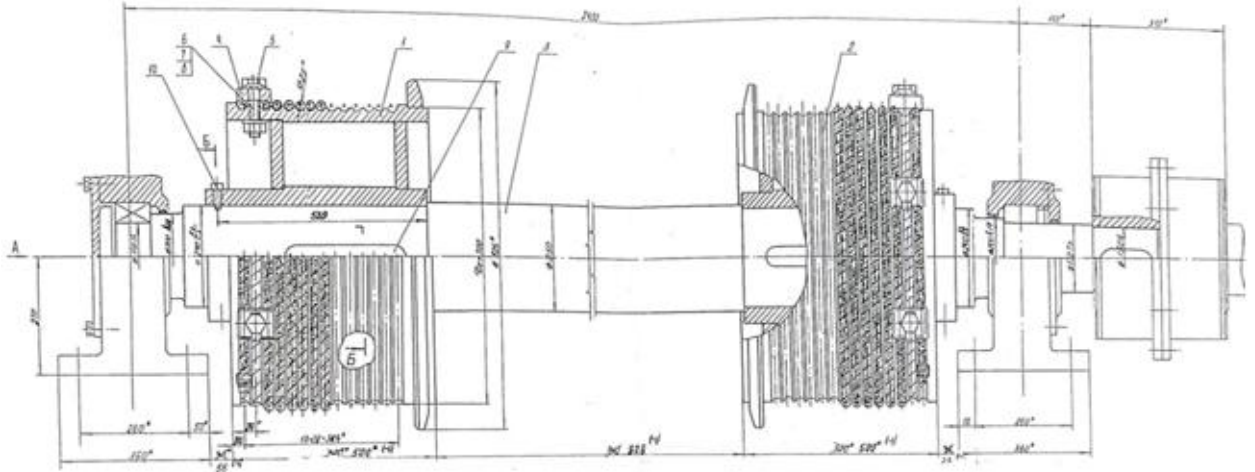


Рисунок 3.12 – Барабан тросовой литейной машины.

Максимальная погрешность приходится на начало и конец литья:

$$c_1 = \sqrt{a_1^2 + b^2} = \sqrt{3700^2 + 182^2} = 3704,4 \text{ мм.} \quad (3.2.2)$$

При условии, что допустимая погрешность 0,5% от максимального диапазона длины: $6500 * 0,005 = 32,5 \text{ мм}$.

Тогда погрешность на данном участке (4,4 мм) учитывать не будем.

3.2.3 Алгоритм расчета длины слитка

На рисунке 3.13 приведен алгоритм расчета длины. Сначала происходит расчет чистой длины размотанного с барабана троса ($D_{\text{лина_Clear}}$). Далее на основе формулы (3.2.1) происходит расчет a_2 , то есть длины отлитого слитка.

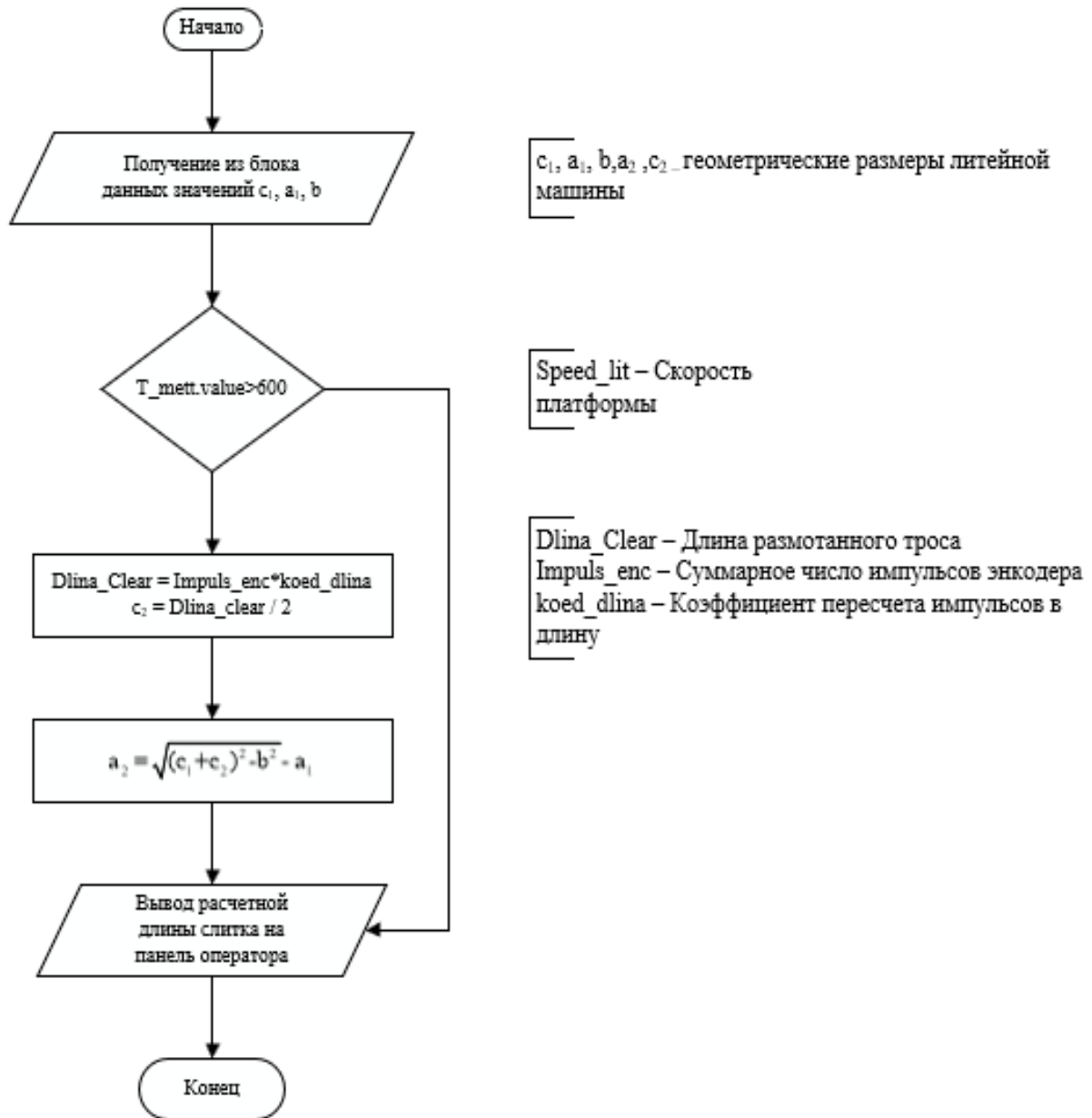


Рисунок 3.13 – Блок-схема алгоритма расчета длины

Изменен способ расчета длины в ПО ПЛК литейной машины. Алгоритм внедрен на КраЗе в литейном отделе №2, литейные машины № 5, №6.

```

488
489 // Длина слитка
490 IF #Speed_lit > 0.0 THEN
491 (*...*)
502     #Dlina_Clear := #Dlina_Clear + (#Speed_lit * ((DINT_TO_REAL("Cycle") / 60000.0)));
503     #Dlina_PV := SQRT(SQR(#Dlina_Clear/2 + #Korf_dlina_1) - SQR(#Korf_dlina_2)) - #Korf_dlina;
504     // #Korf_dlina_1 - Гипотенуза 2072
505     // #Korf_dlina_2 - нижний катет 560
506     // #Korf_dlina - Высота 1995
507     // #Dlina_Clear * ABS(#Korf_dlina);
508     // #Dlina_PV := #Dlina_PV + (#Speed_lit * ((DINT_TO_REAL("Cycle") / 60000.0) * #Korf_dlina); // "Настройка параметров".coe
509     // #Dlina_PV := #Dlina_PV + (#Speed_lit * ((DINT_TO_REAL("Cycle") * 1.7e-5) * #Korf_dlina);
510 END_IF;
511
512 #Параметры_Слитка.ust_dlina := #Параметры_Слитка.zad_dlina;
513 #Dlina_Ok := #Dlina_PV >= #Параметры_Слитка.zad_dlina;
514 #WordMes.Max_dlina := (#Dlina_PV > #Параметры_Слитка.ust_dlina);
515 #speed_auto_TON(IN := #speed_ton_en,
516                PT := T#2s);
517 END_REGION
518
519 // Рампа расхода и скорости
520 #Flow_RMP(CYCLE := "Cycle");
521
522 #Speed_RMP(CYCLE := "Cycle");
523
524 REGION Кнопки_больше_меньше_для_ручного_режима
525 // Скорость_шпинделя_самостоятельно_изменяется

```

Рисунок 3.14 – Скриншот программы ЛА №3.

На рисунке 3.14 приведен скриншот с измененной расчетной формулой длины для программы ПЛК. Сначала происходит расчет чистой длины размотанного с барабана троса (D_{Clear}). Далее на основе формулы 3.2.1 происходит расчет длины слитка (D_{PV}), то есть высоты опускания платформы.

После внедрения алгоритма был проведен контрольный замер отливаемых слитков. Расчёт составил 4980 мм, погрешность от реальных размеров слитка на 6,7 мм меньше (0,13%). При аналогичных замерах по старому алгоритму погрешность составила 66,1 мм (1,32%).

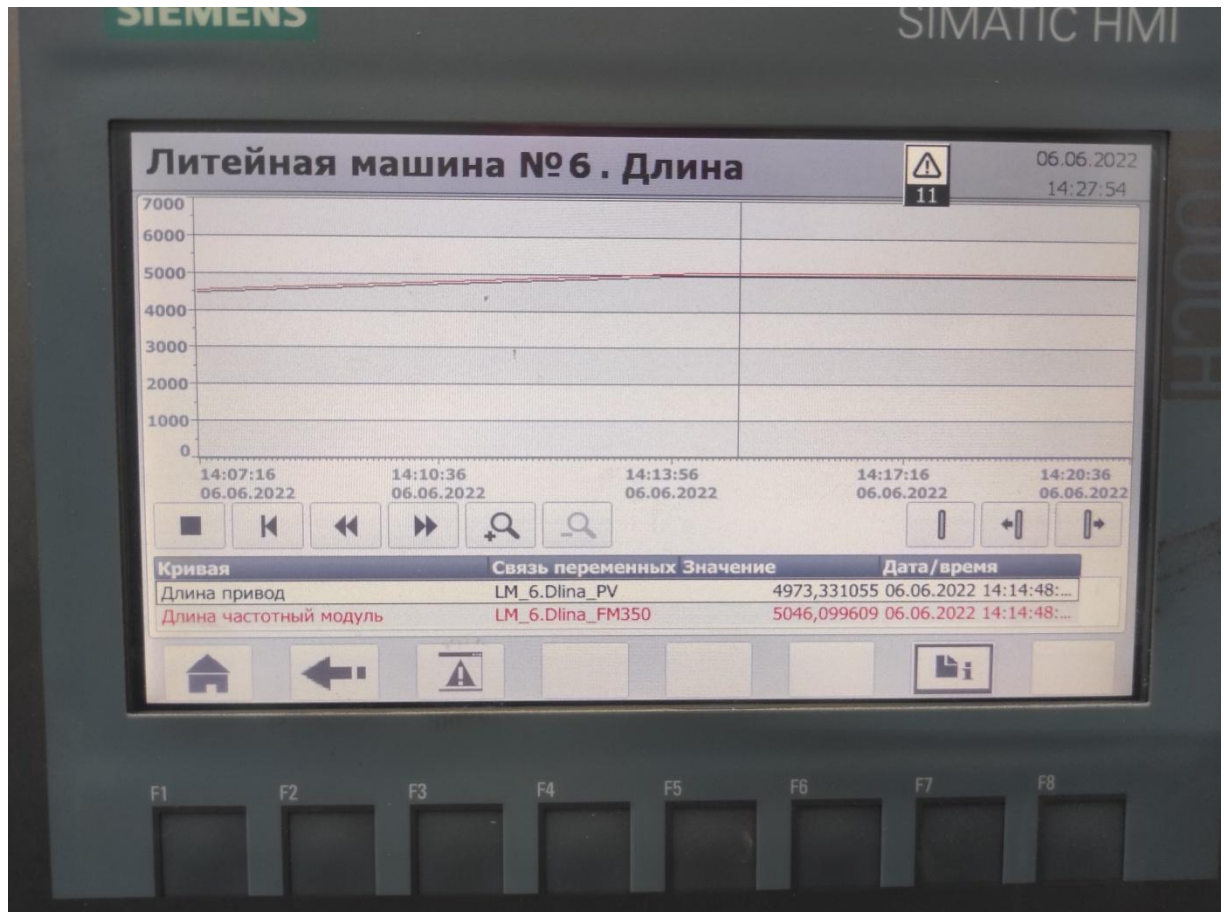


Рисунок 3.15 – Результаты контрольного замера длины на 4980 мм.

