

На правах рукописи



МАРТУСЕВИЧ ЕФИМ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В МИКСЕРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ПРОГРАММНО-ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ**

Специальность

2.6.2. «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новокузнецк – 2023 г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет» (ФГБОУ ВО «СибГИУ»)

Научный руководитель: **Рыбенко Инна Анатольевна**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладных информационных технологий и программирования федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет» (ФГБОУ ВО «СибГИУ»).

Официальные оппоненты: **Спирин Николай Александрович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплофизики и информатики в металлургии федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина» (ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»).

Безруких Александр Иннокентьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры литейного производства федерального государственного автономного образовательного учреждения «Сибирский федеральный университет» (ФГАОУ ВО «СФУ»).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет».

Защита состоится 23.05.2023 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета 24.2.401.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» по адресу: 654007, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, Центральный р-н, ул. Кирова, зд. 42. Факс (3843) 46-57-92, e-mail: ds21225201@sibsiu.ru. С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «СибГИУ», г. Новокузнецк (<http://www.sibsiu.ru>).

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент

Уманский Александр Александрович



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В настоящее время одной из стратегически важных и ресурсоемких отраслей промышленности является цветная металлургия, в частности производство алюминиевых сплавов. Так, за 2022 год выпущено 68,4 млн. т первичного алюминия, а за последние десять лет в мире произведено более 1 млрд. т различных алюминиевых сплавов. Алюминиевые сплавы являются одними из основных конструкционных материалов, применяемых в промышленности, так как отличаются легкостью, высокой прочностью, коррозионной стойкостью и обладают рядом других важных эксплуатационных свойств.

Формирование алюминиевого сплава с заданными характеристиками осуществляется в миксере литейного отделения и является сложным физико-химическим процессом, заключающемся в последовательном смешивании алюминия-сырца, полученного методом электролиза, с последующей обработкой расплава лигатурами и флюсами. Этот этап производства связан с наличием избыточного количества корректирующих воздействий из-за многозадачности и многофакторности процесса, что приводит к увеличению времени приготовления расплава, снижению производительности электрического миксера сопротивления и повышению затрат на единицу готовой продукции. Следовательно, совершенствование технологии и разработка оптимальных ресурсосберегающих режимов формирования алюминиевого расплава в электрических миксерах сопротивления является актуальной задачей алюминиевого производства.

Совершенствование технологического процесса формирования алюминиевых сплавов связано с затратностью проведения экспериментальных исследований. В связи с этим, большое значение приобретает вычислительный эксперимент с использованием инструментов математического моделирования и программно-инструментальных систем, который обеспечит получение сплавов с заданными свойствами при минимальных затратах на получение единицы продукции. Поэтому, в рамках интенсивной цифровой трансформации металлургической отрасли актуальна разработка и промышленное применение программных средств, позволяющих оптимизировать технологический процесс получения алюминиевых сплавов, снизив временные, энергетические и материальные затраты, а также повысить производительность миксеров литейных отделений.

Работа выполнена в соответствии с грантом РФФИ («Конкурс на лучшие проекты фундаментальных научных исследований, выполняемых молодыми учеными, обучающимися в аспирантуре», договор № 19-37-90087\19), а также в рамках государственного задания (шифр темы 0809-2021-0013).

Степень разработанности темы исследования

Технологические аспекты производства первичного алюминия и алюминиевых сплавов рассмотрены в работах Ю. В. Борисоглебского, Дж. Е. Хетча, Г. В. Галевского, М. Я. Минциса, Э. А. Янко, В. М. Белецкого, Х. Ри, Г. С. Макарова, В. Г. Тереньтева и других авторов. Вопросы математического моделирования физико-химических, тепломассообменных процессов, методов разработки и применения программных комплексов и инструментальных систем в металлургии алюминия отражены в работах Б. М. Горенского, В. В. Дембовского.

На промышленных предприятиях компании «РУСАЛ» применяются автоматизированная обучающая система управления процессом электролиза и автоматизированное рабочее место (АРМ) «Шихтовщик», однако для технологий получения алюминиевых сплавов в миксерах такие разработки отсутствуют.

Цель работы

Совершенствование технологии и разработка ресурсосберегающих режимов получения алюминиевых сплавов в электрических миксерах сопротивления с использованием программно-инструментальной системы моделирования и оптимизации.

Задачи исследования

1. Анализ современных технологий получения алюминиевых сплавов из первичного алюминия, а также подходов к их математическому моделированию и оптимизации.

2. Разработка метода и средств расчета оптимальных режимов получения алюминиевых сплавов в электрических миксерах сопротивления:

- динамической модели изменения химического состава и температуры расплава в миксере при порционном смешивании первичного алюминия и обработке его флюсами и лигатурами;

- детерминированной математической модели процессов диффузии компонентов расплава в ванне миксера при получении алюминиевых сплавов;

- метода динамического программирования с использованием симплекс-метода для расчета оптимальных параметров и режимов порционного формирования алюминиевых сплавов в миксере с учетом изменяющихся начальных условий и технологических ограничений;

- разработка программного комплекса «Алюминщик» для реализации математических моделей и метода оптимизации.

3. Исследование на базе разработанных моделей закономерностей динамики изменения химического состава расплава в электрических миксерах сопротивления при производстве алюминиевых сплавов.

4. Разработка оптимальных ресурсосберегающих режимов получения алюминиевых сплавов в электрических миксерах сопротивления с использованием реализованного программного комплекса «Алюминщик».

5. Внедрение программного комплекса «Алюминщик» и результатов математического моделирования на предприятиях АО «РУСАЛ Новокузнецк» и ООО «Полимет», а также в учебный процесс ФГБОУ ВО «СибГИУ» при подготовке бакалавров по направлениям: 22.03.02 Metallurgy; 09.03.01 Informatics and computational techniques; 09.03.03 Applied informatics.

Научная новизна

1. Математическая модель изменения химического состава и температуры расплава при порционном смешивании первичного алюминия, обработке его флюсами, лигатурами и учитывающая процессы диффузии компонентов в ванне миксера при получении алюминиевых сплавов различных марок.

2. Метод расчета оптимальных параметров порционного смешивания алюминия-сырца в миксере с учетом обработки лигатурами и флюсами, включенный в схему алгоритма динамического программирования с использованием

симплекс-метода при изменяющихся начальных условиях и ограничениях, обеспечивающий решение задачи формирования алюминиевого расплава с заданными характеристиками при минимальных технологических затратах.

3. Оптимальные ресурсосберегающие режимы получения алюминиевых сплавов, обеспечивающие получение металла с заданными свойствами, повышение производительности электрических миксеров сопротивления и снижение затрат на единицу продукции.

Теоретическая и практическая значимость работы

Разработанные математические модели и метод оптимизации позволяют разрабатывать новые и совершенствовать существующие технологии производства алюминиевых сплавов в электрических миксерах сопротивления, обеспечивающие ресурсо- и энергосбережение, повышение производительности и качества алюминиевой металлопродукции. Программный комплекс «Алюминщик» предназначен для использования в качестве интеллектуального помощника технологического персонала, повышения квалификации работников алюминиевой промышленности, а также обучения студентов вузов и техникумов.

Методология и методы исследования

Методология работы основана на концепции разработки ресурсосберегающих режимов получения алюминиевых сплавов в электрических миксерах сопротивления на базе математического моделирования и решения оптимизационных задач. Для достижения цели и решения поставленных задач использовались методы термометрии для определения температуры формируемого расплава, химического и спектрального анализа для оценки состава расплавов первичного алюминия, а также методы математического моделирования, оптимизации и динамического программирования.

Положения, выносимые на защиту

1. Детерминированная математическая модель динамики изменения химического состава и температуры расплава при порционном смешивании первичного алюминия, обработке его флюсами и лигатурами в процессе получения алюминиевых сплавов в электрических миксерах сопротивления.

2. Метод расчета оптимальных параметров процесса получения алюминиевого расплава с заданным химическим составом, массой и температурой при минимальных технологических затратах.

3. Установленные закономерности динамики изменения химического состава расплава и влияния оптимальных параметров порционного смешивания на технико-экономические показатели работы электрических миксеров сопротивления.

4. Оптимальные ресурсосберегающие режимы получения алюминиевых сплавов, включающие стадии: формирования основы из первичного алюминия, ввода легирующих материалов и последующей обработки флюсами полученного расплава в миксере.