Экспериментальная апробация обновленного алгоритма показала его высокую эффективность: величина относительной погрешности измерения длины слитка снижена с исходных 1,32% до 0,13%. Снижение погрешности на 1,19 процентных пунктов (более чем в 10 раз) подтверждает корректность выбранного подхода к модификации алгоритма.

Полученная точность позволяет рекомендовать модифицированный алгоритм к внедрению в действующие системы автоматизированного управления процессом непрерывного литья для повышения точности учета выхода годного металла, планирования резки и улучшения управления технологическим процессом в целом.

3.3 Алгоритмы управления подачей металла из миксера в металлотракт

3.3.1 Стационарный миксер

Выше в п 2.3.1 была описана конструкция стационарного миксера и приведена математическая модель подачи металла из миксера.

На основе формул 2.3.1 – 2.3.9 разработан алгоритм расчета необходимого процента открытия летки (рис. 3.16). 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 (формула 2.3.5).

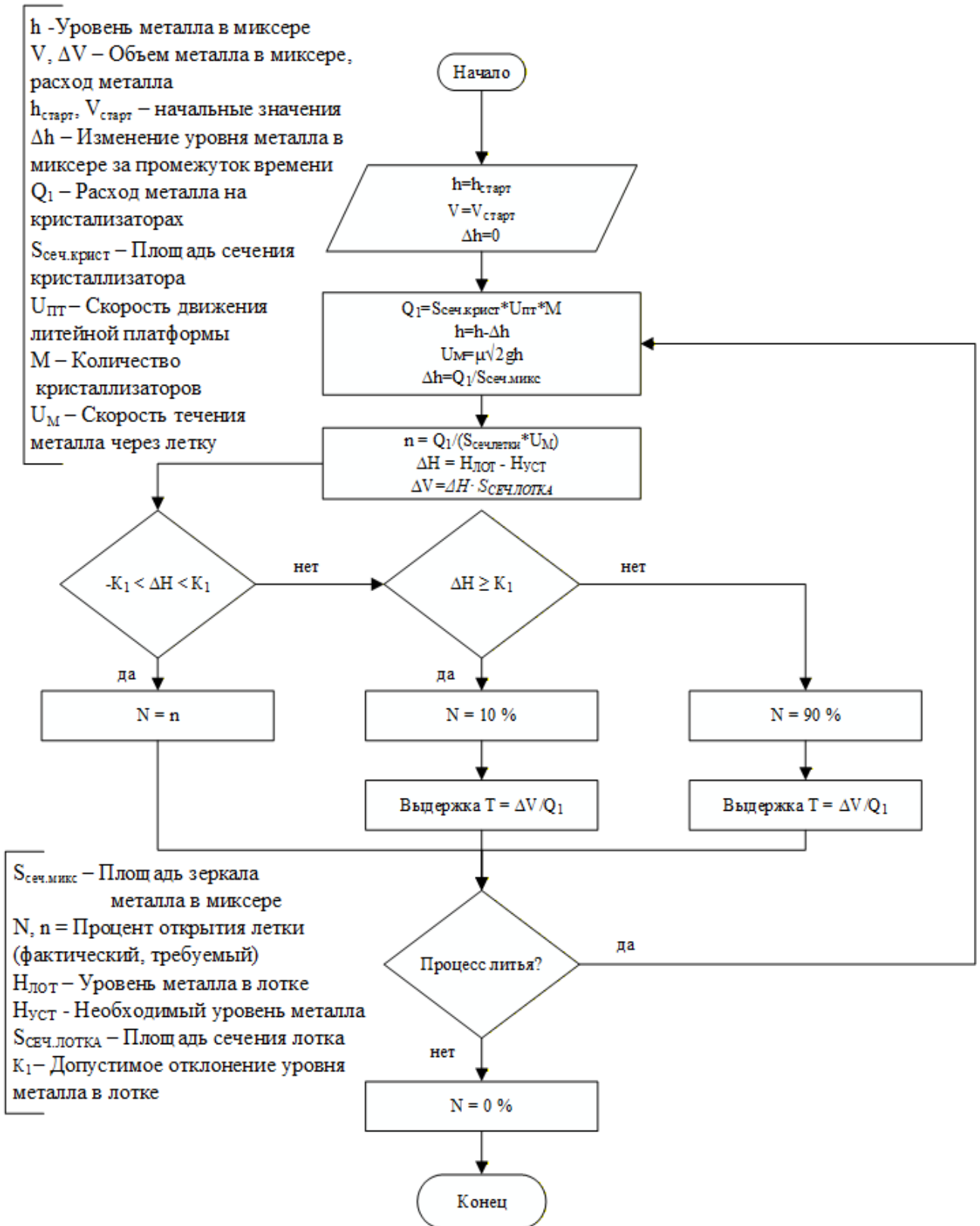


Рисунок 3.16 – Алгоритм расчета процента открытия летки стационарного миксера

3.3.2 Поворотный миксер

Был разработан алгоритм расчета скорости наклона поворотного миксера (рисунок 3.17) [53]. Поворотный миксер и расчетная модель были описаны в п 2.3.1.

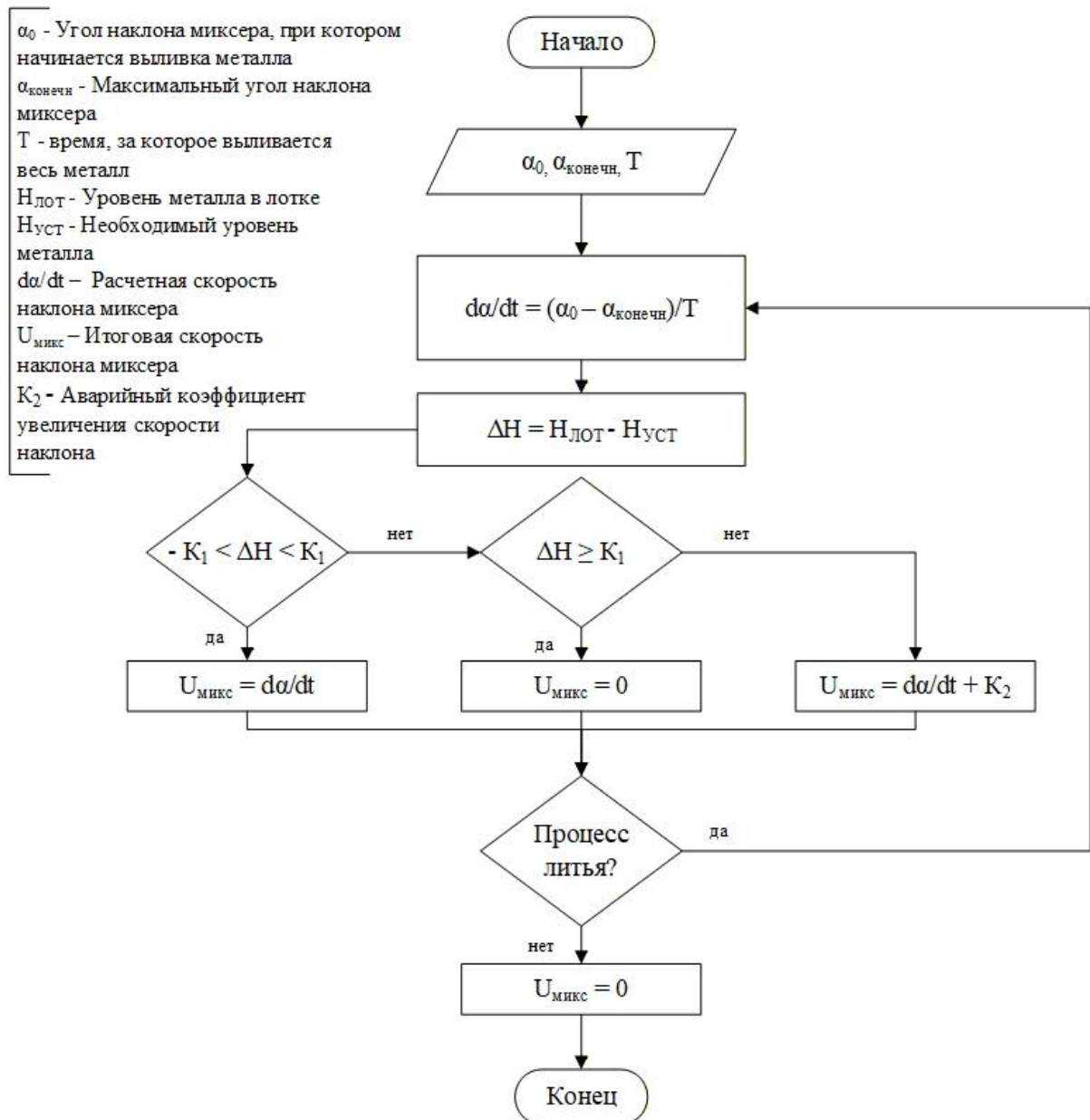


Рисунок 3.17 – Алгоритм расчета скорости наклона поворотного миксера

Так же, как и для стационарного, алгоритм включает в себя два режима:

- если уровень металла в лотке находится в допустимых пределах от заданного, то используется рассчитанное значение скорости наклона;

- если уровень металла в лотке выше либо ниже допустимого предела от заданного, то наклон миксер либо останавливается, пока уровень металла не вернется в допустимую зону, либо рассчитанная скорость увеличивается на определенный процент.

Скорость изменения угла наклона миксера рассчитывается по формулам 2.3.8, 2.3.9. Предел допустимого отклонения в данном случае равен 1%, но в зависимости от практической необходимости данное значение можно изменить.

3.4 Алгоритм управления работой литейной машины

На основании ранее определённого в главе 2 алгоритма расчета температуры слитка и приведенного в главе 1 списка критериев качества процесса литья, опишем полную методику управления литейной машиной (рис.3.18).

1. Согласно ранее представленному расчетному алгоритму в п. 2.3.6., используя шаги 2-9, производим расчет распределения температуры по высоте и ширине слитка в 4 областях и глубину лунки.

2. Дополнительно при расчете распределения температуры в области II в момент времени t_2 определяем толщину корковой зоны.

Рассчитываем критерий Ниямы (M), характеризующий дефект отливок. Как упоминалось ранее в главе 1, критерий является отношением модуля температурного градиента и скорость охлаждения слитка (формулы 1.6.5 -1.6.7). Тогда, методика расчета в модели, будет следующая:

Модуль температурного градиента:

$$G = \sqrt{\left(\frac{T_{X/4} - T_X}{X/2 - X/4}\right)^2 + \left(\frac{T_{y_2} - T_{y_3}}{y_3 - y_2}\right)^2}, \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{мм}} \quad (3.4.1)$$

Где: $T_{X/4}$, T_X - температуры металла в точках X/4 и X 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.

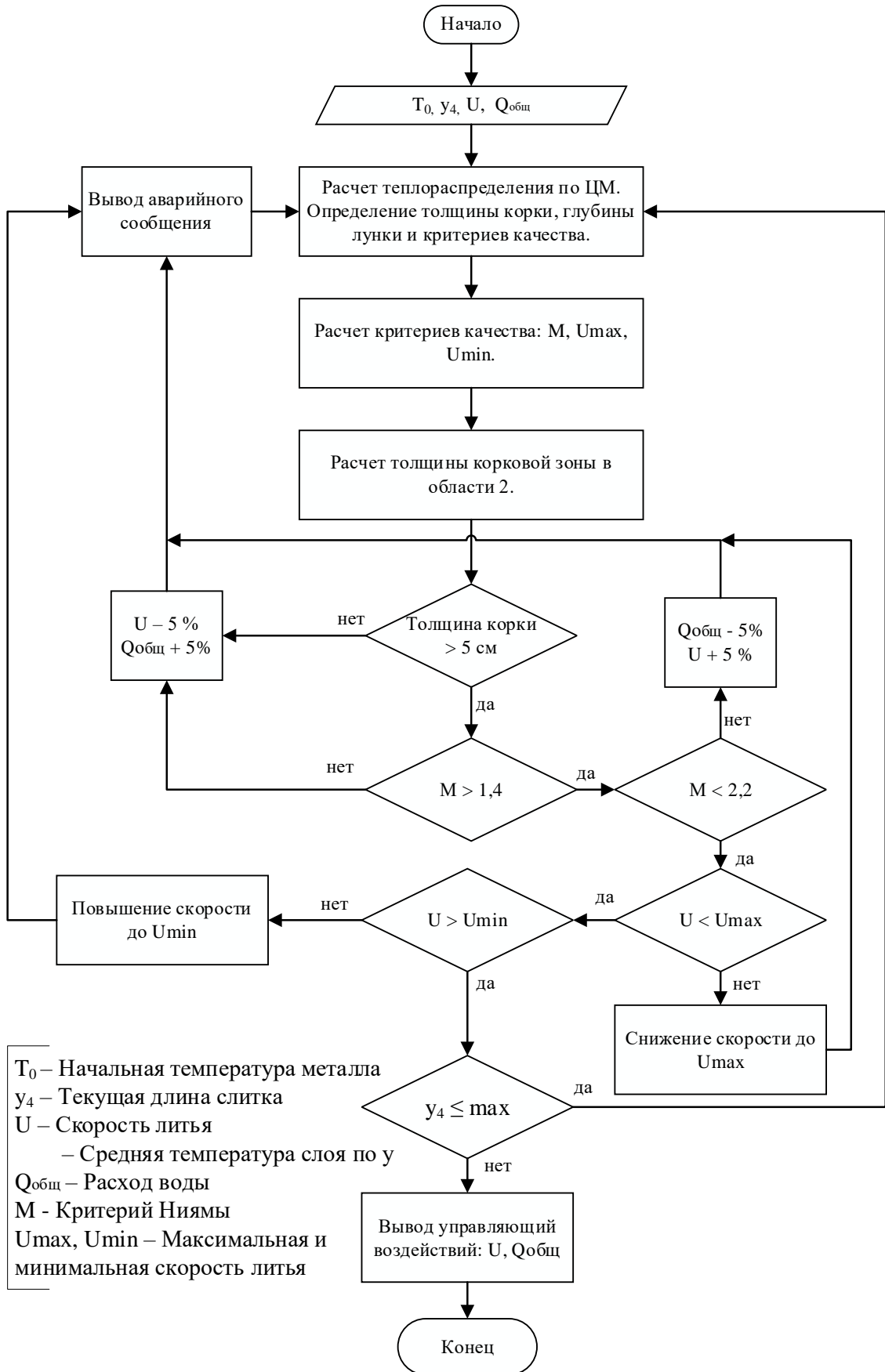


Рисунок 3.18 – Алгоритм контроля технологических параметров управления литейной машиной.

Скорость охлаждения слитка:

$$L = \left| \frac{T_{y_2} - T_{y_3}}{t_3} \right|, \frac{C}{\text{сек}} \quad (3.4.2)$$

Где: t_3 – Время нахождения металла в III области.

Критерий Ниямы:

$$M = \frac{G}{\sqrt{L}}, \frac{^{\circ}\text{C}^{0.5} \cdot \text{с}^{0.5}}{\text{мм}} \quad (3.4.3)$$

Рассчитываем скорость, обеспечивающую отсутствие холодных и горячих трещин по формулам 1.6.3, 1.6.4.

3. 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.

4. Если критерий Ниямы менее $1,4 \frac{^{\circ}\text{C}^{0.5} \cdot \text{с}^{0.5}}{\text{мм}}$ (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 $2,2 \frac{^{\circ}\text{C}^{0.5} \cdot \text{с}^{0.5}}{\text{мм}}$ (присутствует риск термических напряжений и поверхностных трещин), вводим корректировки в управляющие воздействия – уменьшение расхода охлаждающей жидкости и увеличение скорости литья. Вывод аварийного сообщения на панель оператора.

5. 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} . Вывод аварийного сообщения на панель оператора.

6. Если длина слитка не достигла заданного значения, возвращаемся к шагу 1, если достигла – завершаем литье.

3.5 Комплексный алгоритм управления литейным агрегатом

В ходе выполнения настоящего диссертационного исследования были успешно разработаны и верифицированы специализированные алгоритмы управления для ключевых функциональных узлов литейного агрегата (таких как система управления наклоном миксера, система расчета длины слитка, система контроля достоверности температуры металла в миксере, система управления литейной машиной).

Однако, эффективное функционирование литейного агрегата в целом как сложной технологической системы требует не просто автономной работы отдельных компонентов, а их строго согласованного и взаимосвязанного взаимодействия. Существующие разрозненные алгоритмы, несмотря на свою локальную эффективность, не решают в полной мере задачи синхронизации управляющих воздействий между узлами, оперативного реагирования на взаимовлияющие возмущения и оптимизации глобальных показателей процесса.

Таким образом, ключевой задачей работы является разработка целостного, интегрированного алгоритма управления литейным агрегатом. Этот алгоритм должен объединить ранее созданные модульные решения в единую управляющую структуру, обеспечивающую скоординированную работу всех узлов на основе общей стратегии управления и обмена данными в реальном времени.

Рассмотрим комплексный алгоритм управления литейным агрегатом, включающий расчет и контроль основных критериев качества и безопасности

процесса, и корректировку управляющих воздействий при обнаружении отклонений(рис.3.19).

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 – Работает блок 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 рисунках 3.16, 3.17. Расчет температуры металла на протяжении металлотракта рассчитываем по формуле 2.3.13.

Согласно ранее представленному расчетному алгоритму на рисунке 2.14, 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 скорость охлаждения слитка. Методика расчета описана выше. 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.

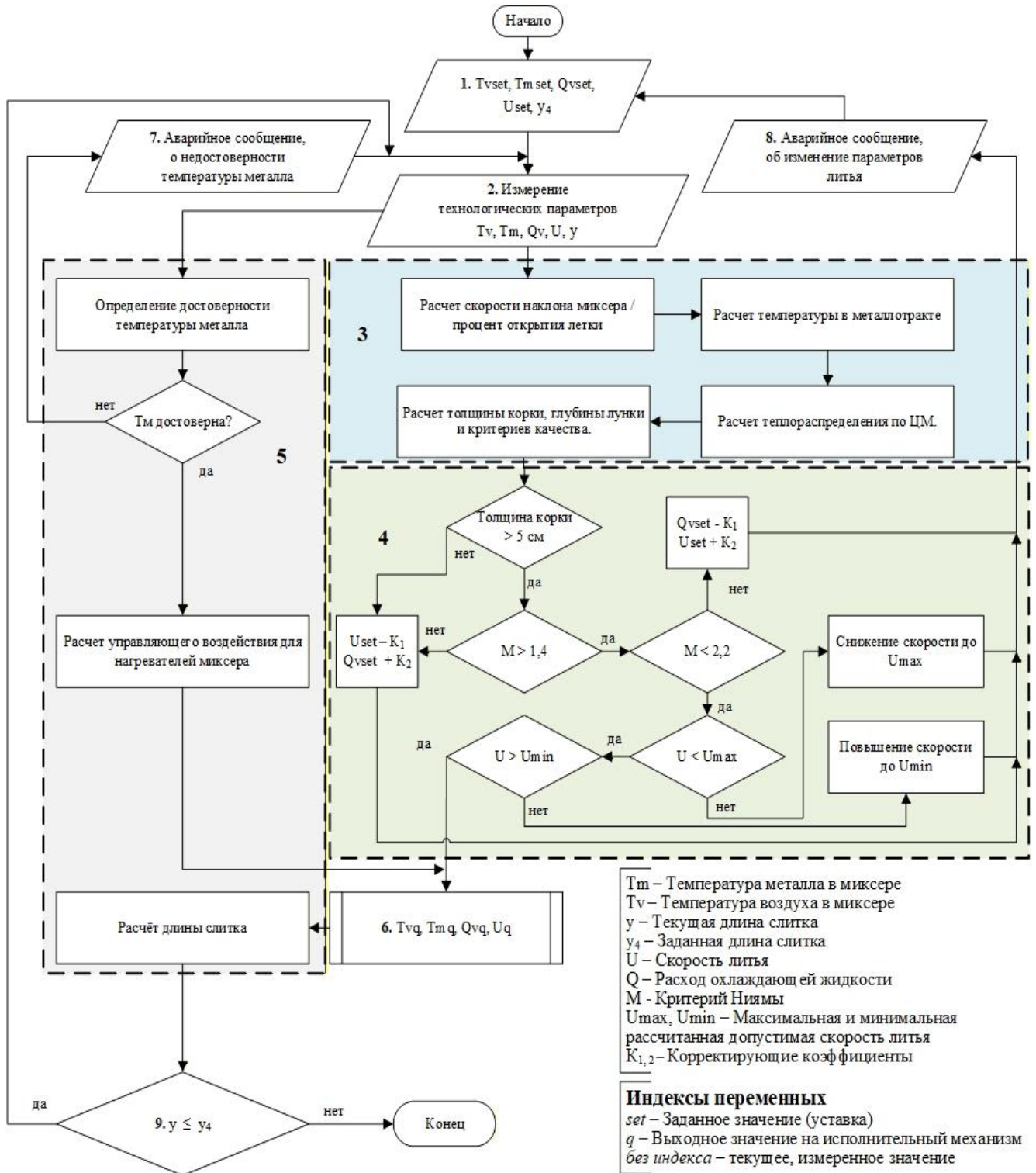


Рисунок 3.19 – Алгоритм управления литейным агрегатом на основе цифровой модели.

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.

Выводы по главе 3

На основании анализа работы литейного агрегата и разработанных собственных математических моделей отдельных процессов агрегата, разработаны специализированные алгоритмы управления и контроля:

1. Контроль достоверности температуры металла в миксере;
2. Алгоритм расчета длины слитка для тросовых литейных машин;
3. Алгоритм управления подачей металла из миксера в металлотракт (стационарный миксер);
4. Алгоритм управления подачей металла из миксера в металлотракт (поворотный миксер);
5. Алгоритм управления работой литейной машины.

Разработанные алгоритмы управления, базирующиеся на фундаментальном понимании физики процесса, достигнутом благодаря собственной математической модели, представляют собой научно обоснованный инструмент для повышения эффективности и качества процесса полунепрерывного литья. Их внедрение демонстрирует прямой перенос результатов теоретических исследований в практику современного металлургического производства.

Результатом данного этапа исследований стала разработка комплексного алгоритма управления литейным агрегатом, интегрирующего ранее созданные модульные решения для его отдельных узлов. 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. Достигнутый уровень интеграции позволяет перейти от локально эффективного управления узлами к глобально оптимизированному управлению всем технологическим процессом литья. Разработанная интеллектуальная система управления обеспечивает принципиально новые возможности по повышению стабильности, качества и экономической эффективности работы агрегата.

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).

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ЛИТЕЙНОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЦЕССА

Литье алюминиевых слитков является ключевым процессом в металлургической промышленности, обеспечивающим производство полуфабрикатов для авиастроения, автомобилестроения, энергетики и оборонной промышленности. Однако традиционные методы разработки литейных технологий сталкиваются с рядом существенных ограничений: высокая ресурсоемкость натуральных 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. В условиях растущих требований к точности и воспроизводимости процессов актуальным становится переход к цифровому моделированию, позволяющему оптимизировать технологию как на этапе виртуального проектирования, так и во время технологического процесса [84-90].

Разработка специализированного программного обеспечения для симуляции литья алюминиевых слитков представляет собой междисциплинарную задачу, объединяющую методы вычислительной термодинамики и компьютерной инженерии. Как упоминалось во второй главе, современные коммерческие пакеты (например, ProCAST,) обладают широким функционалом, но их применение для моделирования литья алюминиевых сплавов ограничено отсутствием интеграции в существующие системы управления технологическим процессом. А подход, основанный на предварительных расчётах, без учета реальных производственных ситуаций не всегда является достоверным [91-98].