Степень достоверности результатов подтверждается корректным использованием методов математического моделирования и оптимизации, сходимость результатов теоретических исследований с результатами промышленных данных, адекватностью математических моделей, проверенных путем

сопоставления расчетных и фактических данных промышленных плавок.

Апробация результатов. Основные результаты работы были изложены на научно-практических конференциях, семинарах и совещаниях различного уровня: Международная научная конференция «Актуальные проблемы прочности» (Витебск, 2012); Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Новокузнецк, 2014, 2015, 2016, 2017); XI Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием AS'2017 «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве» (Новокузнецк, 2017); II Международная научно-практическая конференция «Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности», посвященная 90-летию заслуженного деятеля науки и техники Ю. Г. Ярошенко (Екатеринбург, 2017); XX Международная научно-практическая конференция «Металлургия: технологии, инновации, качество» (Новокузнецк, 2017); Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии научного развития» (Казань, 2017); X и XII Международная научно-практическая конференция «Информация и образование: границы коммуникаций» (Алтай, 2018, 2020); VIII и IX Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» с международным участием (Екатеринбург, 2019, 2020); V Международная научно-практическая конференция «Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах» (Новокузнецк, 2021); XXIII Международная научно-практическая конференция «Металлургия: технологии, инновации, качество» (Новокузнецк, 2022); XIV Всероссийская научно-практическая конференция Системы Автоматизации (в образовании, науке и производстве) AS'2022 (Новокузнецк, 2022).

Личный вклад автора заключается в создании математической модели процесса формирования алюминиевого расплава, разработке численного метода оптимизации параметров смешивания алюминия-сырца из литейных ковшей в миксере с учетом присадок лигатур и флюсов, в проектировании и реализации программного комплекса «Алюминщик» на языке программирования высокого уровня C# с использованием объектно-ориентированного подхода, в проведении численных экспериментов, анализе полученных результатов, разработке оптимальных технологических режимов получения алюминиевых сплавов различных марок в миксере.

Соответствие паспорту специальности

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.6.2. «Металлургия черных, цветных и редких металлов»: п. 23 «Материало-и энергосбережение при получении металлов и сплавов»; п. 26 «Математическое моделирование процессов производства черных, цветных и редких металлов, формирования техногенных месторождений и способов их утилизации. Управление и оптимизация металлургическими процессами».

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 27 печатных работ, в том числе: 7 – в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК; 3 – в изданиях,

индексируемых базами Scopus и Web of Science; 13 – в сборниках всероссийских и международных конференций. Получено 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений. Изложена на 140 страницах, содержит 45 рисунков, 14 таблиц, список литературы из 148 наименований и 9 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, степень разработанности темы исследования, сформулированы цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, определена степень достоверности результатов, представлены сведения об апробации результатов, указан личный вклад автора, соответствие паспорту специальности, список публикаций, описана структура и объем диссертации.

1 Анализ проблемы и предпосылки создания инструментов для исследования и оптимизации процесса формирования алюминиевого расплава в миксере

В первой главе приведен литературный анализ по теме исследования. Рассмотрено современное состояние металлургии алюминия, технология производства, подходы к моделированию и оптимизации технологических этапов получения алюминиевых сплавов.

Процесс приготовления расплава в миксере является сложным этапом в технологической цепочке получения алюминиевых сплавов. Формирование алюминиевого расплава осуществляется в электрическом миксере сопротивления литейного отделения путем порционного смешивания алюминия-сырца с последующей обработкой его лигатурами и флюсами. Этот этап производства связан с наличием избыточного количества корректирующих воздействий из-за многозадачности и многофакторности, и результат, зачастую, зависит только от опыта технологического персонала, что приводит к увеличению времени приготовления расплава, снижению производительности миксера и повышению затрат на единицу готовой продукции.

Обзор литературных данных показал, что в настоящее время, разработаны и программно реализованы только математические модели процесса получения первичного алюминия в электролизерах. Программных продуктов, связанных с моделированием технологических этапов получения алюминиевых расплавов в миксерах, на сегодняшний день не существует, в то время как именно этот этап определяет качество готовой продукции.

В связи с этим, актуальной задачей является разработка математической модели и ее программная реализация для исследования и проведения вычислительных экспериментов с целью определения оптимальных ресурсосберегающих технологических режимов формирования алюминиевых сплавов с заданными параметрами в электрическом миксере сопротивления.

2 Разработка математической модели и метода расчета оптимальных параметров процесса формирования алюминиевого расплава в миксере

Технологический процесс формирования алюминиевого сплава в миксере относится к сложным многопараметрическим объектам и заключается в порционном добавлении алюминия-сырца из литейных ковшей в миксер с последующей корректировкой расплава лигатурами и флюсами. Основная сложность реализации этого этапа заключается в постоянно меняющемся химическом составе алюминия-сырца, поступающего в литейных ковшах из электролизного цеха. В связи с этим получение алюминиевых сплавов заданного состава не имеет единого сценария приготовления и требует постепенного доведения формируемого алюминиевого расплава в миксере до заданного химического состава фактически «методом проб и ошибок».

Модель динамики изменения химического состава и температуры расплава в миксере представлена в виде блок-схемы на рисунке 1.

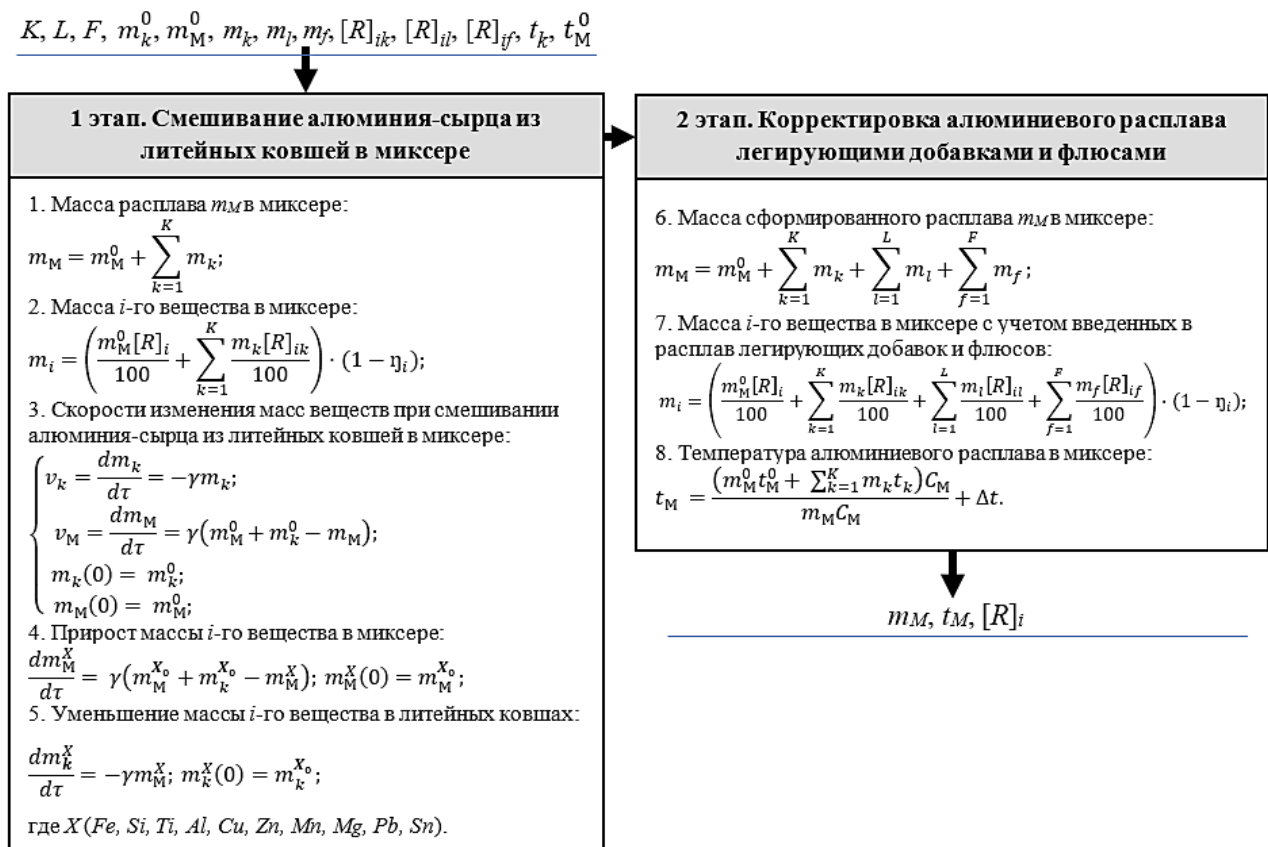


Рисунок 1 – Блок-схема математической модели процесса формирования алюминиевого расплава в миксере

Для решения задачи определения оптимальных режимов процесса формирования алюминиевого расплава в электрическом миксере разработана модель динамики изменения химического состава и температуры расплава при порционном смешивании первичного алюминия с последующей его обработкой лигатурами и флюсами, в том числе разработана модель диффузии компонентов расплава в ванне миксера. В математической модели приняты следующие обозначения: K – количество литейных ковшей; L – количество применяемых лигатур; F

– количество флюсов; m_M^0 – исходная масса расплава в миксере перед началом формирования расплава, кг; m_M – текущая масса расплава в миксере, кг; m_k^0 – начальная масса расплава в k -ом литейном ковше, кг; m_k – текущая масса алюминия-сырца, поступающего из k -го литейного ковша, кг; m_i – масса i -го вещества в миксере, кг; m_l – масса l -ой лигатуры, добавляемой в алюминиевый расплав, кг; m_f – масса f -ого флюса, добавляемого в алюминиевый расплав, кг; $[R]_i$ – химический состав алюминиевого расплава в миксере, оставшегося с предыдущего технологического этапа плавки, %; $[R]_{ik}$ – химический состав алюминия-сырца в k -ом литейном ковше, %; $[R]_{il}$ – химический состав l -ой лигатуры, %; $[R]_{if}$ – химический состав f -ого флюса, %; η_i – коэффициент угара i -го элемента; v_k – скорость поступления алюминия-сырца из k -го литейного ковша, кг/с; v_M – скорость прироста массы расплава в миксере, кг/с; τ – текущее время, с; C_M – теплоемкость расплава в миксере, кДж/(кг·град); t_M – текущая температура алюминиевого расплава в миксере, °С; t_M^0 – исходная температура алюминиевого расплава в миксере перед началом смешивания алюминия-сырца, °С; t_k – температура алюминия-сырца в k -ом литейном ковше, °С; Δt – приращение температуры в миксере за счет нагревательных элементов, °С.

Модель диффузии компонентов расплава в миксере при переливе алюминия-сырца из литейных ковшей в миксер представляет собой краевую задачу математической физики. Концентрация произвольного химического элемента, входящего в состав алюминиевого расплава, является функцией времени и пространственных координат $C = C(\tau, x, y, z)$. Процесс диффузии компонента расплава в миксере описывается уравнением диффузии в дивергентной форме:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = \operatorname{div} (D \cdot \operatorname{grad} C), \quad (1)$$

где $\operatorname{grad} C = \left(\frac{\partial C}{\partial x}, \frac{\partial C}{\partial y}, \frac{\partial C}{\partial z} \right)^T$ – градиент скалярного поля концентрации C соответствующего компонента алюминиевого расплава; $D = D(x, y, z)$ – коэффициент диффузии компонента, зависящий в общем случае от пространственных координат и характера перемешивания за счет падающей струи расплава алюминия-сырца из литейного ковша; $\operatorname{div} \vec{U} = \frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z}$ – дивергенция векторного поля \vec{U} ($\vec{U} = D \cdot \operatorname{grad} C$).

Уравнение диффузии (1) в координатной форме имеет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = \frac{\partial D}{\partial x} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial D}{\partial y} \cdot \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial D}{\partial z} \cdot \frac{\partial C}{\partial z} + D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right). \quad (2)$$

Краевая задача математической физики для вычисления значений концентраций $C(x, y, z)$ с учетом начального распределения концентрации $C_0(x, y, z)$:

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial \tau} = \operatorname{div} (D \cdot \operatorname{grad} C) \\ C(0, x, y, z) = C_0(x, y, z) \\ (\operatorname{grad} C, \mu)|_{\partial G_M} = \varphi(x, y, z) \end{cases}, \quad (3)$$

где $\varphi(x, y, z)$ – значение производной от $C(x, y, z)$ на границе ∂G_M вдоль вектора

нормали μ ; G_M – геометрическая область расплава алюминия в миксере.

Компонентами вектора нормали μ являются его направляющие косинусы $\mu = (\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma)^T$, где α, β, γ – углы между направлением вектора нормали μ и координатными осями.

Граничное условие краевой задачи (3), записанное как скалярное произведение векторов $gradC$ и μ в любой точке границы ∂G_M , позволяет учесть наклон участков границы исследуемой области и в покоординатной форме имеет вид:

$$(gradC, \mu)|_{\partial G_M} = \frac{\partial C}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial C}{\partial y} \cos \beta + \frac{\partial C}{\partial z} \cos \gamma = \varphi(x, y, z). \quad (4)$$

При завершении формирования необходимой массы алюминиевого расплава в миксере следует учесть распределение коэффициента диффузии компонентов расплава в диапазоне изменения значений при молекулярной и турбулентной диффузии под воздействием сил перемешивания различной степени интенсивности. Так, в месте заливки алюминия-сырца из литейных ковшей реализуется самое высокое значение коэффициента диффузии, соответствующее режиму турбулентной диффузии, которое постепенно уменьшается по мере увеличения расстояния от места заливки алюминия-сырца из литейного ковша.

В целом процесс диффузии складывается как процесс молекулярной и турбулентной диффузии, эффекты которых необходимо учитывать в общем коэффициенте диффузии $D = D_m + D_t$. В результате общий коэффициент диффузии можно оценить с помощью соотношения:

$$D = D_m + \alpha e^{-\beta S}, \quad (5)$$

где D_m – коэффициент молекулярной диффузии; S – сумма расстояний точки эллипса с координатами (x, y) до фокусов эллипса ($S = \sqrt{(x - x_{kc1})^2 + (y - y_k)^2} + \sqrt{(x - x_{kc2})^2 + (y - y_k)^2}$); α, β – настроечные параметры, характеризующие процесс диффузии.

Для решения уравнения диффузии (1) используется метод конечно-разностной аппроксимации дифференциальных уравнений. Функция $C = C(\tau, x, y, z)$, описывающая зависимость концентрации компонента X от времени и пространственных координат, заменяется сеточной функцией значений C_{ijk}^n в n -ый момент времени ($\tau_n = n\Delta\tau$) в ijk -ом узле трехмерной сеточной области, аппроксимирующей объем алюминиевого расплава в миксере. При этом $i = 1, \dots, N$; $j = 1, \dots, M$; $k = 1, \dots, K$.

Краевая задача математической физики (3) аппроксимируется с помощью неявной конечно-разностной схемы, что приводит к следующей задаче относительно значений сеточной функции C_{ijk}^n :

$$\begin{cases} \frac{C_{ijk}^{n+1} - C_{ijk}^n}{\Delta\tau} = \Lambda_{ijk}^{n+1} \\ C_{ijk}^n|_{n=0} = C_{0ijk} \\ \frac{3C_\Gamma - 4C_{\Gamma-1} + C_{\Gamma-2}}{2\Delta\mu} = \varphi_\Gamma \end{cases}, \quad (6)$$

где $\frac{3C_{\Gamma}-4C_{\Gamma-1}+C_{\Gamma-2}}{2\Delta\mu}$ – конечно-разностная трехточечная аппроксимация нормальной производной в любой точке границы ∂G_M ; $\Delta\mu$ – шаг дискретизации пространства вдоль направления нормали к произвольной точке границы ∂G_M ; $\Gamma, \Gamma-1, \Gamma-2$ – нумерация узлов конечно-разностной сетки в произвольной точке границы ∂G_M , а также в ближайших к границе двух узлах сетки вдоль направления, противоположного направлению нормали внутри области G_M ; $\Delta\tau$ – шаг дискретизации при аппроксимации производной $\frac{\partial C}{\partial \tau}$ по времени; φ_{Γ} – значение заданной на границе функции $\varphi(x, y, z)$ в произвольной точке границы ∂G_M , описывающей значение потока концентрации компонента расплава.

В результате, разработанная модель диффузии позволяет оценить время усреднения компонентов расплава в объеме ванны миксера, что позволит снизить количество отборов проб для химического анализа расплава.