Целью данной главы является описание разработки программного комплекса, обеспечивающего моделирование теплораспределения и кристаллизации при литье алюминиевых слитков с учетом изменения технологических параметров. Ключевые задачи включают:

1. Создание цифровой модели процесса литья алюминиевого слитка, интегрирующей комплекс математических моделей, приведенный ранее в главе 2.
2. Реализация в цифровой модели расчёт критериев качества процесса.
3. Верификация модели на основе экспериментальных данных и демонстрацию ее эффективности для оптимизации реальных литейных процессов.
4. Демонстрация результатов работы модели с алюминиевыми сплавами 1xxx и 3xxx серии.

4.1 Структура и интерфейс программного обеспечения «Цифровая модель вертикального литья алюминиевых плоских слитков»

Программное обеспечения цифровой модели имеет следующие функциональные блоки:

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.

На рис 4.1. представлена структурная схема цифровой модели изготовления слитка [99, 100]. Цифровая модель представляет собой комплекс взаимосвязанных вычислительных модулей, функционирующих по принципу последовательно-параллельной обработки данных. Взаимодействие модулей направлено на преобразование исходных технологических параметров в прогнозные критерии качества слитка через решение сопряженных задач теплопереноса и кристаллизации.

Блок «Ввод данных» является точкой входа в систему. Пользователь задает исходные параметры. Эти данные передаются в «Модуль подготовки данных» где происходит расчет необходимых коэффициентом теплообмена и различных

вспомогательных данных, формируются структуры таблиц (сетка данных) для дальнейшего заполнения.

Далее в вычислительных модулях «расчет по высоте» и «расчет по ширине» производится разделение слитка на области и расчет распределения температуры для каждой области. На основании этого заполняется база данных, сформированная ранее в модуле подготовки данных.

Графический модуль на основании сформированной базы данных в наглядном виде осуществляет визуализацию полей температур в вертикальной и горизонтальной проекции для всех определенных областей слитка в виде графиков и таблиц.

В вычислительном модуле «расчет критериев качества» на основании данных, сформированных в БД, выполняется расчет глубина лунки слитка, толщины корковой зоны, критерия Нийямы, скорости литья, обеспечивающая отсутствие горячих трещин, скорости литья, обеспечивающая отсутствие холодных трещин, модуля температурного градиента, скорости охлаждения слитка.

Далее полученные результаты доводятся до пользователя с помощью блока вывода данных. Данные представляются в оцифрованном формате и наглядных единицах измерения.

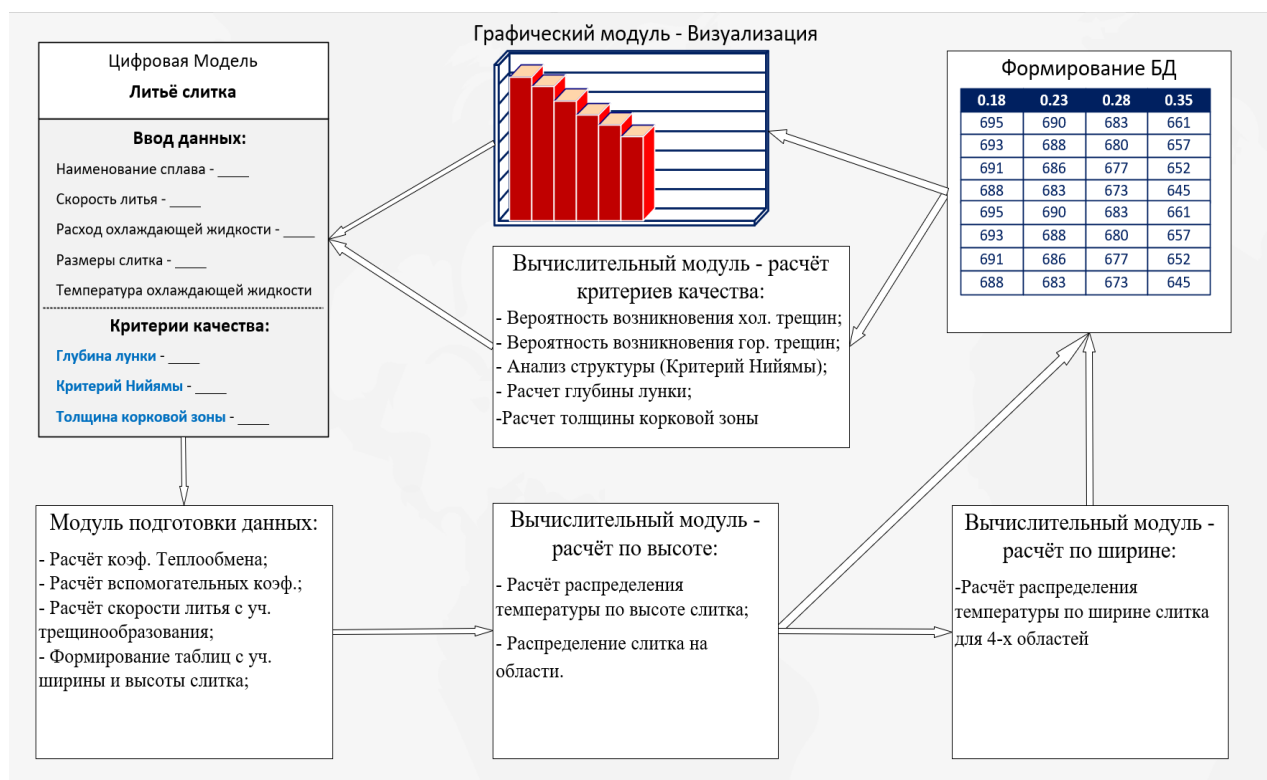


Рисунок 4.1 – Структурная схема цифровой модели – «Цифровая модель вертикального литья алюминиевых плоских слитков».

Интерфейс программного продукта включает:

- Диалоговое окно (рисунок 4.2) для ввода технологических параметров, параметров алюминиевого сплава, геометрических характеристик слитка. Элементы управления программой для начала расчета и вывода результатов расчета.

Параметры сплава: теплоёмкость сплава; теплопроводность сплава; плотность сплава (жидкая фаза); плотность сплава (твердая фаза); температура ликвидус; температура солидус; кинематическая вязкость сплава; начальная температура; тепло кристаллизации.

Технологические параметры процесса литья: скорость литья; расход охлаждающей жидкости; температура охлаждающей жидкости.

Геометрические параметры отливаемых слитков: ширина слитка; толщина слитка; длина слитка.

Параметры модели: шаг по высоте (для моделирования); шаг по ширине (для моделирования).

Параметры сплава		Технологические параметры		Параметры модели	
Плотность алюминия (ρ)	2450 кг/м ³	Расход воды	220 м ³ /час	Шаг по времени	3 сек
Теплоёмкость алюминия (c)	1100 Дж/(кг·К)	Скорость литья (U)	0,00108 м/сек	Шаг по координате (x)	0,023333 м
Теплопроводность	203,5	Толщина слитка (δ)	0,7 м	Шаг по координате (y)	0,01 м
Тепло кристаллизации	390000 Дж/кг	Температура воды	25 °С	Коэффициент α (металл-металл)	1000 Вт/м ² ·К
Температура ликвидус	622 °С	Температура металла T_0	695,74 °С	Температура кристаллизатора	200 °С
Температура солидус	570 °С	Время литья	300 сек	Температура воздушного зазора	300 °С
		Длина слитка	5 м		
		Толщина слитка	0,4 м		

Расчет

Рисунок 4.2 – Диалоговое окно для ввода параметров расчета.

Окно вывода информации формируется с помощью интегрированной графической библиотеки Steema.TeeChart VCL/FMX [101, 102]. Результаты расчет распределения температуры по высоте представляются в табличном виде и в виде графика (рисунок 4.4), который позволяет оценить среднюю температуру слоя слитка, толщина слоя зависит от параметра Δy – шаг по высоте.

Расчёт распределения температуры по ширине слитка производится для каждой из 4-х областей слитка. Отображение результатов расчет предусмотрено как в табличном, таки в графическом виде для каждой из 4-х зон соответственно (рисунок 4.3, 4.4).

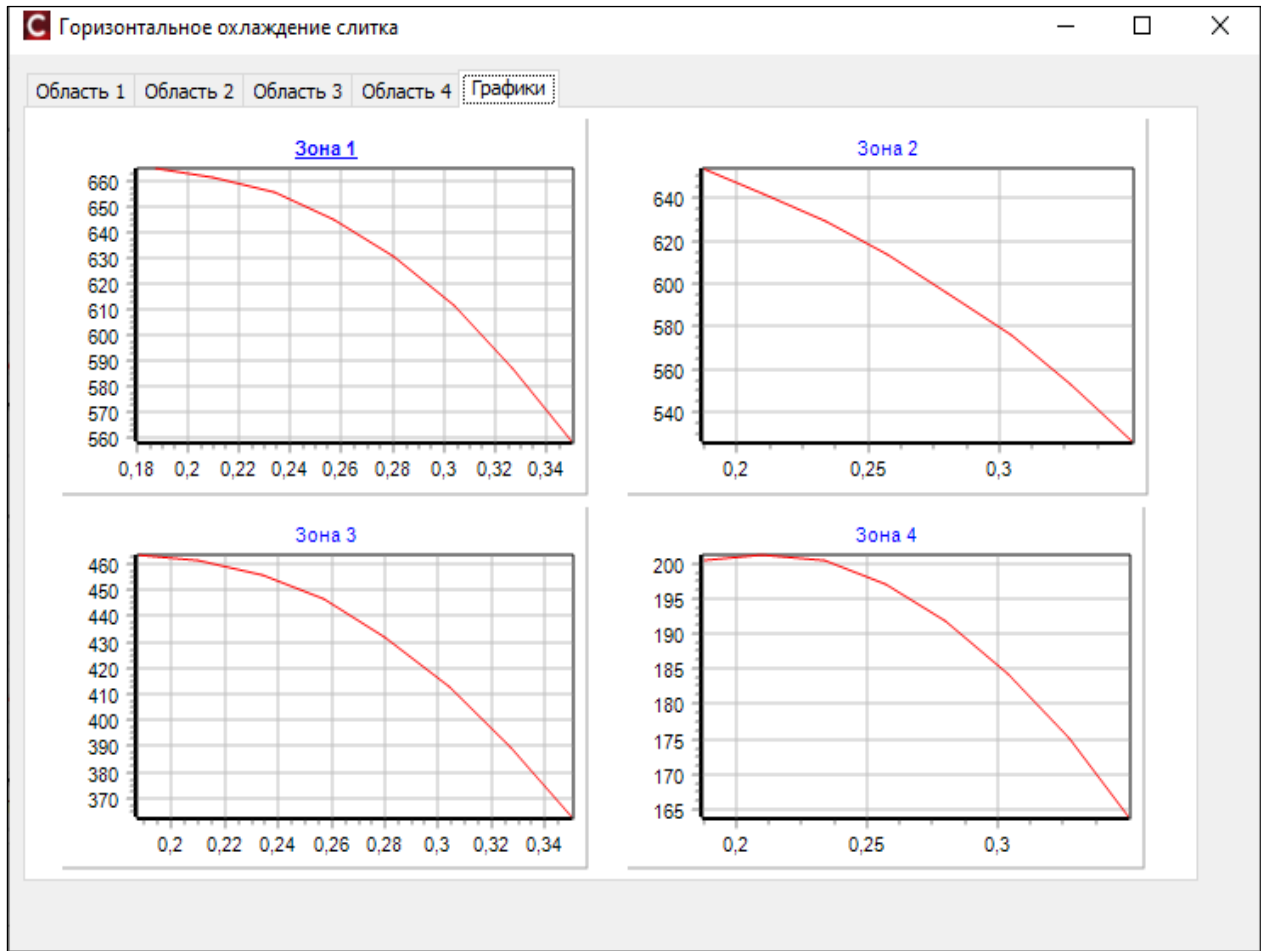


Рисунок 4.3 – Графический интерфейс отображения распределения температуры по ширине слитка.