Для определения оптимальных расходов алюминия-сырца, поступающего из литейных ковшей, и корректирующих добавок была поставлена задача оптимизации, которая заключается в минимизации затрат на формирование алюминиевого расплава в миксере с заданными свойствами при соблюдении всех технологических ограничений и выполнении условий материального и теплового балансов. Целевая функция представляет собой суммарные затраты на получение единицы продукции:

$$C = \frac{(\sum_{k=1}^K m_k \Pi_k + \sum_{l=1}^L m_l \Pi_l + \sum_{f=1}^F m_f \Pi_f + \Pi_{эл})}{m_M} \rightarrow \min, \quad (7)$$

где Π_k, Π_l, Π_f – стоимость алюминия-сырца, лигатур и флюсов соответственно, руб/т; $\Pi_{эл}$ – стоимость электроэнергии, руб/кВт·ч.

Решение задачи оптимизации заключается в определении минимума целевой функции при соблюдении следующих ограничений: масса формируемого алюминиевого расплава должна не превышать полезную емкость миксера; масса алюминия-сырца, переливаемая в миксер из k -ого литейного ковша, должна не превышать исходную массу алюминия-сырца в k -ом литейном ковше; массы лигатур и флюсов должны не превышать установленные массы по технологической инструкции; формируемый химический состав алюминиевого расплава должен соответствовать заданному химическому составу формируемой марки сплава; температура расплава должна соответствовать диапазону значений согласно технологической инструкции.

При такой постановке задачи применение формальных методов оптимизации не всегда позволяет получить решение при соблюдении всех ограничений. При этом возможно несколько вариантов. В первом случае оптимальное решение по формированию расплава со всеми необходимыми характеристиками может быть получено при заданных начальных условиях, то есть при исходном наборе литейных ковшей с алюминием-сырцом с учетом присадок лигатур и флюсов. Ко второму случаю относится ситуация, когда можно получить лишь неполное решение, например, сформировать заданный химический состав алюминиевого расплава в миксере в соответствии с установленной маркой, но меньшей массы.

К третьему случаю относится ситуация, когда оптимальное решение, исходя из заданных начальных условий, получить невозможно.

Однако, в связи с тем, что в литейный цех непрерывно поступают новые литейные ковши с алюминием-сырцом, имеется возможность скорректировать начальные условия и добиться полного решения поставленной задачи, то есть получить алюминиевый расплав заданной массы, химического состава и температуры. Такую задачу можно решить методом динамического программирования, который применяется для определения оптимальных параметров объекта при постоянно изменяющихся начальных условиях. Для поиска оптимального решения в рамках метода динамического программирования на каждом этапе предлагается использовать метод линейного программирования, который обеспечивает решение задачи, где целевая функция и ограничения имеют линейный вид. С учетом вышеизложенного, разработан алгоритм решения оптимизационной задачи, структурная схема которого приведена на рисунке 2.

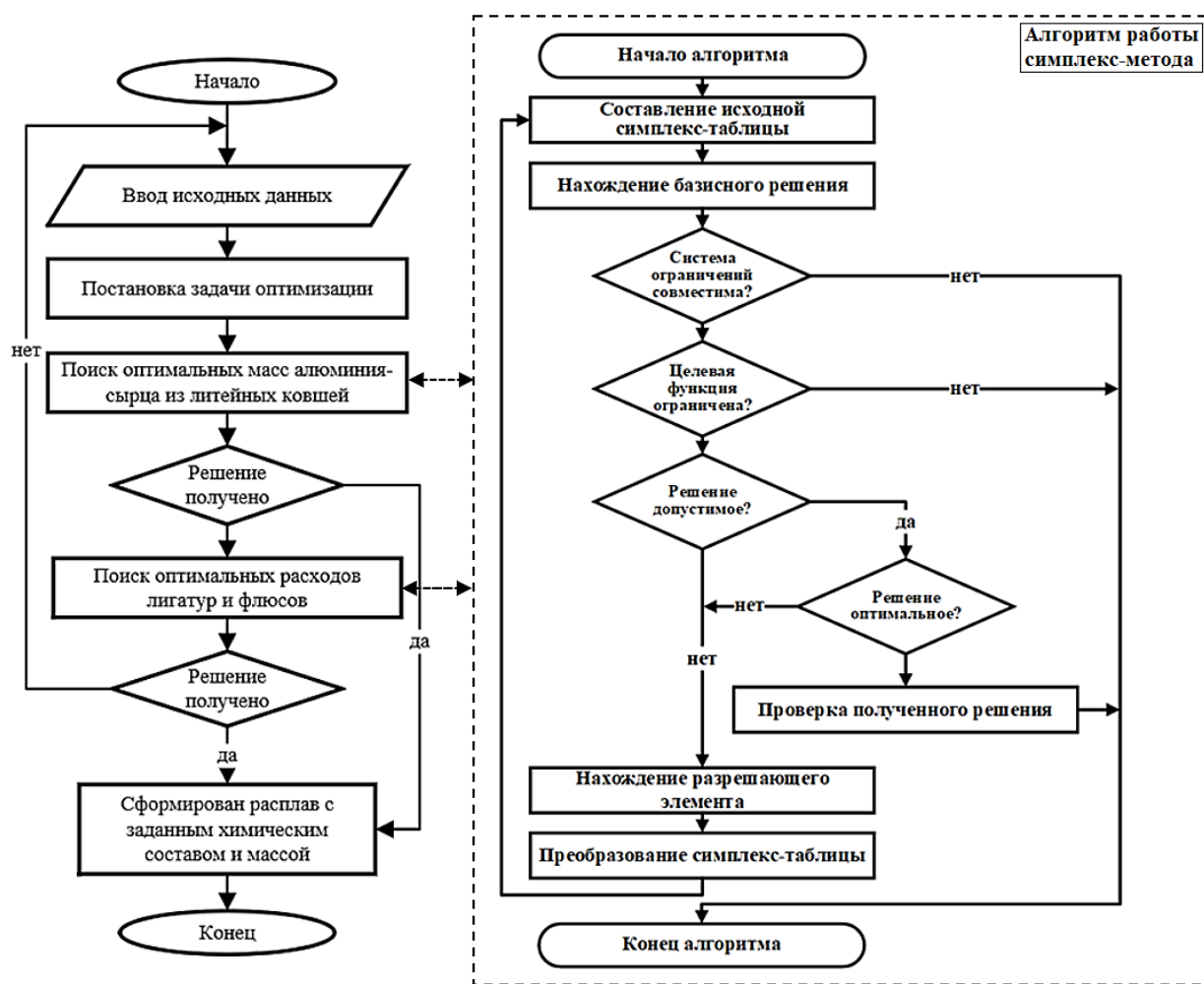


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма решения задачи оптимизации

В блоке ввода исходных данных задается масса, химический состав и температура алюминия-сырца в литейных ковшах; количество, химический состав лигатур и флюсов; параметры алюминиевого расплава в миксере, оставшегося с предыдущей плавки; стоимость алюминия-сырца и корректирующих присадок, а также параметры готового продукта в соответствии с заданной маркой.

Далее формируется целевая функция затрат на единицу продукции, а также система технологических ограничений, в том числе ограничений на массу и состав готового продукта. Также задаются начальные значения расходов алюминия-сырца, лигатур и флюсов. Затем с использованием симплекс-метода осуществляется поиск оптимального решения по определению расходов алюминия-сырца без присадок лигатур и флюсов. В зависимости от того получено полное решение или нет, производится дальнейший расчет оптимальных расходов корректирующих присадок и принимается решение о том, что алюминиевый расплав сформирован и все имеющиеся ограничения соблюдены. В случае если расплав заданной массы и химического состава невозможно получить, происходит корректировка начальных условий с учетом вновь поступивших литейных ковшей, либо принимается решение о том, что расплав сформирован с учетом неполного выполнения ограничений.

Таким образом, разработана математическая модель процесса получения алюминиевого расплава в электрическом миксере сопротивления, поставлена задача оптимизации технологических режимов процесса, предложен алгоритм решения, основанный на динамическом программировании с использованием симплекс-метода линейного программирования.

3 Разработка программного комплекса «Алюминщик» для исследования и оптимизации процесса формирования алюминиевого расплава в миксере

Математическая модель и метод расчета оптимальных параметров смешивания алюминия-сырца из литейных ковшей в миксере реализованы в программном комплексе «Алюминщик», который разработан с использованием высокоуровневого языка программирования C# и предназначен для исследований, оптимизации технологического процесса, проведения вычислительных экспериментов и обучения технологического персонала.

Структуру реализованной системы «Алюминщик» можно представить в виде блоков, позволяющих в интерактивном режиме вводить исходные данные по расходам, температуре, химическому составу исходных материалов и технологическим параметрам процесса, рассчитывать материальный и тепловой балансы, параметры перемешивания металла в миксере и определять оптимальные условия реализации процесса (рисунок 3).