Горизонтальное охлаждение слитка

Область 1 Область 2 Область 3 Область 4 Графики

Время, мин	Время, сек	0,187	0,210	0,234	0,257	0,280	0,304	0,327	0,350
0	0	644,13	634,368	622,413	608,158	591,390	571,677	548,848	522,929
0,05	3	644,13	633,456	621,456	607,112	590,165	570,380	547,562	508,737
0,1	6	633,81	632,904	620,481	606,029	588,984	569,118	540,902	502,572
0,15	9	633,81	628,112	619,637	604,950	587,810	565,644	536,694	498,676
0,2	12	633,81	626,957	617,052	603,929	585,719	562,821	532,921	495,184
0,25	15	623,69	625,687	615,713	601,812	583,768	559,908	529,660	492,165
0,3	18	623,69	620,706	614,079	600,088	581,348	557,250	526,645	489,374
0,35	21	623,69	619,190	611,015	598,112	579,119	554,543	523,871	486,806
0,4	24	613,77	617,661	609,048	595,578	576,796	552,007	521,211	484,344
0,45	27	613,77	612,458	607,027	593,368	574,297	549,508	518,685	482,005
0,5	30	613,77	610,744	603,603	591,116	571,918	546,997	516,248	479,749
0,55	33	604,04	609,032	601,379	588,324	569,537	544,572	513,855	477,534
0,6	36	604,04	603,771	599,131	585,939	566,966	542,179	511,523	475,375
0,65	39	604,04	601,952	595,573	583,534	564,547	539,737	509,238	473,260
0,7	42	594,50	600,167	593,218	580,643	562,124	537,370	506,958	471,150

Рисунок 4.4 – Табличный интерфейс отображения распределения температуры по ширине слитка.

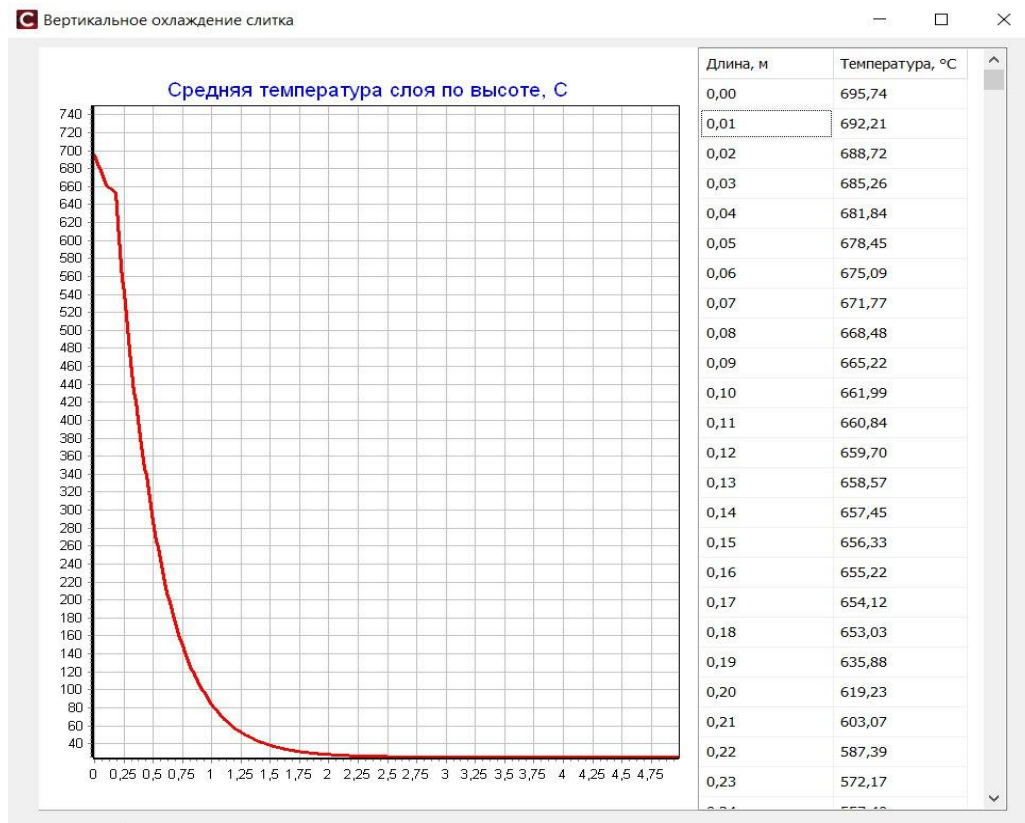


Рисунок 4.5 – Интерфейс отображения распределения температуры по высоте слитка.

В результате математических расчетов, в диалоговом окне пользователю выводятся критерии качества и безопасности технологического процесса (рисунок 4.6):

- Глубина лунки слитка;
- Толщина корковой зоны;
- Критерий Нийямы (анализ структуры слитка);
- Скорость литья, обеспечивающая отсутствие горячих трещин;
- Скорость литья, обеспечивающая отсутствие холодных трещин;
- Модуль температурного градиента;
- Скорость охлаждения слитка;

Охлаждение слитка

Вертикальное | Горизонтальное | **Оценка качества**

Коэффициент α (металл-воздух) Вт/м²·К

Коэффициент α (металл-вода) Вт/м²·К

Скорость литья обеспечивающая отсутствие горячих трещин м/сек

Скорость литья обеспечивающая отсутствие холодных трещин м/сек

G1

L1 (С/сек)^{0,5}

Критерий Нийямы С^{0,5}*сек^{0,5}/мм

Глубина лунки - По модели м

Толщина корковой зоны на выходе из кристаллизатора м

Рисунок 4.6 – Критерии качества технологического процесса.

4.2 Применение модели для анализа качества слитков и прогнозирования безопасности процесса

Для демонстрации функционирования цифровой модели проведем расчеты для сплава AlMg5 (1580), со следующими физическими свойствами (таблица 4.1):

Таблица 4.1 – Физические свойства сплава 1580.

Параметр	Значение	Размерность
Плотность сплава (ρ)	2660	кг/м ³
Теплоёмкость сплава (c)	922	Дж/(кг·К)
Температура ликвидус	630	°С
Температура солидус	445	°С
Теплопроводность сплава α	164	Вт/м·К
Температура металла T^0	705,5923358	°С
Ширина слитка (δ)	0,8	м
Толщина слитка	0,3	м

В таблице 4.2 представлены технологические параметры процесса:

Таблица 4.2 – Параметры литья.

Параметр	Значение	Размерность
Расход охлаждающей жидкости	200-250	м ³ /ч
Скорость литья	60-80	мм/мин
Высота кристаллизатора	0,17	м
Температура кристаллизатора - область 1, 2	100	°С
Количество одновременно отливаемых слитков	4	шт
Температура воды - область 3,4	25	°С
Температура металла T ⁰	705,5923358	°С
Теплопроводность воды	0,599	Вт/(м·К)
Теплоемкость воды	4180	Дж/(кг·К)
Плотность воды	997	кг/м ³
Температуропроводность воды	0,0000001437	м ² /с
Кинематическая вязкость воды	0,000000903	м ² /с

В результате моделирования различных режимов литья, получили следующие критерии качества и безопасности технологического процесса – таблица 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты моделирования различных режимов литья для сплава AlMg5.

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 Нийямы	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

В результате можно сделать вывод, что технологические параметры режима 2 и 3 не обеспечивают достаточную толщину корковой зоны слитка при выходе его из кристаллизатора, что может привести к прорыву металла. Также во втором режиме критерий Нийямы равен 1,28, что является ниже минимального предельного значения (1,4) – говорит о возможности образования пористости структуры.

Далее проведем сравнительное моделирование для сплава 3003. Параметры сплава и технологические параметры приведены на рисунке 4.7.

Параметры сплава		Технологические параметры		Параметры модели	
Плотность алюминия (ρ)	2730 кг/м ³	Расход воды	210 м ³ /час	Шаг по времени	3 сек
Теплоёмкость алюминия (с)	893 Дж/(кг·К)	Скорость литья (U)	0,001 м/сек	Шаг по координате (x)	0,023333 м
Теплопроводность	150	Толщина слитка (δ)	0,7 м	Шаг по координате (y)	0,01 м
Тепло кристаллизации	320000 Дж/кг	Температура воды	25 °С	Коэффициент α (металл-металл)	1000 Вт/м ² ·К
Температура ликвидус	653 °С	Температура металла T ₀	695,74 °С	Температура кристаллизатора	200 °С
Температура солидус	643 °С	Время литья	300 сек	Температура воздушного зазора	300 °С
		Длина слитка	5 м		
		Толщина слитка	0,4 м		

Расчет

Рисунок 4.7 – Параметры сплава и технологические параметры для сплава 3003.

В результате моделирования различных режимов литья получили следующие критерии качества и безопасности технологического процесса (таблица 4.4). В качестве режима 1 – представлен номинальный установившийся процесс, в

качестве режима 2 – смоделирована ситуация с неисправной термопарой, при котором фактическая температура металла в миксере на 20 °С выше полученной системой стационарного измерения [75].

Таблица 4.4 - Результаты моделирования различных режимов литья для сплава 3003.

Критерий/ Режим литья	Режим 1	Режим 2
	Скорость литья – 60 мм/мин Расход воды – 210 м ³ /ч Температура металла – 695°С	Скорость литья – 60 мм/мин Расход воды – 210 м ³ /ч Температура металла – 715°С
Толщина корковой зоны на вых. 2 зоны, мм	70	23
Критерий Нийямы, С ^{0,5} *сек ^{0,5} /мм	1,77	1,04
Коэффициент теплообмена, зона 2, Вт/м ² ·К	1153,6	1153,6
Коэффициент теплообмена, зона 3, Вт/м ² ·К	3776,4	3776,4
Модуль температурного градиента, °С/мм	0,869	0,718
Скорость охлаждения слитка, (°С/сек) ^{0,5}	0,738	0,691

При втором режиме зафиксировано критически опасное снижение толщины корковой зоны слитка при выходе его из кристаллизатора, что может привести к прорыву металла с последующим возникновением взрыва. Также во втором режиме критерий Нийямы равен 1,04, что является ниже минимального предельного значения (1,4) – говорит о высокой возможности образования пористости структуры.

4.3 Новый подход к управлению литейным агрегатом на основе цифровой модели литейной машины и моделей миксера и металлотректа

Модель функционирует как прогностический блок в составе комплексного алгоритма управления литейным агрегатом (рисунок 4.8). Ее работа в реальном времени включает следующие шаги [103, 104]:

1. Онлайн-расчет. На основе текущих измерений с датчиков (Скорость литья, расход воды, температуры воды, температура металла, длина слитка) и заданных параметров сплава модель циклически пересчитывает температурное поле, глубину лунки и, что важнее всего, толщину корки слитка в наиболее опасной зоне перехода от II к III области.

2. Контроль критерия безопасности. В алгоритме управления заложен порог минимально допустимой толщины корки. Эта величина определяется на основе прочностных расчетов, свойств конкретного сплава и производственного опыта. В наших расчетах в качестве критического принято значение 50 мм. В Режиме 2 (таблица 4.4) это условие немедленно нарушается.

3. Формирование корректирующего воздействия. При срабатывании порога по толщине корки алгоритм управления инициирует немедленную корректировку по заданной стратегии:

3.1. Снижение скорости литья. Это увеличивает время нахождения металла в кристаллизаторе (зоны I и II), способствуя росту корки. Модель позволяет рассчитать, насколько необходимо снизить скорость для достижения минимально допустимой толщины.

3.2. Увеличение расхода охлаждающей воды. Согласно встроенной методике, это приводит к росту коэффициента α_2 (теплоотвод через кристаллизатор) и α_3 (интенсификация вторичного охлаждения), что ускоряет затвердевание. Модель пересчитывает новые коэффициенты и прогнозирует результат.

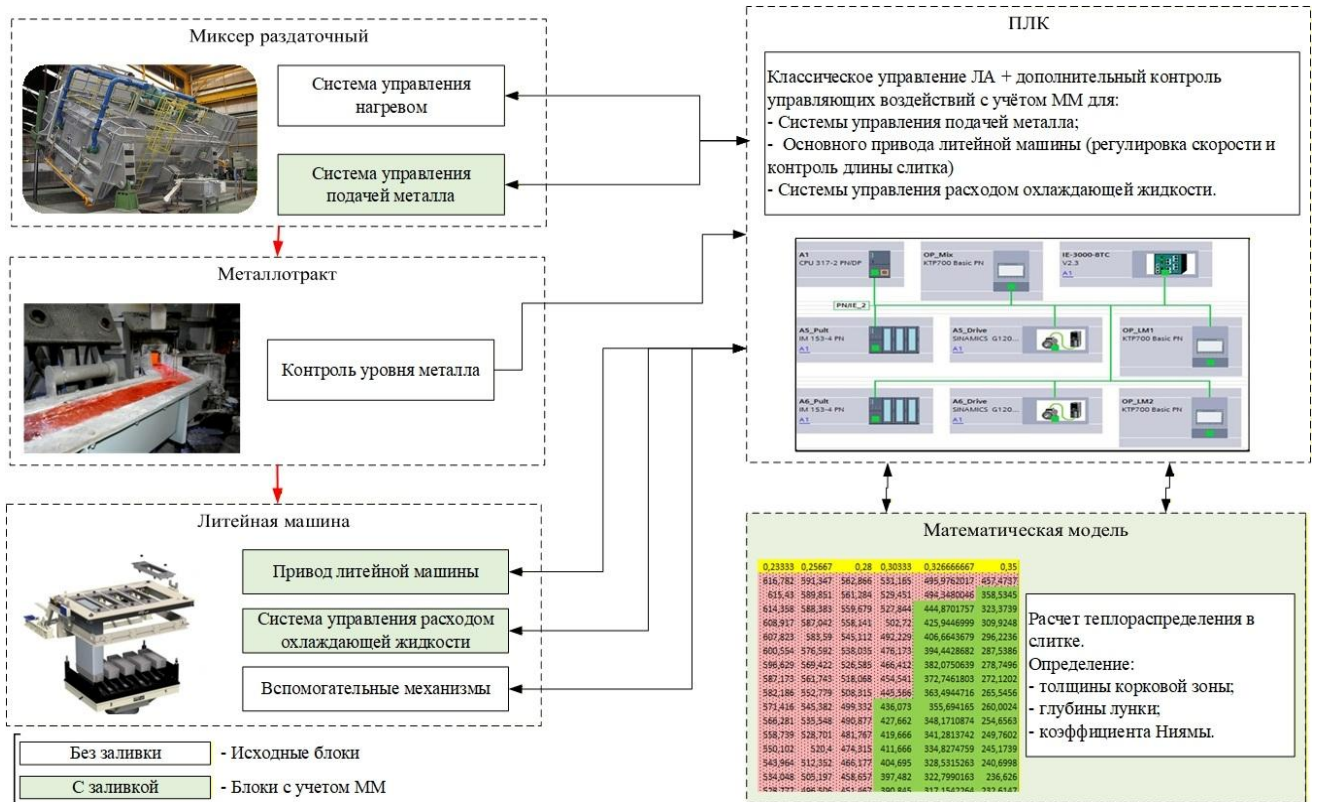


Рисунок 4.8 – Структурная схема управления литейным агрегатом с учетом математической модели процесса.

3.3. Расчет новых уставок производится итеративно самой моделью до достижения условия $\delta_{кор} > \delta_{min}$. В сложных случаях возможна одновременная корректировка обоих параметров.

4. Аварийная сигнализация. Одновременно с выдачей корректирующих сигналов на исполнительные механизмы (привод литейной машины, регулирующий клапан расхода воды) на панель оператора выводится приоритетное предупреждение о риске прорыва с указанием причин (например, «Недостаточная толщина корки: 23 мм при требуемых 50 мм») и списком предпринимаемых автоматических действий.

Таким образом, модель переводит систему управления из реактивного в предиктивный режим, позволяя предотвращать аварию за счет упреждающей корректировки режима за несколько минут до возможного критического события.

Выводы по главе 4

В рамках настоящей главы успешно продемонстрирована работоспособность и применимость разработанной цифровой модели процесса литья алюминиевых слитков в промышленно значимых условиях. Модель была протестирована на нескольких различных рецептурах литья.

Экспериментально подтверждена способность цифровой модели выявлять критические отклонения технологических параметров и прогнозировать их влияние на качество слитка. Модель 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.

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.

Результаты наглядно показали, что характер и критичность выявляемых моделью отклонений существенно зависят от конкретной рецептуры литья.

Разработана структурная схема интеллектуального управления литейным агрегатом на основе цифровой модели литейной машины и моделей миксера и металлотракта.

Заключение

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 использованной литературы

1. Энциклопедия технологий 2.0: Производство металлов / [гл. ред. Д.О.Скобелев] ; ФГАУ «НИИ «ЦЭПП». — Москва; Санкт-Петербург: Реноме, 2022. — 378с.
2. Алюминиевая ассоциация [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.aluminas.ru/aluminum/library.php>
3. Solutions for non-ferrous metals [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.precimeter.com/solutions/non-ferrous-metals>
4. Хазанов, Л. Алюминий: сплавы, прокат и профили для промышленности и строительства / Л. Хазанов // Металлург. – 2015. – № 9. – С. 102-105. – EDN UYCRSN.
5. Напалков, Виктор Иванович. Плавление и литьё алюминиевых сплавов: монография / В. И. Напалков, В. Ф. Фролов. - Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2020. - 716 с. - ISBN 978-5-7638-4269-2: Б. ц.
6. Вертикальные литейные машины прямого охлаждения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gl-tech.ru/products/vertikalnye-liteynye-mashiny-pryamogo-ohlazhdeniya>
7. Общее руководство по ремонту литейной машины ПНЛ-20, ООО «ИСО», Красноярск, 2019
8. Непрерывное литье алюминиевых сплавов : справочник / В. И. Напалков [и др.] ; ред. В. И. Напалков. - Электрон. текстовые дан. (32,91 Мб.). - Москва :Интернет Инжиниринг, 2005. - 511 с. : ил. - Загл. с титул. экрана. - Библиогр.: с. 508-509. - 1000 экз. - ISBN 5-89594-115-X.
9. Wagstaff / Products [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.wagstaff.com/Wagstaff/Products/Ingot-Castng.htm> (дата обращения: 12.12.2022).

10. Wagstaff / Shurcast [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.wagstaff.com/Wagstaff/Products/Shurcast.htm> (дата обращения: 12.12.2022).
11. Wagstaff / Billet-Casting [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.wagstaff.com/Russia/Products/Billet-Casting.htm> (дата обращения: 12.12.2022).
12. Общее руководство по ремонту литейной машины ПНГ30-60, ООО «ИСО», Красноярск, 2019
13. Макаров, Г.С. Слитки из алюминиевых сплавов с магнием и кремнием. Основы производства / Макаров Г.С. – М.: Интернет – Инжиниринг, 2011. – 528с
14. Шабалкин, Д. Ю. Организация технологической подготовки литейного производства изделий авиационной техники на основе принципов модели-ориентированного производства / Д. Ю. Шабалкин, О. Ю. Левкина, А. Х. Латыпов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18. – № 4-3. – С. 470-476. – EDN XWLHLP.
15. ПРОИЗВОДСТВО ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ДЕФОРМИРУЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ И МЕДНЫХ СПЛАВОВ: учебное пособие / Р. К. Мысик, Ю. Н. Логинов, А. В. Сулицин, С. В. Брусницын. Екатеринбург: УрФУ, 2011. 414 с.
16. Автоматизация литейного производства: Конспект лекций / Д.М.Кукуй, В.Ф.Одиночко. Минск БНТУ 2011.
17. Влияние AutoCast 2020™ на безопасность, качество и производительность: сайт – Wagstaff.com 2022г. URL: <https://www.wagstaff.com/Russia/Products/Automation/AutoCast-2020.htm>(дата обращения: 12.12.2022).
18. Wagstaff / AutoCast [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.wagstaff.com/Russia/Products/Automation/AutoCast-V.htm> (дата обращения: 12.12.2022).

19. Паспорт: автоматическое управление процессом литья Вагстафф AutoCast™. Красноярск, 2012.
20. Genuine Wagstaff, AutoCast, Система автоматического управления процессом литья, Красноярск, 2012.
21. Genuine Wagstaff, Технология литья прокатных слитков, Epsilon. 2013г.
22. Разработка цифровой модели влияния режимов литья на формирование микроструктуры стали / С. Л. Арапов, С. В. Беляев, А. А. Косович [и др.] // Литейщик России. – 2023. – № 1. – С. 32-34. – EDN YPROHF.
23. Mechanical properties and failure criterion analysis of Pt-Rh alloy sheets for technical purposes / S. B. Sidelnikov, S. V. Belyaev, E. S. Lopatina [et al.] // International Journal of Material Forming. – 2025. – Vol. 18, No. 3. – DOI 10.1007/s12289-025-01925-4. – EDN OCUBTZ.
24. Sustainable Pathways to Produce Aluminum Structural Castings / Q. Wang, J. Wang, Ja. Coryell, D. Apelian // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2025. – Vol. 11, No. 4. – P. 3521-3535. – DOI 10.1007/s40831-025-01186-0. – EDN USHKUN.
25. Chen, X. Creep-Fatigue Crack Growth Mechanisms at the Microstructural Scale in Secondary 319 Aluminum Alloy: Processing Parameter and Composition Effects / X. Chen, A. G. Spangenberg, D. A. Lados // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2025. – Vol. 11, No. 4. – P. 3536-3549. – DOI 10.1007/s40831-025-01225-w. – EDN AVIQID.
26. Влияние технологических факторов на образование дефектов структуры в крупнотоннажных слитках из алюминиевых сплавов серии 1XXX / В. Ф. Фролов, С. В. Беляев, И. Ю. Губанов [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2016. – Т. 14, № 2. – С. 25-31. – DOI 10.18503/1995-2732-2016-14-2-25-31. – EDN WBWGPD.
27. Разработка цифровой модели влияния режимов литья на формирование микроструктуры стали / С. Л. Арапов, С. В. Беляев, А. А. Косович [и др.] // Прогрессивные литейные технологии : Труды XI Международной научно-

практической конференции, Москва, 09–11 ноября 2022 года / Под редакцией В.Д. Белова и А.В. Колтыгина. – Москва: Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", 2022. – С. 395-399. – EDN АМАЈЛ.

28. Ливанов, Владимир Александрович. Непрерывное литье алюминиевых сплавов: В. А. Ливанов, Р. М. Габидуллин, В. С. Шипилов, «Металлургия» (Москва) – 168 с. 1977.

29. Будилов, И. Н. Моделирование образования алюминиевого слитка в процессе полунепрерывного литья / И. Н. Будилов, Ю. В. Лукашук, С. Ю. Лукашук // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2011. – Т. 15. – № 1(41). – С. 87-94. – EDN PWTMGF.

30. A.W. Lowery (2016) “Has Recent Advances in Direct Chill Casting Made Us Less Safe?” Light Metals 2016.

31. Состояние и прогнозирование производственного травматизма в литейных цехах / А. М. Лазаренков, И. А. Иванов, М. А. Садоха, А. А. Новик // Литейное производство. – 2024. – № 6. – С. 32-39. – EDN GTXDLH.

32. Alex W. Lowery Review of Recent Catastrophic Molten Metal Explosions and Their Causes - L. Edwards (ed.), Light Metals 2025, The Minerals, Metals & Materials Series, https://doi.org/10.1007/978-3-031-80676-6_140

33. The Great Debate - High Versus Low Water Direct Chill Casting Pits - Which Is Safer? Alex W. Lowery The Minerals, Metals&Materials Society 2022.

34. Gupta, A. Mathematical Optimization Models in Metal Recycling Industries / A. Gupta, B. Mishra, S. K. Das // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2025. – Vol. 11, No. 4. – P. 3511-3520. – DOI 10.1007/s40831-025-01288-9. – EDN FMWFWH.

35. Фомин, А. В. Математическая модель зависимости расхода газа в зонах печи от производительности прокатного стана / А. В. Фомин // Metallurg. – 2023. – № 2. – С. 111-116. – DOI 10.52351/00260827_2023_02_111. – EDN VWRXSZ.