В программном комплексе «Алюминщик» используются три основных класса: Form (Форма), Mixer (Миксер) и Bucket (Ковш), которые являются основными структурными единицами, взаимодействующими между собой.

На рисунке 4 представлен интерактивный интерфейс программного комплекса «Алюминщик», созданный на основе стандартных визуальных компонентов разработки, имеющихся в среде Microsoft Visual Studio Community.

Так, с использованием реализованной математической модели и функциональных возможностей программы можно проводить вычислительные эксперименты по определению оптимальных параметров технологического процесса формирования алюминиевого сплава с заданным химическим составом при различных исходных данных и имеющихся ограничениях.

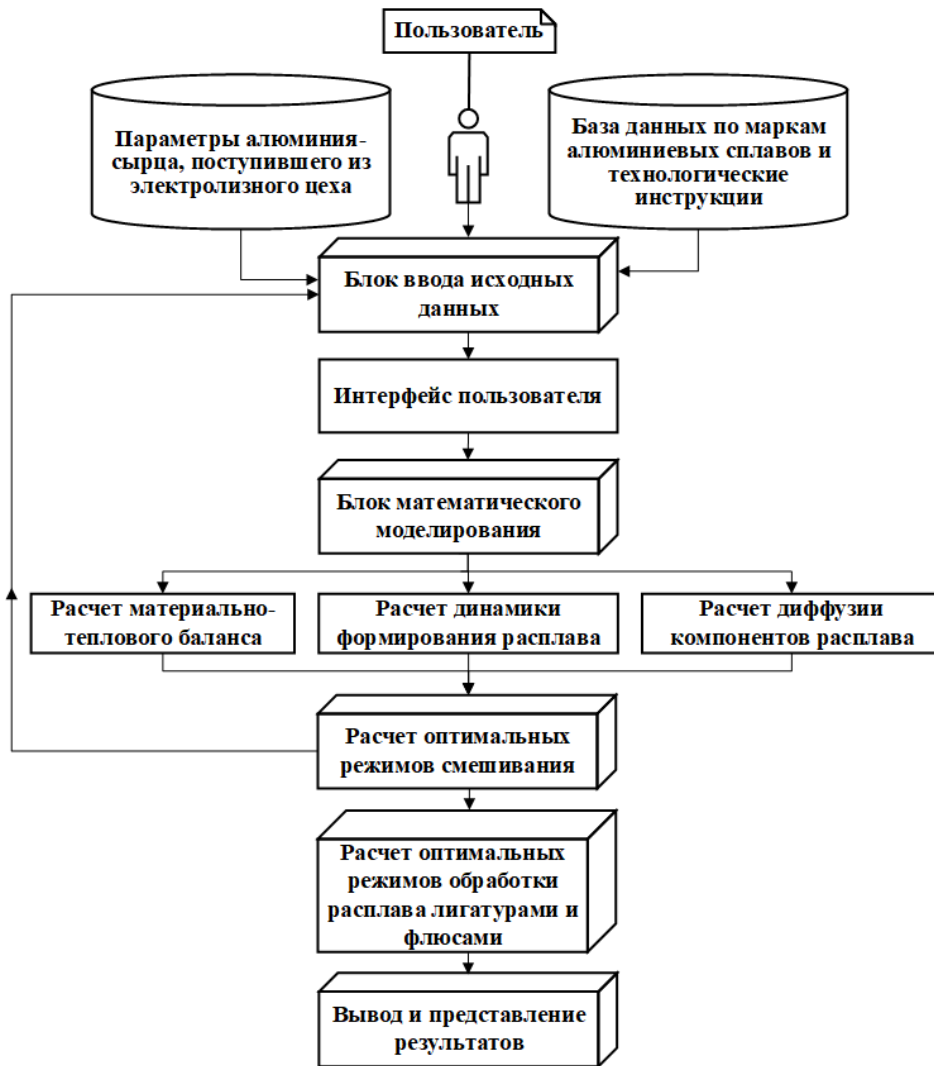


Рисунок 3 – Схема взаимодействия основных компонентов программного комплекса «Алюминщик»

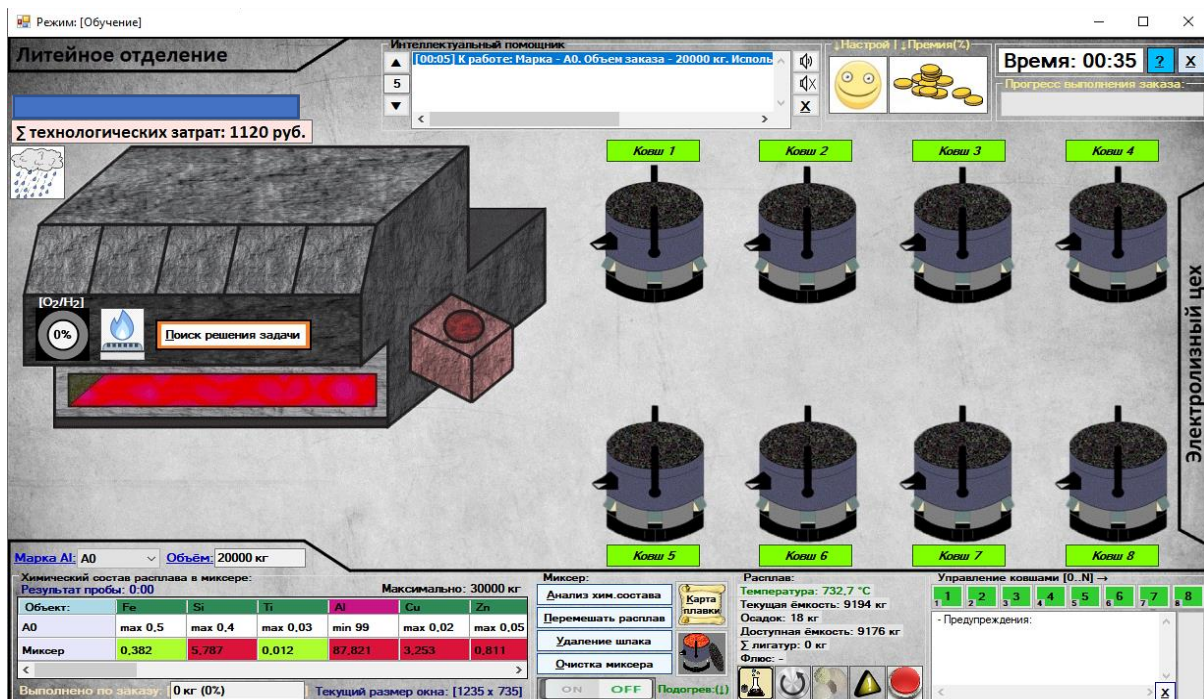


Рисунок 4 – Интерфейс программного комплекса «Алюминщик»

4 Исследование процесса формирования алюминиевых сплавов с использованием программного комплекса «Алюминщик»

Для проверки адекватности математической модели был проведен сравнительный анализ фактических и модельных данных. Фактические данные были взяты из 250 паспортов плавов, реализованных на предприятии АО «РУСАЛ Новокузнецк». Относительная погрешность модели рассчитывалась как отношение среднеквадратичного отклонения фактического содержания алюминия, как основного компонента расплава, от рассчитанного по модели к среднему значению фактического содержания алюминия. Результаты расчетов показали, что погрешность модели не превышает погрешности измерения химического состава алюминиевого расплава.

С использованием математической модели и программного комплекса «Алюминщик» были проведены исследования технологического процесса формирования алюминия в миксере с учетом перемешивания расплава. На рисунке 5 приведен пример динамики изменения концентраций компонентов формируемого алюминиевого расплава марки АЛ6 при добавлении алюминия-сырца из восьми литейных ковшей в миксер через промежутки времени τ .