36. Разработка цифровой модели литейного процесса изготовления деталей горно-обогатительного оборудования / С. Л. Арапов, С. В. Беляев, А. А. Косович [и др.] // Литейщик России. – 2023. – № 1. – С. 15-17. – EDN GYIZKK.
37. Цуприков, А. А. Математическая модель механической скорости проходки с тремя параметрами для оптимизации бурения нефтегазовых скважин / А. А. Цуприков // Проблемы управления. – 2022. – № 4. – С. 21-28. – DOI 10.25728/ru.2022.4.3. – EDN ONIFUI.
38. ГОСТ Р 57700.37-2021
39. Боровков А.И., Рябов Ю.А. Определение, разработка и применение цифровых двойников: подход Центра компетенций НТИ СПбПУ «Новые производственные технологии» Цифровая подстанция. – 2019. – № 12. – С. 20–25
40. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 стр., ил
41. Пискажова, Т. В. Управление процессом получения алюминия с помощью имитационной модели "Виртуальный электролизер" / Т. В. Пискажова // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2023) : Сборник трудов одиннадцатой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности, Казань, 18–20 октября 2023 года. – Казань: Издательство АН РТ, 2023. – С. 33-48. – EDN KVVTRD
42. Макаров, В. Л. Разработка цифровых двойников для производственных предприятий / В. Л. Макаров, А. Р. Бахтизин, Г. Л. Бекларян // Бизнес-информатика. – 2019. – Т. 13, № 4. – С. 7-16. – DOI 10.17323/1998-0663.2019.4.7.16. – EDN NWKMEZ.
43. Digital Manufacturing for Foundries 4.0 Prateek Saxena, Michail Papanikolaou, Emanuele Pagone, Konstantinos Salonitis, and Mark R. Jolly, Light Metals 2020

44. Digital Twin for Design and Optimization of DC Casting Lines» авторами К. О. Tveito and A. Håkonsen Light Metals 2022
45. ProCAST – Обзор литейных программ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lvmflow.ru/liteinye-programmy/procast/>
46. Будилов, И. Н. Моделирование образования алюминиевого слитка в процессе полунепрерывного литья / И. Н. Будилов, Ю. В. Лукашук, С. Ю. Лукашук // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2011. – Т. 15. – № 1(41). – С. 87-94. – EDN PWTMGF.
47. Сравнительный анализ программного обеспечения для задач тепломассопереноса при затвердевании слитков / В. И. Бондаренко, В. В. Белоусов, Ф. В. Недопекин [и др.] // Донецкие чтения 2019: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности : материалы IV Международной научной конференции, Донецк, 29–31 октября 2019 года. – Донецк: Донецкий национальный университет, 2019. – С. 19-22. – EDN IGAZVP.
48. Flow3d [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.flow3d.com/products/flow-3d-cast/>
49. ProCAST - Casting Simulation Software [Электронный ресурс]. URL: <https://www.esi-group.com/products/procast> [дата обращения 24.02.2024].
50. Numerical simulations of solidification and hot tearing for continuous casting of duplex stainless steel / Sh. Sh. Liu, L. Bai, Bo. Wang [et al.] // Journal of Iron and Steel Research, International. – 2020. – Vol. 27, No. 6. – P. 643-655. – DOI 10.1007/s42243-020-00406-z. – EDN XIERQN.
51. АСУТП «Литейного Агрегата №3 в ЛОН№2» в АО «РУСАЛ Красноярск» Руководство оператора, ООО «РУСАЛ ИТЦ», 2019г.
52. Якивбюк, П. Н. Математическая модель для управления охлаждением роторного кристаллизатора / П. Н. Якивбюк, Т. В. Пискажова, В. М. Белолипецкий // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т.

21, № 9(128). – С. 104-113. – DOI 10.21285/1814-3520-2017-9-104-113. – EDN ZIVWEJ.

53. Novikov V., Prof. Dr. Sc.Piskazhova T., Yakivuyuk P., Assoc. Prof.Ph.D. Doncova T. Automation of metal feeding in casting complexes. Industry 4.0 2023, summer session, vol 1. P. 85-89.

54. Решение некоторых проблем автоматизации при управлении литейной машиной. /Новиков В.А., Пискажова Т.В., Донцова Т.В.// Технология металлов. – 2023, №9,– С. 38-48.

55. «Виртуальный СЛИПП» - математическая модель для управления агрегатом СЛИПП и ее визуализация с помощью программных продуктов WinCC 7.0 и Step 7. /Пискажова Т.В., Сидельников С.Б., Белолипецкий В.М., Якивчук П.Н., Сидельников А.С.//Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. – 2015. - Выпуск 2(54). - С.140-144

56. Математическая модель и численное моделирование процесса литья и кристаллизации алюминия в магнитном поле с учетом свободной поверхности / А. В. Минаков, М. В. Первухин, Д. В. Платонов, М. Ю. Хацаюк // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2015. – Т. 55, № 12. – С. 2094. – DOI 10.7868/S0044466915120091. – EDN UVETUZ.

57. Будилов, И. Н. Моделирование образования алюминиевого слитка в процессе полунепрерывного литья / И. Н. Будилов, Ю. В. Лукашук, С. Ю. Лукашук // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2011. – Т. 15, № 1(41). – С. 87-94. – EDN PWTMGF.

58. Фомина, Е. Е. Моделирование и исследование процесса затвердевания заготовок при дискретно-непрерывном литье металлов / Е. Е. Фомина, Н. К. Жиганов // Компьютерные исследования и моделирование. – 2009. – Т. 1, № 1. – С. 67-75. – EDN JXLJGC.

59. Simulation of the Thermal Regime of Semi-Continuous Casting of Aluminum Alloy Ingots / A. I. Bezrukikh, A. A. Iliin, V. A. Matyushentsev [et al.] //

Metallurgist. – 2023. – Vol. 66, No. 9-10. – P. 1299-1307. – DOI 10.1007/s11015-023-01444-0. – EDN RKMGS.

60. Моделирование процесса кристаллизации слитков из алюминиевых сплавов при полунепрерывном литье / А. И. Безруких, И. Л. Константинов, Г. С. Гришко [и др.] // *Металлург.* – 2023. – № 11. – С. 159-164. – DOI 10.52351/00260827_2023_11_159. – EDN FXJТОК.

61. Бабий. Ю. И. Повышение эффективности сложных технических систем и литейных технологий на основе инструментариев численного моделирования и платформы автоматизации управления расчетами и анализа данных IOSO / Ю. И. Бабий // *Актуальные вопросы машиноведения.* – 2015. – Т. 4. – С. 58-60. – EDN YRHMOZ.

62. Обзор исследований по управлению толщиной и плоскостностью полосы при продольной прокатке / А. В. Кожевников, М. М. Скрипаленко, И. А. Кожевникова, М. Н. Скрипаленко // *Металлург.* – 2025. – № 7. – С. 103-111. – DOI 10.52351/00260827_2025_7_103. – EDN YWRMZR.

63. Разработка программно-аппаратного комплекса для поточного контроля труб в непрерывном производстве / И. Ю. Пышминцев, Е. А. Шкуратов, Г. А. Яшин [и др.] // *Металлург.* – 2025. – № 6. – С. 82-87. – DOI 10.52351/00260827_2025_6_82. – EDN MGNXNI.

64. Хныкин, А. В. Исследование зависимости формы лунки алюминиевого слитка от типа кристаллизатора / А. В. Хныкин // *Физико-химический анализ свойств многокомпонентных систем.* – 2006. – № 4. – С. 6. – EDN KTZJDD.

65. Якивбюк, П. Н. Математическая модель для управления охлаждением роторного кристаллизатора / П. Н. Якивбюк, Т. В. Пискажова, В. М. Белолипецкий // *Вестник Иркутского государственного технического университета.* – 2017. – Т. 21, № 9(128). – С. 104-113. – DOI 10.21285/1814-3520-2017-9-104-113. – EDN ZIVWEJ.

66. Ландау, Л.Д., Лившиц Е.М. Теоретическая физика, том VI. Гидродинамика, М., «Наука», 1986г, - 736 с.

67. Якубович, Е. А. Взаимосвязь технологических параметров непрерывного литья слитков алюминиевых сплавов в электромагнитный кристаллизатор / Е. А. Якубович // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2023. – № 34. – С. 41-45. – DOI 10.26160/2474-5901-2023-34-41-45. – EDN AGBLKF.

68. Моделирование и верификация полунепрерывного литья цилиндрических слитков из сплава 1379с / А. И. Безруких, А. А. Ильин, Н. А. Степаненко, Ю. В. Байковский // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2022. – Т. 12, № 4. – С. 54-70. – DOI 10.21869/2223-1528-2022-12-4-54-70. – EDN GOPUFA.

69. Рябчиков, М. Ю. Разработка модели для оптимизации управления термической обработкой стали при непрерывном горячем оцинковании / М. Ю. Рябчиков, Е. С. Рябчикова // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2025. – № 2(779). – С. 60-81. – EDN UCLCJJ.

70. Прохоров, А. В. Моделирование непрерывной отливки в кристаллизаторе / А. В. Прохоров // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2011. – № 4. – С. 52-55. – EDN NYKAON.

71. Скуратов, А. П. Компьютерное моделирование и оптимизация процесса литья слитков платины / А. П. Скуратов, Д. И. Махов, Е. А. Павлов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2014. – Т. 7, № 1. – С. 96-102. – EDN RZOMLZ.

72. Будилов, И. Н. Моделирование образования алюминиевого слитка в процессе полунепрерывного литья / И. Н. Будилов, Ю. В. Лукашук, С. Ю. Лукашук // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2011. – Т. 15, № 1(41). – С. 87-94. – EDN PWTMGF.

73. Панферов, В. И. Моделирование и идентификация процесса охлаждения и затвердевания непрерывнолитых слябовых заготовок / В. И. Панферов, С. В. Панферов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallургия. – 2024. – Т. 24, № 1. – С. 66-73. – DOI 10.14529/met240108. – EDN FVAOWK.

74. Производство отливок из сплавов цветных металлов / А. В. Курдюмов, В. Д. Белов, М. В. Пикунов [и др.]; под общ. ред. В. Д. Белова. 3-е изд., перераб и доп. М.: Изд. дом «МИСиС», 2011. 614 с.

75. Математическое моделирование процесса литья плоских слитков для решения задач автоматизации / В. А. Новиков, Т. В. Пискажова, Т. В. Донцова, В. М. Белолипецкий // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2024. – Т. 25, № 1. – С. 144-156. – DOI 10.31772/2712-8970-2024-25-1-144-156. – EDN WKAONU.

76. Теплофизика и металлургическая теплотехника: учеб. пособие / С. М. Тинькова. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. – 168 с.

77. Теплопередача: учебник, издание третье, переработанное / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел // Из-во «Энергия», Москва, 1975. – 485 с.

78. 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.

79. Технологическая инструкция, ТИ 449.02.03-2019, Редакция 01, ООО «РУСАЛ ИТЦ», 2019г.

80. SIEMENS, TIA Portal. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://new.siemens.com/ru/ru/produkty/avtomatizacia/industry-software/automation-software/tia-portal/programmnoe-obespechenie.html>

81. Руководство по программированию S7-1200/S7-1500 STEP 7 (TIA Portal) и STEP 7 Safety в TIA Portal, Базовое системное руководство, 2015г.

82. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов, Бронштейн И.Н., Семендяев К.А., Наука, Москва, 1981 г., 721 стр.

83. Тимингс, Роджер Л... Справочник инженера-механика : пер. с англ. / Р. Л. Тимингс. - Москва : Техносфера, 2008. - 629 с. : ил. - (Мир физики и техники). - 1500 экз. - ISBN 978-5-94836-183-3 : 680.00 р. - Текст : непосредственный.

84. Рябчиков, М. Ю. Разработка модели для оптимизации управления термической обработкой стали при непрерывном горячем оцинковании / М. Ю.

Рябчиков, Е. С. Рябчикова // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2025. – № 2(779). – С. 60-81. – EDN UCLCJJ.

85. Machine Learning-Based Forecasting of Output Currents for Demand Response Management and Energy Distribution Optimization in Low-Voltage DC Microgrids / E. Abdallah, K. Menoufi, N. Shehata, M. A. Ghalib // Mechatronics, Automation, Control. – 2025. – Vol. 26, No. 1. – P. 28-38. – DOI 10.17587/mau.26.28-38. – EDN SWRMKC.