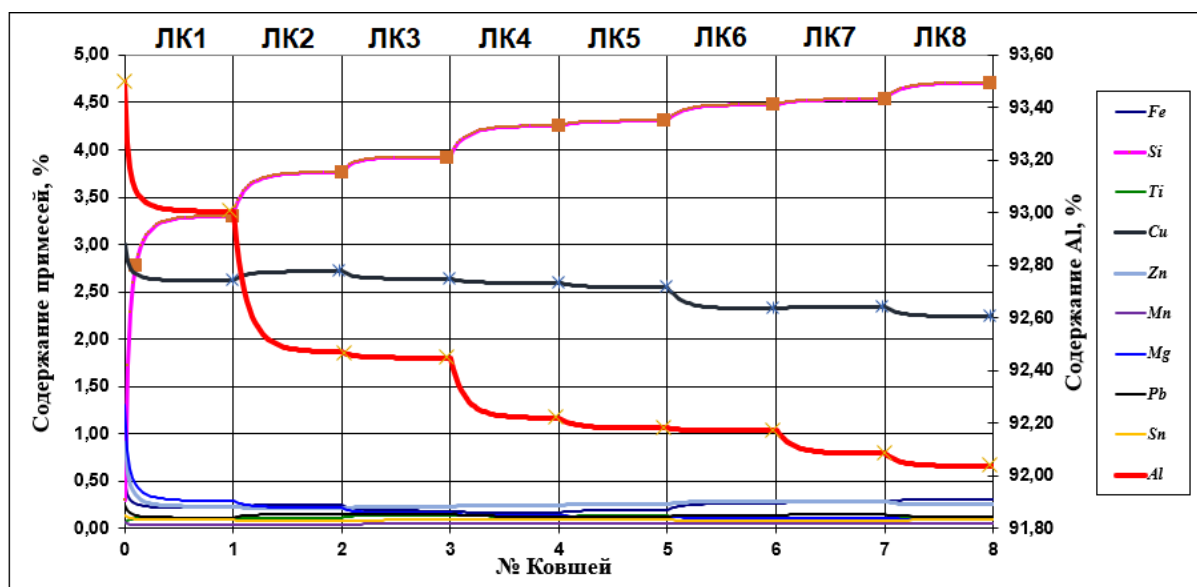


Рисунок 5 – Динамика изменения химического состава расплава АЛ6 в миксере

На рисунке 6 представлена динамика движения фронта концентрации компонента расплава АЛ6 в миксере на основе решения уравнения диффузии в рамках задачи математической физики.

С использованием программы «Алюминщик» проведены расчеты оптимальных режимов процесса по данным фактических паспортов плавов на примере шести различных марок, реализованных на АО «РУСАЛ Новокузнецк».

Сравнительный анализ реальных технологических данных и полученных оптимальных результатов расчета, представленный в таблице 1, показал, что рассчитанные с использованием программного комплекса «Алюминщик» оптимальные режимы позволяют реализовать процесс формирования расплава заданной марки с минимальным количеством технологических операций при полном попадании в задание по химическому составу.

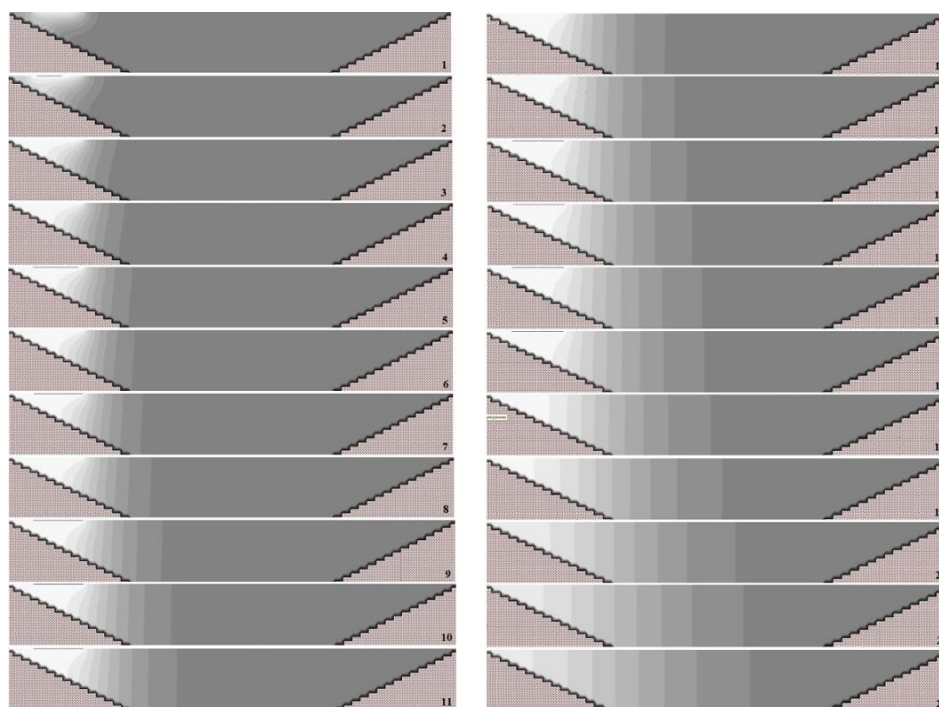


Рисунок 6 – Визуализация динамики изменения концентраций компонентов расплава АЛ6 по объему миксера

Таблица 1 – Сравнительный анализ фактических и расчетных данных по получению алюминиевого расплава различных марок

Марка сплава	Значение	Fe(max)	Si(max)	Ti(max)	Al(min)	Cu(max)	Zn(max)	Mn(max)	Mg(max)	Pb(max)	Sn(max)
АД	заданное	0,35	0,3	0,15	98,8	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0
	факт	0,34	0,275	0,145	98,86	0,098	0,099	0,087	0,096	0	0
	расчет	0,321	0,258	0,136	98,95	0,089	0,088	0,071	0,087	0	0
АД0Е	заданное	0,35	0,3	0,15	98,8	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0
	факт	0,19	0,145	0,04	99,621	0,004	0	0	0	0	0
	расчет	0,15	0,139	0,035	99,672	0,004	0	0	0	0	0
АД1	заданное	0,35	0,3	0,15	98,8	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0
	факт	0,34	0,014	0,047	99,591	0,004	0,004	0	0	0	0
	расчет	0,329	0,012	0,045	99,606	0,004	0,004	0	0	0	0
А7Е	заданное	0,35	0,3	0,15	98,8	0,1	0,1	0,1	0	0	0
	факт	0,099	0,02	0,015	99,851	0,015	0	0	0	0	0
	расчет	0,075	0,02	0,014	99,877	0,014	0	0	0	0	0
А8	заданное	0,08	0,05	0,02	99,8	0,01	0,04	0	0	0	0
	факт	0,076	0,04	0,05	99,824	0,01	0	0	0	0	0
	расчет	0,075	0,02	0,04	99,855	0,01	0	0	0	0	0
А97	заданное	0,01	0,01	0,002	99,97	0,005	0,003	0	0	0	0
	факт	0,001	0,0086	0,0018	99,978	0,002	0	0	0	0	0
	расчет	0,0098	0,0085	0,0017	99,978	0,002	0	0	0	0	0

На рисунке 7 представлен сравнительный анализ фактических и расчетных значений химического состава алюминиевого сплава для марки АЛ6, который показал, что в результате расчета оптимальных расходов алюминия-сырца из литейных ковшей, а также присадок лигатур и флюсов происходит попадание в границы при общем снижении расходов шихтовых материалов.

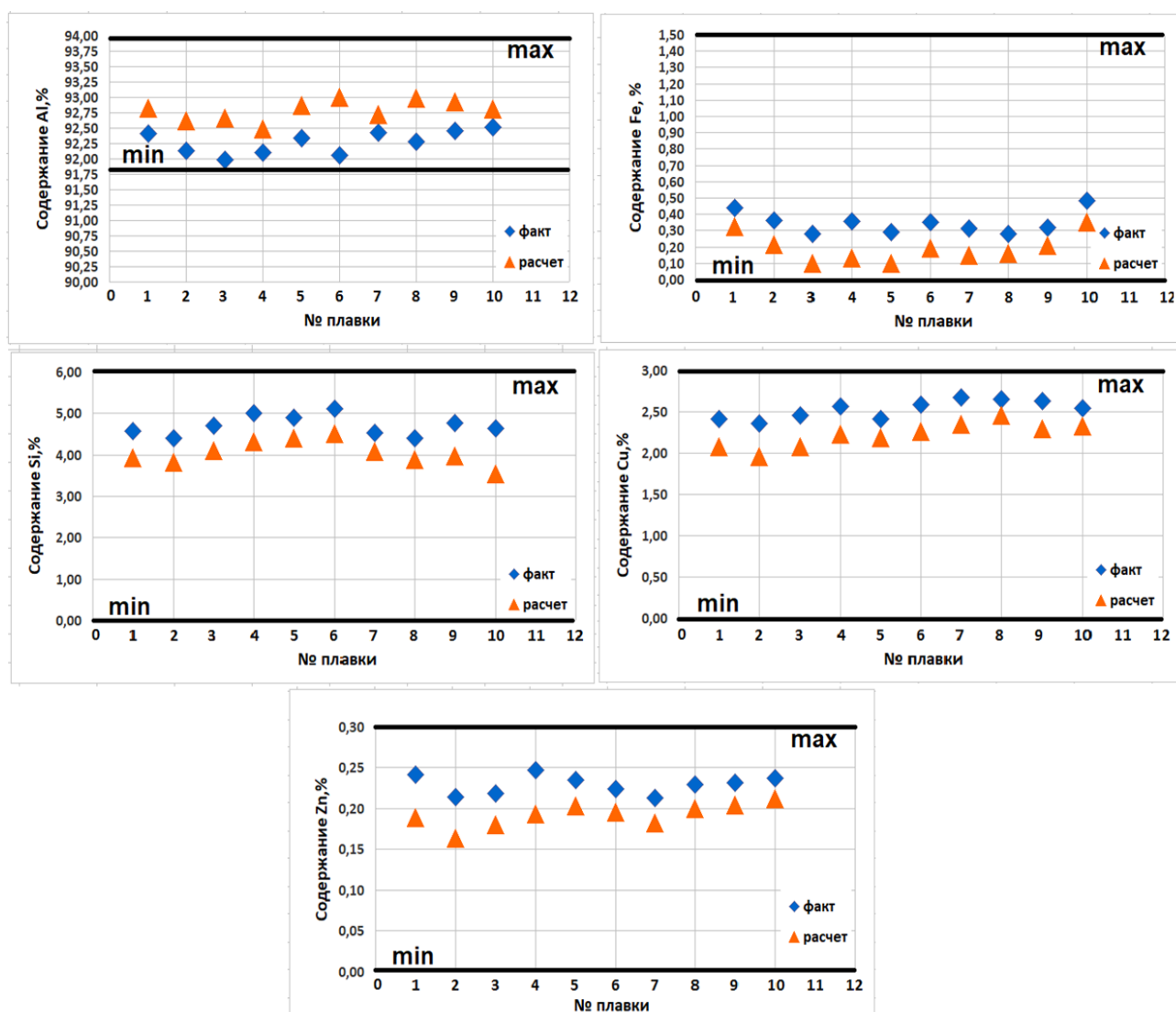


Рисунок 7 – Корреляционное поле фактических и расчетных значений содержания компонентов в расплаве марки АЛ6

Также за счет уменьшения времени на корректирующие операции сокращается общая продолжительность технологического этапа формирования алюминиевого сплава в электрическом миксере сопротивления, в результате чего повышается производительность агрегата и всего литейного отделения.

На рисунке 8 приведена гистограмма распределения временных затрат на технологическую операцию по фактическим и расчетным данным на примере 250 плавок, из которой видно, что время приготовления алюминиевого расплава с использованием программно-инструментальной системы можно снизить на 15 – 20 мин, что приводит к повышению производительности миксера с 120 до 137 т/сут или с 39,4 до 44,9 т/год. Это позволит получить экономический эффект 40,7 млн. рублей для одного миксера в год.

Разработанная система «Алюминщик», включающая в себя математическую модель и метод оптимизации, внедрена в учебный процесс в ФГБОУ ВО «СибГИУ» при подготовке бакалавров и магистров, в производство и учебно-информационный центр АО «РУСАЛ Новокузнецк», а также на предприятии ООО «Полимет». Внедрение результатов работы в производство на АО «РУСАЛ

Новокузнецк» позволило на 20 % уменьшить количество брака из-за некорректно принятых решений, снизить затраты на получение единицы продукции на 200 – 250 руб/т за счет рационального распределения материалов и уменьшить длительность технологической операции на 10 %.

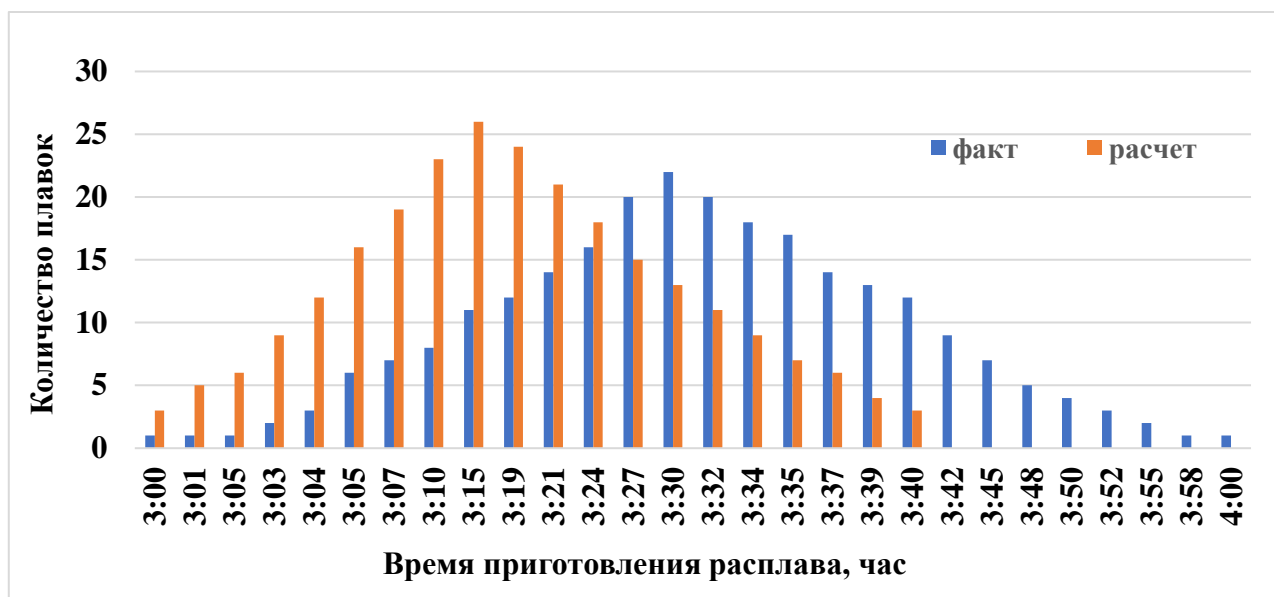


Рисунок 8 – Гистограмма распределения временных затрат на технологическую операцию по результатам 250 плавов

Апробация программного комплекса «Алюминщик» при приготовлении сплава марки АД31 на предприятии ООО «Полимет» также показало его высокую эффективность, позволило уменьшить длительность технологической операции на 10 % и снизить расход электроэнергии на 4 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана математическая модель изменения химического состава и температуры расплава при порционном смешивании первичного алюминия, обработке его флюсами, лигатурами и учитывающая процессы диффузии компонентов в ванне миксера при получении алюминиевых сплавов.

2. Разработан метод расчета оптимальных параметров порционного смешивания алюминия-сырца в миксере с учетом обработки лигатурами и флюсами, включенный в схему алгоритма динамического программирования с использованием симплекс-метода при изменяющихся начальных условиях и ограничениях, обеспечивающий решение задачи формирования алюминиевого расплава с заданными характеристиками при минимальных технологических затратах.

3. Математическая модель и метод оптимизации реализованы в программном комплексе «Алюминщик».

4. Разработаны ресурсосберегающие режимы получения алюминиевых сплавов, включающие стадии: формирования основы – из первичного алюминия, ввода легирующих материалов и последующей обработки флюсами полученного расплава в миксере. Прогнозируемый экономический эффект, основанный на повышении производительности электрических миксеров сопротивления литейного отделения составил 40,7 млн. руб. в год.

5. Ресурсосберегающие режимы получения литейных и деформируемых алюминиевых сплавов внедрены в производство в условиях АО «РУСАЛ Новокузнецк». Внедрение результатов работы позволило на 20 % уменьшить количество брака из-за некорректно принятых решений, снизить затраты на получение единицы продукции на 200 – 250 руб/т за счет рационального распределения материальных ресурсов и уменьшить длительность технологической операции на 10 %.

6. Проведена апробация программного комплекса «Алюминщик» при приготовлении сплава марки АД31 на предприятии ООО «Полимет», которое показало его высокую эффективность, позволило уменьшить длительность технологической операции на 10 % и снизить расход электроэнергии на 4 %.

7. Программный комплекс «Алюминщик» внедрен в учебный процесс в Сибирском государственном индустриальном университете и используется при подготовке бакалавров по направлениям: 22.03.02 Metallurgy 09.03.01 Информатика и вычислительная техника; 09.03.03 Прикладная информатика.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Мартусевич, Е. А. Алгоритмическое и программное обеспечение информационно-обучающей системы «Шихтовщик алюминиевого расплава» / Е. А. Мартусевич, В. Н. Буинцев, С. Н. Калашников // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 4. – С. 1–8.

2. Мартусевич, Е. А. Структура и математические модели информационно-обучающей системы «Шихтовщик алюминиевого расплава» / Е. А. Мартусевич, В. Н. Буинцев, С. Н. Калашников // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 2. – С. 1–14.

3. Калашников, С. Н. Особенности применения информационных экспертных систем в металлургии на основе интеллектуальной обработки данных и знаний / С. Н. Калашников, В. Н. Буинцев, Е. А. Мартусевич [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 1. – С. 1–10.

4. Мартусевич, Е. А. Совершенствование технологии получения алюминиевых сплавов в миксерах литейного отделения с использованием программно-инструментальной системы моделирования и оптимизации / Е. А. Мартусевич, И. А. Рыбенко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2022. – Т. 22. – № 4. – С. 31–37.

5. Мартусевич, Е. А. Детерминированная математическая модель динамики изменения химического состава и температуры расплава при порционном смешивании первичного алюминия-сырца в процессе получения алюминиевых сплавов в электрических миксерах сопротивления для определения оптимальных условий реализации процесса / Е. А. Мартусевич, И. А. Рыбенко // Теория и технология металлургического производства. – 2022. – №4(43). – С. 9–14.

6. Мартусевич, Е. А. Результаты исследования процесса формирования перспективных сплавов с использованием программно-инструментальной системы моделирования и оптимизации / Е. А. Мартусевич // Черная металлургия.

Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2022. – №11(78). – С. 959–966.

7. Буинцев, В. Н. Автоматическая обучающая экспертная система / В. Н. Буинцев, И. А. Рыбенко, Е. А. Мартусевич, Д. Ю. Белавенцева // Вестник Сибирского государственного университета. – 2022. – №4(42). – С. 19–26.

Статьи в изданиях, индексируемых базами Scopus и Web of Science

8. Калашников, С. Н. Кластеризация литейных ковшей на основе математического анализа технологических данных при формировании алюминиевых сплавов / С. Н. Калашников, Е. А. Мартусевич, Е. В. Мартусевич, В. Н. Буинцев // Вестник томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2021. – № 55. – С. 45–52.

9. Калашников, С. Н. Математическое моделирование действующего технологического процесса формирования алюминиевого расплава в миксере литейного отделения / С. Н. Калашников, Е. А. Мартусевич, Е. В. Мартусевич, И. А. Рыбенко // Вестник томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2021. – № 56. – С. 20–28.

10. Калашников, С. Н. Проектирование и реализация комплекса программ для моделирования технологического процесса формирования алюминиевых сплавов на основе объектно-ориентированного подхода / С. Н. Калашников, Е. А. Мартусевич, Е. В. Мартусевич, В. Н. Буинцев, И. А. Рыбенко // Вестник томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2021. – № 57. – С. 110–117.

Публикации в других изданиях

11. Мартусевич, Е. А. Тренажер «Алюминщик» для обучения технологического персонала литейного отделения алюминиевого завода / Е. А. Мартусевич, В. Н. Буинцев // Труды II Международной научно-практической конференции «Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности», посвященной 90-летию заслуженного деятеля науки и техники РФ Ю. Г. Ярошенко. – 2017. – С. 224–229.

12. Мартусевич, Е. А. Изучение технологических процессов посредством применения игровых тренажеров / Е. А. Мартусевич, В. Н. Буинцев // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Труды Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2017. – С. 98–101.

13. Мартусевич, Е. А. Поиск решения технологических задач методом последовательной оптимизации / Е. А. Мартусевич, В. Н. Буинцев // Труды международной научно-практической конференции «Инновационные технологии научного развития». – 2017. – С. 100–104.

14. Мартусевич, Е. А. Повышение квалификации технологического персонала промышленных предприятий по производству алюминия, с использованием автоматизированной информационно-обучающей системы «Алюминщик» / Е. А. Мартусевич, В. Н. Буинцев // XX Международная научно-практическая конференция «Металлургия: технологии, инновации, качество». – 2017. – С. 71–75.

15. Мартусевич, Е. А. Применение информационно-обучающих систем для обучения технологического персонала навыкам управления промышленными объектами / Е. А. Мартусевич, В. Н. Буинцев, С. Н. Калашников // Труды X

Международной научно-практической конференции «Информация и образование: границы коммуникаций» INFO'18. – 2018. – С. 269–271.

16. Мартусевич, Е. А. Модуль прогнозирования управляющих воздействий для информационно-обучающей системы «Алюминщик» / Е. А. Мартусевич, В. Н. Буинцев, С. Н. Калашников // Труды VIII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве». – 2019. – С. 263–266.

17. Калашников, С. Н. Численный метод расчета параметров смешивания алюминия-сырца в миксере литейного отделения / С. Н. Калашников, Е. А. Мартусевич, Е. В. Мартусевич, В. Н. Буинцев // XII Международная научно-практическая конференция «Информация и образование: границы коммуникаций» INFO'20. – 2020. – С. 123–126.

18. Калашников, С. Н. Основные концепции разработки прикладных информационно-обучающих систем / С. Н. Калашников, Е. А. Мартусевич, Е. В. Мартусевич, В. Н. Буинцев // IX Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве», посвященная 100-летию кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии». – 2021. – С. 232–236.

19. Калашников, С. Н. Разработка информационно-обучающих систем на основе алгебраического подхода к интеллектуальной обработке данных и знаний / С. Н. Калашников, Е. А. Мартусевич, Е. В. Мартусевич, В. Н. Буинцев // Труды V Международной научно-практической конференции «Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах». – 2021. – С. 100–103.

20. Калашников, С. Н. Автоматизированная обучающая система для дистанционного и самостоятельного обучения операторов сложных технологических процессов / С. Н. Калашников, Е. А. Мартусевич, Е. В. Мартусевич, В. Н. Буинцев // Труды V Международной научно-практической конференции «Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах». – 2021. – С. 128–130.

21. Калашников, С. Н. Применение кластерного анализа для оценки алюминиевого расплава в литейных ковшах / С. Н. Калашников, Е. А. Мартусевич, Е. В. Мартусевич, В. Н. Буинцев // Труды V Международной научно-практической конференции. Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах. – 2021. – С. 246–250.

22. Мартусевич, Е. А. Программный комплекс «Алюминщик» для моделирования и оптимизации процесса формирования алюминиевого сплава в электрическом миксере сопротивления / Е. А. Мартусевич, И. А. Рыбенко, В. Н. Буинцев // XIV Всероссийская научно-практическая конференция Системы Автоматизации (в образовании, науке и производстве) AS'2022. – 2022. – С. 199–204.

23. Мартусевич, Е. А. Математическая модель и програмно-инструментальная система «Алюминщик» для совершенствования процесса получения алюминиевых сплавов в миксере литейного отделения / Е. А. Мартусевич, И. А. Рыбенко // XXIII Международная научно-практическая конференция «Металлургия: технологии, инновации, качество» «Металлургия - 2022». – 2022. – С. 400–405.

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

24. Мартусевич, Е. А. Автоматизированная информационно-обучающая система «Алюминщик» / заявители и патентообладатели: Е. А. Мартусевич, В. Н. Буинцев. – № 2017661402; заявл. 31.08.2017; опубл. 12.10.2017.

25. Мартусевич, Е. А. Программа поиска оптимального решения технологических задач для существенно многомерных объектов / заявители и патентообладатели: Е. А. Мартусевич, В. Н. Буинцев. – № 2017661403; заявл. 31.08.2017; опубл. 12.10.2017.

26. Мартусевич, Е. А. Модуль прогнозирования управляющих воздействий для информационно-обучающей системы «Алюминщик» / заявители и патентообладатели: Е. А. Мартусевич, В. Н. Буинцев. – № 2019619969; заявл. 06.05.2019; опубл. 29.07.2019.

27. Мартусевич, Е. А. Роботизированная информационно-обучающая система для операторов технологических процессов / заявители и патентообладатели: Е. А. Мартусевич. – №2021667406; заявл. 17.10.2021; опубл. 28.10.2021.

Подписано в печать _____ 2023 г. Формат 60х90 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100 экз. Заказ _____.

Сибирский государственный индустриальный университет

654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, зд. 42.

Издательский центр СибГИУ