86. Май, С. З. Настройка параметров ПИД регулятора скорости вращения бесщеточного двигателя постоянного тока с использованием метаэвристических алгоритмов / С. З. Май, И. А. Ходашинский, Ю. А. Шурыгин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2025. – Т. 26, № 9. – С. 480-487. – DOI 10.17587/mau.26.480-487. – EDN DPHUAO.

87. Re-designing A380 Secondary Aluminum Die Cast Alloys from Automotive Twitch Scrap / G. Garcia, M. Gavin, J. Garren [et al.] // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2025. – Vol. 11, No. 4. – P. 3477-3494. – DOI 10.1007/s40831-025-01241-w. – EDN IPLHHH.

88. Integrating Artificial Intelligence into Life Cycle Assessment: A Framework for Balancing Automation and Human Expertise / Ch. C. Nwagwu, O. Ogorodnyk, E. Sølvsberg [et al.] // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2025. – Vol. 11, No. 4. – P. 3590-3605. – DOI 10.1007/s40831-025-01305-x. – EDN YRUSMF.

89. Development and research of technology for obtaining welding wire from aluminum-silicon alloys using rolling-extrusion / S. B. Sidelnikov, R. E. Sokolov, S. V. Belyaev [et al.] // International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. – 2024. – Vol. 7, No. 1. – P. 87-96. – DOI 10.1016/j.ijlmm.2023.09.004. – EDN ZLUAIV.

90. Рябчиков, М. Ю. Идентификация модели объекта при наличии неизвестных возмущений с широким частотным диапазоном на основе перехода к приращениям сигналов и отбора данных / М. Ю. Рябчиков, Е. С. Рябчикова // Компьютерные исследования и моделирование. – 2024. – Т. 16, № 2. – С. 315-337. – DOI 10.20537/2076-7633-2024-16-2-315-337. – EDN JYYOPQ.

91. Разработка интеллектуальной системы контроля и оптимального позиционирования валков при производстве труб в непрерывном стане / И. Ю. Пышминцев, Е. А. Шкуратов, В. Д. Белов [и др.] // *Металлург.* – 2025. – № 11. – С. 24-32. – DOI 10.52351/00260827_2025_11_24. – EDN MNQSPB.

92. Система автоматического управления тепловым состоянием отражательных печей при производстве никелевых сплавов / К. В. Э. Кирос, В. Ю. Бажин, С. А. Мартынов, П. Ф. Р. Охеда // *Металлург.* – 2022. – № 1. – С. 85-93. – DOI 10.52351/00260827_2022_01_85. – EDN OXDYOP.

93. Разработка и промышленная эксплуатация интеллектуальной системы детектирования клейма литой заготовки в АО "ОЭМК им. А.А. Угарова" / Д. А. Полещенко, А. В. Фомин, А. И. Глущенко, И. С. Зорин // *Металлург.* – 2022. – № 3. – С. 97-103. – DOI 10.52351/00260827_2022_03_97. – EDN FOPFLO.

94. Тагирова, К. Ф. Концептуальные основы автоматизации управления установками электроцентробежных насосов нефтедобывающих скважин / К. Ф. Тагирова, И. Ф. Нугаев // *Мехатроника, автоматизация, управление.* – 2020. – Т. 21, № 2. – С. 102-109. – DOI 10.17587/mau.21.102-109. – EDN MZJIYA.

95. Оценка массы чугуна, выпущенного из доменной печи / А. Д. Чернопольский, С. В. Агеев, А. А. Дмитриев [и др.] // *Металлург.* – 2017. – № 4. – С. 36-40. – EDN YMDOGZ.

96. Идентификация технологических процессов производства губчатого титана / Ю. П. Кирин, А. В. Затонский, В. Ф. Беккер, С. Л. Краев // *Проблемы управления.* – 2008. – № 4. – С. 71-77. – EDN JJSAFX.

97. Тагирова, К. Ф. Решение актуальных задач автоматизации технологического процесса добычи нефти на основе иерархической системы моделей / К. Ф. Тагирова // *Мехатроника, автоматизация, управление.* – 2007. – № 9. – С. 37-41. – EDN IBUPIR.

98. Рябчиков, М. Ю. Модели для упреждающего управления тепловыми процессами термической обработки стали на агрегатах непрерывного горячего оцинкования / М. Ю. Рябчиков, Е. С. Рябчикова // *Известия высших учебных*

заведений. Машиностроение. – 2023. – № 12(765). – С. 80-96. – DOI 10.18698/0536-1044-2023-12-80-96. – EDN UUNLLG.

99. 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

100. 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

101. TeeChart VCL/FMX – Steema Documentation <https://www.steema.com/docs/TeeChartVCL/> (дата обращения: 25.06.2025).

102. Руководство по языку программирования C++ - <https://metanit.com/cpp/tutorial/> (дата обращения: 25.06.2025)

103. 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>

104. 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>

ПРИЛОЖЕНИЕ А



Инжиниринг
Строительство
Обслуживание



Утверждаю:

Исполнительный директор

ООО «ИСО»

Иванов О.А.

18.06.2025 г.

АКТ

использования результатов исследования, полученных в диссертационной работе Новикова Виктора Андреевича «Модели и алгоритмы для управления процессом полунепрерывного литья».

Настоящий акт подтверждает, что в практику алгоритмов управления АСУТП тросовыми литейными машины (ПНЛ) и стационарными миксерами внедрены отдельные результаты исследования Новикова В.А., а именно:

- 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 (1,32%) до 6,7 мм (0,13%).

- 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:

1. Ранее обнаружение неисправности: Срабатывает до выхода параметров в аварийный и предупредительный диапазон.
2. Дифференциация причин: Физические пороги отделяют сбои датчиков от реальных технологических отклонений.
3. Минимальные ресурсы: Не требует сложных ML-моделей, работает в real-time на ПЛК.

Начальник цеха автоматизации
производства филиала ООО «ИСО»
в г. Красноярске

Директор департамента управления
надежностью оборудования
ООО «ИСО»

Егоров В.К.

Каныгин А.Ю.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Утверждаю:


 Директор Дирекции
 по автоматизации производства
 ООО «РУСАЛ ИТЦ»
 Гринишин М.Е.
 12.12.2025 г.

АКТ

О возможности использования цифровой модели литья алюминиевых слитков с целью повышения качества и безопасности технологического процесса, разработанной Новиковым Виктором Андреевичем в рамках диссертационного исследования.

Настоящий акт подтверждает возможность использования разработанной Новиковым В.А. цифровой модели процесса вертикального литья алюминиевых плоских слитков на технологическом оборудовании алюминиевых заводов АО «РУСАЛ».

В рамках демонстрации работоспособности модели была отмечена ее эффективность в направлении повышения безопасности процесса литья за счет непрерывного контроля поверхности закристаллизовавшегося слоя слитка и возможности автоматической коррекции управляющих воздействий при обнаружении критически опасного снижения толщины этой поверхности.

Модель демонстрирует потенциал для косвенного контроля и прогнозирования качества микроструктуры слитка; позволяет через расчет полей температур и скоростей охлаждения оценивать параметры, напрямую влияющие на качество отливаемого сплава, что открывает новые возможности для целенаправленного управления свойствами готового продукта.

Однако, несмотря на значительный прогресс в технологии литья, причинно-следственные связи между управляющими воздействиями, динамикой процесса и образованием специфических дефектов внутренней структуры остаются количественно недостаточно изученными. Это создает фундаментальное ограничение для любой прогнозной модели, включая разработанную.

Также предложено тиражировать ранее внедренный алгоритм расчета длины слитка на остальные тросовые литейные машины алюминиевых заводов АО «РУСАЛ» с целью снижения тех. отходов и себестоимости производства.

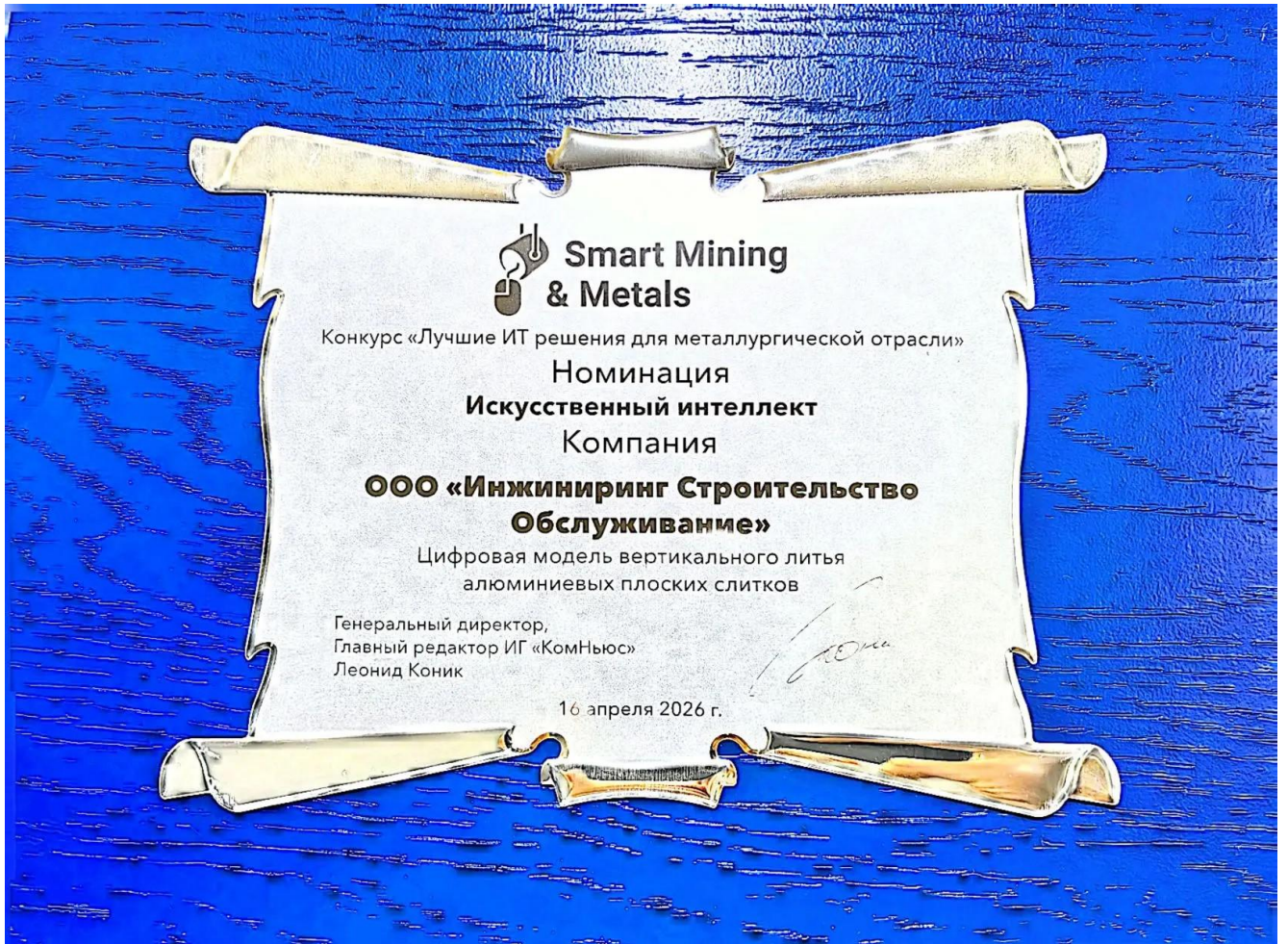
Директор Департамента импортозамещения и
НИОКР

Начальник отдела Департамента технологии
литья АЗ


 Костин И.В.

 Качан Д.С.

ПРИЛОЖЕНИЕ В



ПРИЛОЖЕНИЕ Г

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025687610

**Цифровая модель вертикального литья алюминиевых
плоских слитков**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский федеральный университет» (RU)*

Авторы: *Новиков Виктор Андреевич (RU), Полякова
Александра Дмитриевна (RU), Пискажова Татьяна
Валериевна (RU)*

Заявка № 2025687116

Дата поступления 10 октября 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 15 октября 2025 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов