

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Сибирский государственный индустриальный университет»

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»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н., доцент

Рыбенко Инна Анатольевна

Новокузнецк – 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Анализ проблемы и предпосылки создания инструментов для исследования и оптимизации процессов формирования алюминиевых сплавов в миксере.....	11
1.1 Современное состояние алюминиевой промышленности.....	11
1.2 Технологические особенности производства алюминиевых сплавов.....	17
1.3 Подходы к математическому моделированию процессов получения алюминиевых сплавов.....	34
1.4 Анализ существующих программно-инструментальных систем для моделирования технологических этапов алюминиевого производства.....	39
1.5 Постановка задачи исследования.....	44
2 Разработка математической модели и метода расчета оптимальных параметров процесса формирования алюминиевых сплавов в миксере.....	45
2.1 Технология получения алюминиевых сплавов.....	47
2.2 Выделение объекта исследования.....	51
2.3 Разработка математической модели.....	52
2.4 Постановка и решение задачи оптимизации.....	63
2.5 Выводы к главе 2.....	70
3 Разработка программного комплекса «Алюминщик» для исследования и оптимизации процесса формирования алюминиевого расплава в миксере.....	72
3.1 Принципы разработки функциональных возможностей системы «Алюминщик».....	72
3.2 Реализация программного комплекса «Алюминщик».....	74
3.3 Описание функциональных возможностей системы «Алюминщик».....	80
3.4 Выводы к главе 3.....	92
4 Исследование процесса формирования алюминиевых сплавов с использованием программного комплекса «Алюминщик».....	93
4.1 Проверка адекватности модели.....	93
4.2 Исследование процесса формирования алюминиевого расплава в миксере с использованием математической модели.....	94
4.3 Определение оптимальных технологических режимов процесса формирования алюминиевого расплава в миксере с использованием программного комплекса «Алюминщик».....	100
4.4 Выводы к главе 4.....	111
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	113
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	113
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	128
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	131

ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	134
ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....	135
ПРИЛОЖЕНИЕ Д .....	136
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	137
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.....	138
ПРИЛОЖЕНИЕ И .....	139
ПРИЛОЖЕНИЕ К .....	140

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования**

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 computing technology; 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, сходимостью результатов теоретических исследований с результатами промышленных данных, адекватностью математических моделей, проверенных путем сопоставления расчетных и фактических данных промышленных плавов.

**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.

# 1 Анализ проблемы и предпосылки создания инструментов для исследования и оптимизации процессов формирования алюминиевых сплавов в миксере

## 1.1 Современное состояние алюминиевой промышленности

Большая часть производимого алюминия используется в виде литейных и деформируемых сплавов, которые применяются практически во всех отраслях народного хозяйства, в частности, в строительстве, автомобилестроении, производстве упаковочных материалов, радиоэлектронике (рисунок 1.1) [1, 2]. Плотность алюминия составляет около  $2,7 \text{ г/см}^3$ , что в 2,9 и 3,3 раза меньше, чем у железа и меди соответственно. При этом механические свойства алюминиевых сплавов по ряду показателей могут существенно превосходить изделия из стали [3, 4].

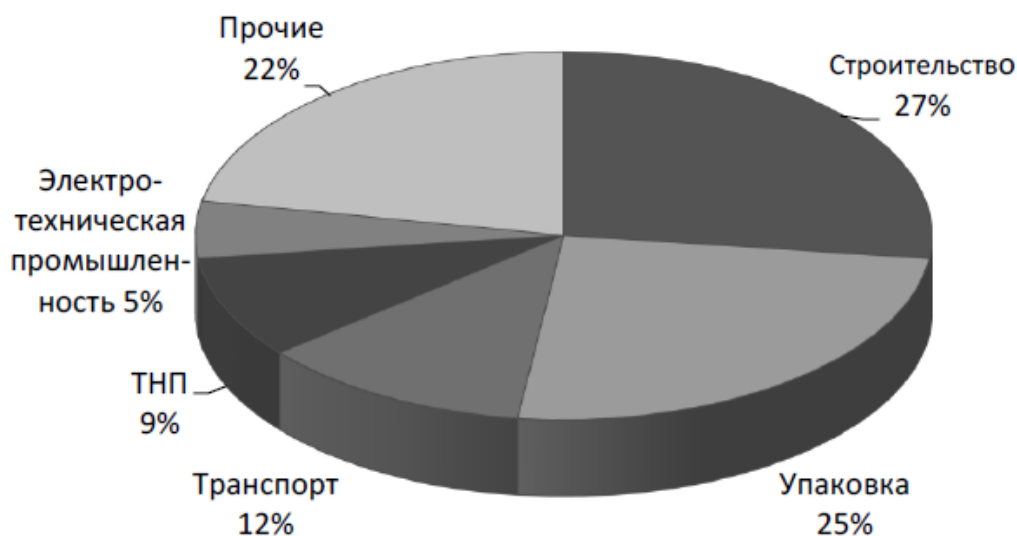
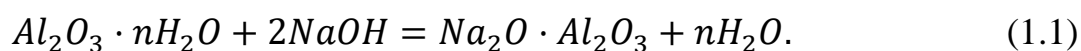


Рисунок 1.1 – Диаграмма потребления алюминия по отраслям экономики

Благодаря уникальным свойствам алюминия, темпы его производства во всем мире значительно опережают темпы роста других отраслей металлургии. В России производство алюминия оценивается в 4 млн. т в год и постоянно растет. Также бурное развитие алюминиевой промышленности наблюдается в Китае. Так, в 2021 году Китай смог обеспечить выпуск более 60 % мирового производства алюминия и его сплавов для развивающихся стран.

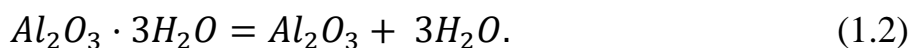
Впервые металлический алюминий был получен в 1825 г. датским физиком Г. К. Эрстедом (1777 – 1851 гг.), а в 1854 г. французский ученый А. Девиль (1818 – 1881 гг.) осуществил коммерциализацию производства алюминия. Позже русский ученый Н. Н. Бекетов (1827 – 1911 гг.) предложил вытеснять алюминий химическим путем из фтористых соединений металлическим магнием. С использованием данного способа в Германии в 1885 г. был построен завод, который позволил получить 58 т алюминия, на тот момент это составляло более 25 % всего мирового производства металла. Немного позже, в 1886 г. француз П. Эру и американец Ч. Холл предложили получать алюминий при помощи электролиза глинозема в расплавленном электролите, что позволило нарастить выпуск алюминия с учетом прогрессивного развития электроэнергетики. В 1888 г. австрийский химик К. И. Байер, работавший в России, заложил основы современной технологии производства глинозема, которая до сих пор используется в США, Франции, Англии (рисунок 1.2) [5].

Процесс переработки бокситов в глинозем с использованием способа Байера осуществляется путем выщелачивания оксида алюминия  $Al_2O_3$  из боксита, исключая остальные составляющие боксита ( $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ) в результате обратимой химической реакции [6]:



В случае протекания реакции вправо глинозем в виде алюмината натрия переходит в раствор, а при протекании реакции в обратном направлении образуется гидратированный  $Al_2O_3$ , который выпадает в осадок [7 – 8]. Этот способ до сих пор остается наиболее распространенным и наиболее успешно применяется в случае использования высококачественных бокситов, обладающих низкими значениями вредных примесей [9].

Установлено, что в состав бокситов входит кристаллическая гидроокись алюминия. Данное соединение беспрепятственным образом растворяется в гидроксиде едкого натрия ( $NaOH$ ) высокой концентрации при нагревании, что позволяет извлечь около 87 % полезной массы глинозема:



Продуктом реакции является глинозем  $Al_2O_3$ , порошок белого цвета, пригодный для дальнейшего использования в электролизных ваннах. Посторонние примеси, содержащиеся в исходном сырье, не преобразуются в растворимую форму и выпадают в твердый осадок.

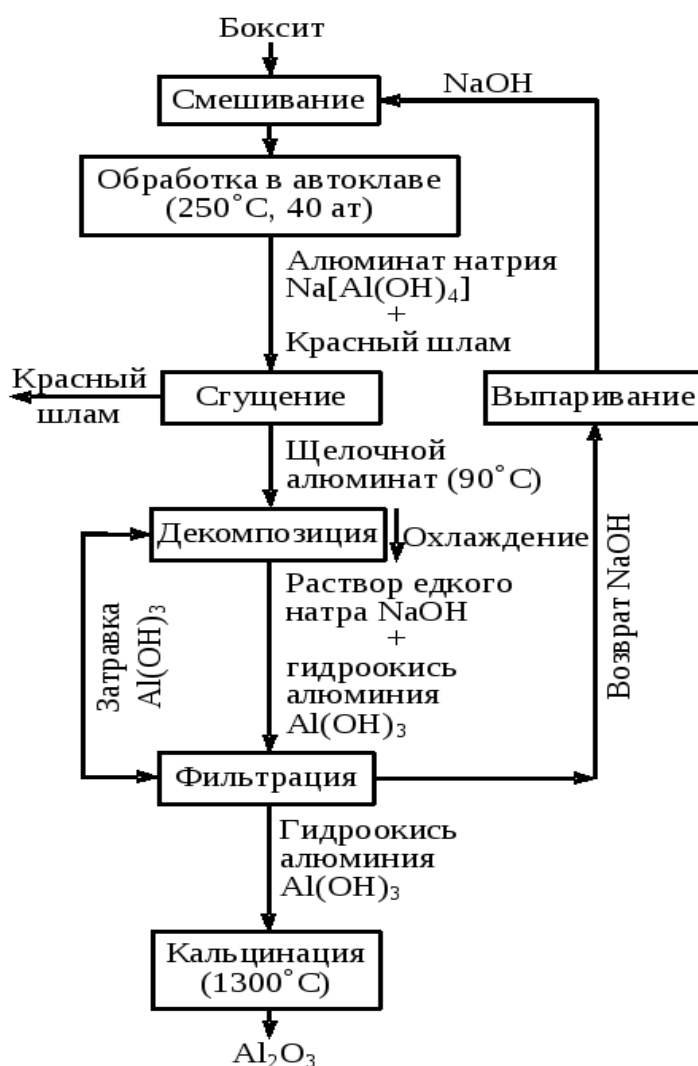


Рисунок 1.2 – Схема производства глинозема по способу Байера

Нерастворимый осадок имеет название «красный шлам» и может быть удален из соответствующих емкостей с целью наиболее качественного очищения гидроокиси алюминия [10]. Красным шлам, образованный из набора различных примесей, является массивным сгустком красноватого цвета и состоит из химических соединений кремния ( $Si$ ), железа ( $Fe$ ), титана ( $Ti$ ), а также других известных

химических элементов. Извлекаемый шлам помещают на специальные склады, называемыми шламохранилищами. Шлам используется для переработки с целью получения соединений редкоземельных металлов или применяется для обогащения проблемных территорий сельского хозяйства [11, 12].

Полученный в результате реакции жидкий гидроксид алюминия проходит стадию фильтрации. Крупные частицы оседают на фильтрах, подвергаются промывке и дроблению до фракций размером  $0,05 \div 0,15$  мм с последующей кальцинацией. Под кальцинацией понимается процесс нагревания частиц гидроксида алюминия для удаления воды и получения очищенного глинозема. Так, на производство 1 т глинозема расходуется примерно 2,0 – 2,5 т боксита, 70 – 100 кг гидроксида натрия ( $NaOH$ ), около 120 кг извести, 7 – 10 тонн пара, 160 – 180 кг смазочных материалов и более 280 кВт·ч электроэнергии. Все это необходимо для осуществления выщелачивания оксида алюминия. Стоит отметить, что у полученного глинозема нет срока годности, но при его хранении требуется полная изоляция от источников воды, так как он активно притягивает влагу [13].

В таблице 1.1 представлен химический состав бокситов разных месторождений. По данным академика А. Е. Ферсмана насчитывается более 250 минеральных соединений алюминия и алюмосиликатов, расположенных вблизи поверхности земли [14]. Алюминиевая руда в различных сочетаниях содержит около 100 химических элементов таблицы Менделеева [15]. В частности, содержит наиболее важные соединения  $Al_2O_3$ : 35 – 60 %;  $SiO_2$ : 0,01 – 25 %;  $Fe_2O_3$ : 2 – 40%;  $TiO_2$ : 0,01 – 11 %. При этом процент примесей остается низким, например содержание ванадия составляет 0,025 – 0,15 %, а галлия до 0,007 %.

Качество извлеченных бокситов в большинстве случаев определяется при помощи кремниевого модуля  $\mu_{Si}$ , который отражает массовое соотношение оксида алюминия  $Al_2O_3$  к оксиду кремния  $SiO_2$ , то есть чем больше значение модуля, тем выше качество руды [16, 17]:

$$\mu_{Si} = \frac{Al_2O_3}{SiO_2}. \quad (1.3)$$

В результате, если  $\mu_{Si} \geq 7$ , то рекомендуется перерабатывать руду по способу Байера, иначе целесообразно использовать способ спекания с выполнением соответствующих технологических операций [18].

Таблица 1.1 – Химический состав бокситов разных месторождений

Страна	Содержание основных компонентов, %							$\mu_{Si}$
	$Al_2O_3$	$SiO_2$	$Fe_2O_3$	$TiO_2$	$CaO$	$Ga \cdot 10^3$	п.п.п.	
Австралия	43,7	3,6	16,4	1,9	–	6,0	21,3	12,1
Индия	49,2	2,8	16,1	6,4	0,1	7,0	25,1	17,6
Китай	66,1	7,9	5,5	3,3	0,4	6,0	13,8	8,4
Ямайка	44,3	1,5	18,2	–	–	6,0	25,0	29,5
Россия	53,5	3,7	22,5	2,0	3,8	5,0	12,5	14,5
Урал	45,4	8,8	19,4	2,2	7,0	–	–	5,2
Тихвин	45,4	15,9	13,4	0,32	1,3	5,0	15,0	2,9
Бразилия	49,4	4,5	14,6	1,4	0,3	5,0	24,0	11,0
Суринам	54,5	3,8	8,7	2,6	–	8,0	26,0	14,2
Греция	56,6	3,8	21,6	2,5	0,8	3,0	12,6	14,9
Казахстан	42,6	11,6	18,4	2,3	0,8	5,0	20,5	3,7
Венгрия	53,1	4,8	18,8	2,8	–	3,0	19,5	11,1
Румыния	63,7	3,6	9,7	–	–	3,0	–	17,7
Гвинея	56,7	2,7	7,4	3,6	0,2	3,3	26,4	21,0
Турция	57,4	7,0	18,1	–	–	4,0	12,0	8,2

При текущем уровне добычи руды мировая промышленность обеспечена сырьем более чем на 250 лет. Мировые запасы промышленных бокситов сосредоточены следующим образом: Африка – 44,6 %, Азия – 20,8 %, Америка – 18,1 %, Австралия – 12,9 %, Европа – остальное. Самые крупные месторождения сосредоточены в странах с тропическим и субтропическим климатом. Месторождения залегают на поверхности земли, поэтому практически вся добыча руды осуществляется открытым способом [19].

Глинозем  $Al_2O_3$  служит не только основным источником получения алюминия, но и выполняет функции теплоизоляции расплава, а также применяется в системах с сухой газоочисткой. Оптимальный набор значений примесей для определения качественного глинозема составляет:  $SiO_2 + Fe_2O_3 < 0,03$  %;  $Na_2O < 0,38$  %;  $P_2O_5 < 0,002$  %;  $H_2O < 0,5$  %.

К основным требованиям, предъявляемым к глинозему, относятся: скорость растворения в электролите, адсорбционная способность поглощения газообразных фторидов при сухой газоочистке, текучесть, теплофизические свойства [20]. Химический состав глинозема регламентируется ГОСТ 30555–98 «Глинозем металлургический», марки которого представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Химический состав основных марок глинозема

Марка	Массовая доля примесей, не более, %						
	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	ZnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	примеси	ППП
Г - 000	0,02	0,01	0,3	0,001	0,001	0,01	0,6
Г - 00	0,02	0,03	0,4	0,001	0,002	0,01	1,2
Г - 0	0,03	0,05	0,5	0,002	0,002	0,02	1,2
Г - 1	0,05	0,04	0,4	0,002	0,002	0,02	1,2
Г - 2	0,08	0,05	0,5	0,003	0,002	0,02	1,2
<b>Примечание:</b> тяжелые примеси – сумма оксидов TiO <sub>2</sub> + V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> + Cr <sub>2</sub> O <sub>5</sub> + MnO; ППП – потери при прокаливании.							

Выдающийся вклад в развитие электрометаллургии алюминия внесли экспериментальные исследования П. П. Федотьева и В. П. Ильинского в 1910 – 1912 гг., которые исследовали закономерности двойных систем  $NaF-AlF_3$  и  $3NaF \cdot AlF_3-Al_2O_3$ . На основе этих работ в марте 1929 г. на опытной установке, построенной на металлургическом заводе «Красный Выборжец» в Санкт-Петербурге под руководством П. П. Федотьева на электролизерах с силой электрического тока 2 кА было получено 8 кг первичного алюминия. С открытием новых месторождений бокситов геологом Н. А. Каржавиным и академиком Е. С. Федоровым в 1931 г. были открыты богатейшие залежи бокситов на Северном Урале, что способствовало постройке «Уральского алюминиевого завода» в 1939 г. Позже появились и другие промышленные предприятия, например «Волховский алюминиевый завод», «Днепропетровский алюминиевый завод». В военные годы были приняты меры по строительству алюминиевых заводов в Кузбассе «Новокузнецкий алюминиевый завод» и на Урале «Богословский алюминиевый завод». С этого момента производственная мощность алюминиевых заводов возросла в 30 раз [21]. В 2000 г. компания «РУСАЛ» объединила и взяла под свой контроль все российские и ряд зарубежных

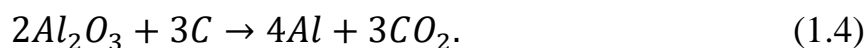


алюминиевых, глиноземных, электродных заводов, включая бокситовые рудники.

К последним значимым работам в области электролиза можно отнести труды Б. М. Горенского и его последователей [22], которые специализируются на математическом моделировании технологических операций процесса электролиза и реализации программно-инструментальных систем для исследования и качественного управления всеми этапами электролитического получения алюминия-сырца [23].

## 1.2 Технологические особенности производства алюминиевых сплавов

Процесс электролиза алюминия протекает в электролизном цехе алюминиевого завода [24, 25]. В процессе электролитического получения жидкого алюминия в электролизере происходит основная химическая реакция:



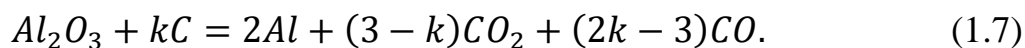
На аноде происходит окисление ионов кислорода:



На катоде происходит восстановление алюминия:



Реакция, происходящая в электролизере, имеет вид:



Коэффициент  $k$  имеет некоторый ограниченный диапазон значений, например  $k \in [1, 3]$  и отражает переменный характер процесса, так как зависит от многих факторов, например: температуры, гидродинамики электролита, качества и структуры анода. При производстве алюминия используется электролит в виде расплава криолита ( $Na_3AlF_6$ ) с растворенным внутри него глиноземом, что позволяет получить криолитоглиноземный расплав. Обычно используются криолиты следующего химического состава:  $Na_3AlF_6 - 80\%$ ;  $AlF_3 - 7,5\%$ ;  $Al_2O_3 - 4\%$ ;  $CaF_2 - 4,5\%$ ;  $MgF_2$

– 1,3 %. При использовании угольных анодов разряжающийся кислород не выделяется в свободном виде, а способствует осуществлению реакции окисления углерода в аноде с образованием  $CO_2$ :



Кроме реакции выделения углекислого газа также происходят и другие побочные реакции, в частности на аноде восстанавливаются ионы фтора:



В то же время, на катоде происходит реакция восстановления ионов натрия:



Помимо натрия и фтора, также могут восстанавливаться и другие металлы, такие как  $Zn, Fe, Si, Mg, Mn, Ti$ .

При производстве первичного алюминия необходимо использовать высококачественный глинозем с низким содержанием соединений железа и кремния. Получение жидкого алюминия происходит в электролизных ваннах при силе тока  $I$  до 400 кА и напряжении  $U$  в диапазоне 3,7 – 4,8 В с использованием искусственного криолита  $3NaF \cdot AlF_3$  по ГОСТ 10561-80 с пониженным соотношением  $NaF$  и  $AlF_3$  [26 – 28].

Напряжение электролизера регулируется автоматически соответствующими АСУТП, например «Алюминий-2» или «СААТ-2». Основная функция данных систем выражается в стабилизации энергетического режима работы электролизера в необходимом диапазоне значений напряжения. Приведенное напряжение  $U_{пр}$  на электролизере рассчитывается по формуле:

$$U_{пр} = \frac{U - E_k}{I} \cdot I_n + E_k, \quad (1.11)$$

где  $U$  – текущее значение напряжения электролизера, В;

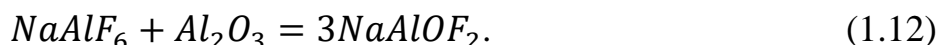
$E_k$  – значение обратной ЭДС, В;

$I$  – текущее значение тока серии, кА;

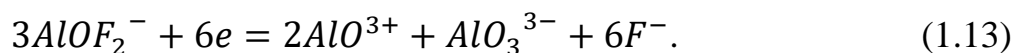
$I_n$  – номинальное значение тока серии, кА.

Регулирование процесса с использованием АСУТП осуществляется путем сравнения рассчитанного значения  $U_{np}$  с заданным напряжением электролизера и при наличии отклонений незамедлительно поднимает или опускает анод для выравнивания напряжения.

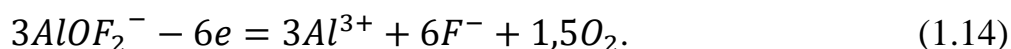
Растворение глинозема в криолитовом расплаве сопровождается химической реакцией с образованием ионов  $AlOF_2^-$  и  $Na^+$ :



Реакция восстановления алюминия на катоде:



Реакция образования газообразного кислорода на аноде:



Заполненная расплавленным криолитом ванна при температуре 955 – 965 °С создает токопроводящую среду, где катодом считается дно ванны, а анодом, загружаемые в криолит прессованные обожженные угольные блоки [29]. Так, образуется электрическая цепь, где ток проходит через расплавленный электролит от плюса к минусу, разрушая устойчивые соединения алюминия с другими включениями. При разрыве связей атомов кислорода с алюминием чистый алюминий осаждается на дне ванны, а кислород соединяется с углеродом, образуя углекислый газ, который улавливается газоотводящими сооружениями. Также в процессе электролиза применяются различные химические добавки, снижающие электропроводность электролита, например  $NaCl$ ,  $NaF$ ,  $CaF_2$ ,  $MgF_2$ ,  $LiF$  [30].

Стоит отметить, что периодически при уменьшении концентрации глинозема до значений 1,0 – 1,5 % в расплаве электролита происходит возникновение анодного эффекта, который связан с внезапным повышением мощности электролизера, что в свою очередь приводит к перегреву электролита и нарушению теплового

баланса внутри электролизера. Анодный эффект возникает в результате скопления множества пузырьков газа, образуя некую газовую пленку, которая постепенно оттесняет расплав электролита от электрода, что резко увеличивает потребление электроэнергии и снижает полезную производительность электролизеров [31].

Уменьшение частоты возникновения анодного эффекта возможно при осуществлении непрерывного мониторинга важных параметров функционирования электролизных ванн. В настоящее время промышленные предприятия, связанные с производством алюминия, постепенно переходят на новые образцы электролизных ванн под маркировкой РА-550 с автоматизированным управлением этапов электролиза, что позволяет нивелировать подобные побочные эффекты [32].

В том числе, для эффективного взаимодействия технологического персонала с новым оборудованием осуществляется разработка специальных технологических инструкций, а также проводятся специальные курсы повышения квалификации, что позволяет осуществлять контроль сложных и взаимосвязанных процессов внутри электролизных ванн в автоматическом режиме [33].

На рисунке 1.3 представлена упрощенная схема электролизера, обеспечивающего получения жидкого алюминия по технологии Содерберга [34], где 1 – углеродистая футеровка; 2 – огнеупорная футеровка; 3 – застывший электролит; 4 – расплавленный электролит; 5 – углеродистый анод; 6 – самообжигающаяся углеродистая масса; 7 – газоотвод; 8 – слой глинозема; 9 – токоподводы.

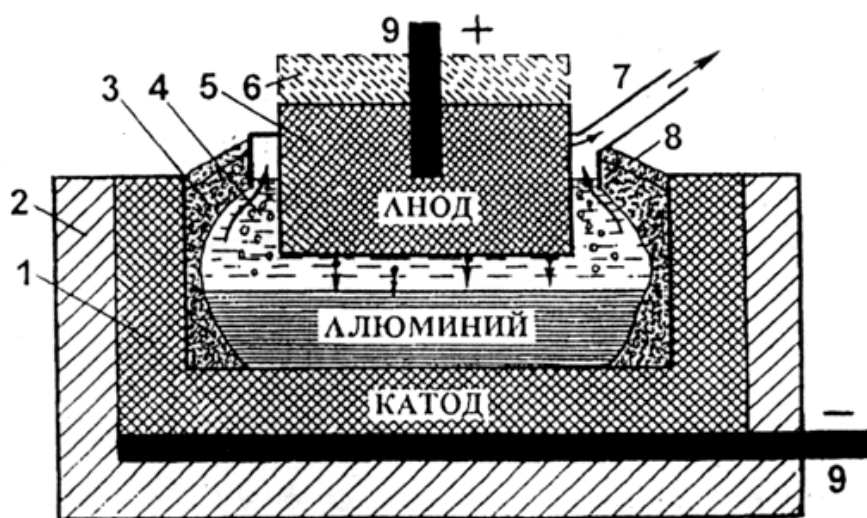


Рисунок 1.3 – Схема устройства электролизера для получения алюминия-сырца

В отличие от предшествующей технологии Холла-Эру в технологии Содерберга используются самообжигающиеся угольные аноды, что исключает влияние человеческого фактора. Недостатком технологии Содерберга является образование кислорода, который сжигает угольные аноды и образует оксид углерода, смолистые соединения, а также бензапирен. На сегодняшний день, в таких странах, как Китай и Норвегия используются модернизированные аноды, обеспечивающие сниженное образование вредных веществ. В России данная технология до сих пор используется в 70 % случаев, однако уже запланирован переход на инертные аноды для снижения негативных последствий для экологии [35 – 38]. Несмотря на эти недостатки, качество получаемого алюминия соответствует международным стандартам марок и соответствует ТУ 48-5-287-67 и ГОСТ 11069-2001. В таблице 1.3 представлены наиболее известные марки первичного алюминия [39, 40].

Жидкий алюминий, скопившийся на дне электролизной ванны, раз в несколько суток извлекают при помощи вакуумных литейных ковшей, обедненных воздухом. Заявленная емкость литейных ковшей составляет не более 4 – 5 т. Заполненные жидким металлом литейные ковши отправляются в литейное отделение промышленного предприятия для последующего изготовления алюминиевых сплавов с заданным химическим составом [41].

Таблица 1.3 – Алюминий первичный ГОСТ 11069-2001

Обозначение	Массовая доля, %					
	Al(min)	Si(max)	Fe(max)	Cu(max)	Ti(max)	Zn(max)
A0	99	0,5	0,5	0,02	0,03	0,08
A5	99,5	0,3	0,3	0,02	0,03	0,06
A5E	99,5	0,12	0,35	0,02	0,015	0,04
A6	99,6	0,2	0,25	0,01	0,03	0,06
A7	99,7	0,16	0,16	0,01	0,02	0,04
A7E	99,7	0,08	0,2	0,01	0,01	0,04
A8	99,8	0,1	0,12	0,01	0,02	0,04
A85	99,85	0,06	0,08	0,01	0,01	0,02
A95	99,95	0,03	0,03	0,015	0,002	0,005
A97	99,97	0,015	0,015	0,005	0,002	0,003
A99	99,99	0,003	0,003	0,003	0,002	0,003
A995	99,995	0,0015	0,0015	0,001	0,001	0,001
A999	99,999	-	-	-	-	-

В таблице 1.4 представлен химический состав наиболее распространенных для производства марок литейных и деформируемых сплавов. Алюминиевые сплавы относятся к группе высоколегированных прецизионных сплавов с заданными физико-химическими свойствами, которые имеют точный химический состав в соответствии с установленными требованиями [42, 43].

Таблица 1.4 – Алюминиевые сплавы ГОСТ 4784-97

Обозначение		Массовая доля, %					
ГОСТ	Al(min)	Si(max)	Fe(max)	Cu(max)	Mn(max)	Mg(max)	Zn(max)
АЛ1	основа	0,7	0,8	3,75-4,5	-	1,25-1,75	0,1
АЛ2	основа	10-13	1,5	0,6	0,5	0,1	0,3
АЛ3	основа	4,5-5,5	1,6	1,5-3	0,6-0,9	0,35-0,6	0,3
АЛ4	основа	8-10,5	1	0,1	0,2-0,5	0,17-0,3	0,2
АЛ5	основа	4,5-5,5	1,5	1,0-1,5	0,5	0,35-0,6	0,3
АЛ6	основа	4,5-6	1,5	2-3	0,3	0,1	0,3
АЛ7	основа	1,2	1	4-5	0,1	0,03	0,2
АЛ8	основа	0,3	0,3	0,1	0,1	9,5-10	0,1
АЛ9	основа	6-8	1,5	0,2	0,5	0,2-0,4	0,3
АЛ19	основа	0,3	0,2	4,5-5,3	0,6-1	0,05	0,2
АЛ21	основа	0,5	0,6	4,6-6	0,15-0,25	0,8-1,3	0,3
АЛ27	основа	0,2	0,2	0,15	0,1	9,5-10,5	0,1
АЛ33	основа	0,3	0,3	5,5-6,2	0,6-1	0,05	-
АД000	основа	0,15	0,15	0,03	0,02	0,02	0,06
АД00	основа	0,2	0,25	0,03	0,03	0,03	0,07
АД0	основа	0,25	0,40	0,05	0,05	0,05	0,07
АД1	основа	0,3	0,3	0,05	0,025	0,05	0,1
АД	основа	Si + Fe: 1,0		0,05	0,05	-	0,1
АД31	основа	0,2-0,6	0,35	0,1	0,1	0,45-0,9	0,1
АД31Е	основа	0,3-0,7	0,5	0,1	0,03	0,35-0,8	0,1
АД33	основа	0,4-0,8	0,7	0,15-0,4	0,15	0,8-1,2	0,25
АД35	основа	0,7-1,3	0,5	0,1	0,4-1	0,6-1,2	0,2
Д1	основа	0,2-0,8	0,7	3,5-4,5	0,4-1	0,4-0,8	0,25
Д16	основа	0,5	0,5	3,8-4,9	0,3-0,9	1,2-1,8	0,25
Д18	основа	0,8	0,7	2,2-0,3	0,2	0,2-0,5	0,25
Д19	основа	0,5	0,5	3,8-4,3	0,5-1	1,7-2,3	0,1
АК4	основа	0,5-1,2	0,8-1,3	1,4-1,8	1,4-1,8	1,4-1,8	0,3
АК6	основа	0,7-1,2	0,7	1,8-2,6	0,4-0,8	0,4-0,8	0,3
АК8	основа	0,5	0,7	3,9-5	0,4-0,8	0,2-0,8	0,25
ММ	основа	0,6	0,7	0,30	1-1,5	0,2-0,6	0,25
АМц	основа	0,6	0,7	0,05-0,2	1-1,5	-	0,1
АМчС	основа	0,15-0,35	0,25-0,45	0,1	1-1,4	0,05	0,1
Д12	основа	0,3	0,7	0,25	1-1,5	0,8-1,3	0,25

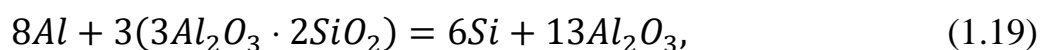
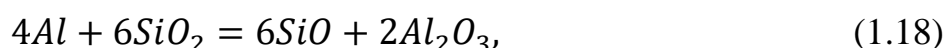
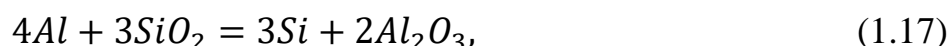
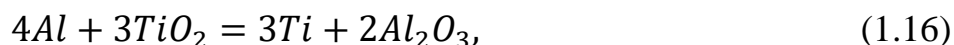
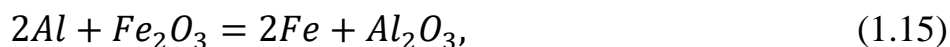
Продолжение таблицы 1.4 – Алюминиевые сплавы ГОСТ 4784-97

Обозначение		Массовая доля, %					
ГОСТ	Al(min)	Si(max)	Fe(max)	Cu(max)	Mn(max)	Mg(max)	Zn(max)
АМг1	основа	0,3	0,7	0,1	0,2	0,5-1,1	0,25
АМг2,5	основа	0,25	0,4		0,1	2,2-2,8	0,1
АМг3	основа	0,5-0,8	0,5		0,3-0,6	3,2-3,8	0,2
АМг3,5	основа	0,25	0,4		0,1	3,1-3,9	0,2
АМг4,0	основа	0,4	0,5	-	0,1	3,5-4,5	0,25
АВ	основа	0,5-1,2	0,5	0,1-0,5	0,15-0,35	0,45-0,9	0,2
В65	основа	0,25	0,2	3,9-4,5	0,3-0,5	0,15-0,3	0,1
В95оч	основа	0,1	0,15	1,4-2	0,2-0,6	1,8-2,8	5-6,5

Качество первичного алюминия определяется присутствием в его химическом составе различного рода примесей. В общем случае примеси можно подразделить на три основные группы: металлические (железо, титан, кремний и др.); неметаллические примеси (глинозем, фтористые соли, карбиды, нитриды алюминия, расплавленные частицы футеровки электролизеров, вакуумных ковшей, плавильных агрегатов, которые были вовлечены в расплав при обработке исходного сырья); газообразные (водород, образующийся в результате попадания  $H_2O$  в расплав алюминия в процессе электролиза). Химический состав алюминия регламентируется ГОСТ и определяет марку металла с учетом имеющегося количества примесей [44 – 46]. Например, алюминий марок А95, А97, А99 содержит наименьшее количество примесей и соответственно имеет более высокую стоимость. Соотношение химических элементов в расплаве определяет применимость металла при производстве различных электротехнических изделий, в частности алюминиевая катанка должна иметь необходимую величину удельного электрического сопротивления используемого проводника, например: марка А5Е ( $\leq 0,028 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ ), марка А7Е ( $\leq 0,0277 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ ). При этом удельное сопротивление алюминия зависит от количества примесей титана, ванадия, марганца, хрома, циркония [47].

Основным источником попадания металлических примесей в расплав является футеровка агрегатов, в которых находился жидкий алюминий. Расплавленный алюминий отличается высоким сродством к  $O_2$  и характеризуется восстановительной способностью, что, в свою очередь, приводит к восстановлению элементов

железа, титана, кремния и других оксидов, имеющих на стенках огнеупорных футеровок. Протекание реакций восстановления железа, титана и кремния при взаимодействии алюминия-сырца с алюмосиликатными огнеупорами [48]:



Протекание данных реакций при температуре  $T=1073$  К характеризуется высокой интенсивностью, в том числе при проведении термодинамического анализа и расчете энергии Гиббса  $\Delta G^0$ , кДж/моль представленных реакций возможно почти полное восстановление  $Fe$ ,  $Si$ ,  $Ti$ , что в свою очередь влияет на будущий химический состав расплава алюминия-сырца.

Одним из способов очистки расплава первичного алюминия от газовых и неметаллических примесей является отстаивание расплава при температуре около  $750^\circ\text{C}$  [49]. В дополнение к этому применяют вакуумирование, рафинирование, продувку расплава смесями хлора и азота, обработку расплава солевыми соединениями с последующей фильтрацией полупродукта в процессе разлива на конвейер [50 – 52]. Принятие специальных мер, а также разработка соответствующих технологий и конструкций металлургических агрегатов, в том числе исследование различных вариантов составов изготовления огнеупоров позволяет повысить качество алюминия и снизить количество вредных примесей.

В алюминиевом производстве широкое распространение получили шамотные огнеупоры марок ШКУ ( $Al_2O_3$  28 – 45 %), ША, ШБ, а также муллитовые изделия ( $Al_2O_3$  62 – 72 %) марки МЛС-62. Представленные материалы беспрепятственно взаимодействуют с расплавами алюминия-сырца и при температурах  $750 - 950^\circ\text{C}$  активно восстанавливают оксиды железа, кремния, титана [53 – 55]. В результате



такого взаимодействия рабочая поверхность футеровки изменяет свою структуру и приобретает зональное строение, что преждевременно уменьшает срок службы агрегатов. Также химическое взаимодействие алюминия с огнеупорной кладкой приводит к изменению теплофизических и механических свойств поверхностного слоя этой футеровки.

Для решения этой проблемы, в настоящее время, в местах соприкосновения жидкого алюминия с огнеупором, эксплуатируются футеровки различных составов и способов изготовления, например футеровки на основе глинозема ( $Al_2O_3$  – 90 %,  $SiO_2$  – 10 %), фосфатных связующих или магнезита. В частности, при использовании монолитных низкопористых футеровок с использованием глинозема снижается проникающее действие расплава в структуру футеровки и уменьшается ее преждевременный износ. Применение низкопористых бетонных соединений актуально при изготовлении футеровок литейных ковшей во многих развитых странах, таких как Америка, Германия, Франция и Австралия [56]. Наряду с этим, для создания защитного слоя между футеровкой агрегата и жидким расплавом алюминия применяются различные защитные обмазки, например соединения  $Na_3AlF_6$  (23 – 25 %),  $B_2O_3$  (20 – 27 %) и  $NaCl$  [57].

Исходя из этого, тепловые режимы работы футеровок отличаются, например, внутренняя футеровка электрического миксера сопротивления работает в стационарных тепловых условиях, так как температура жидкого алюминия всегда поддерживается на одном уровне с помощью нагревательных элементов во избежание застывания расплава. Однако, футеровка литейных ковшей подвержена более сильным перепадам температуры при заливке и выливке алюминия-сырца из них [58]. В связи с этим необходимо производить соответствующие мероприятия по наблюдению за состоянием футеровок имеющих агрегатов и осуществлять своевременную замену литейных ковшей.

Проблемы оценки качества исходного алюминия-сырца, классификация алюминиевых сплавов по группам агрессивности взаимодействия алюминия с другими химическими элементами, а также способы обработки высокотемпературных расплавов при взаимодействии с футеровкой представлены в работах М. М. Рутмана и

Е. Е. Гришенкова [59].

В основе алюминиевых сплавов лежит первичный алюминий марок А7, А7Е, А8. В качестве легирующих добавок часто используются следующие металлы: бор, железо, кремний, магний, медь, никель, свинец, титан [60 – 62].

Литейные сплавы содержат достаточное количество легирующих добавок и предназначены для отливки слитков металла в конечную форму, а деформируемые сплавы дополнительно подвергаются механической и термической обработке для получения уникальных свойств металла, то есть обладают повышенной прочностью, отличаются высокой коррозионной устойчивостью и пластичностью [63].

Согласно данным из литературных источников [64, 65] ниже представлены примеры влияния легирующих добавок на свойства алюминиевых сплавов.

В частности, бериллий добавляют в алюминиевые сплавы, легированные магнием с целью снижения реакции окисления при высоких температурах.

Бор применяют в качестве рафинирующей добавки для улучшения электропроводности и образования новых соединений алюминия с элементами ванадия, титана, хрома и молибдена.

Ванадий необходим для повышения температуры рекристаллизации алюминиевого расплава, а также применяется при изготовлении электрокабелей.

Висмут, олово, свинец и кадмий являются металлами с невысокими значениями температуры плавления и вводятся в расплав для улучшения механической обработки алюминиевых заготовок путем резки.

Галлий часто присутствует в расплаве в качестве примеси в количестве 0,001 – 0,02 %, что несущественно влияет на механические свойства будущей заготовки, однако избыточное количество галлия может привести к разрушению межкристаллических связей алюминиевого расплава.

Наличие железа в расплаве способствует снижению размера зерна в полуфабрикатах деформируемых отливок, а также повышает прочность алюминиевых заготовок в системе *Al-Cu-Ni* при высоких температурах.

Малые добавки индия в размере 0,05 – 0,2 % упрочняют сплавы системы *Al-Cu* при естественном старении и низких показателях содержания меди 2 – 3 %.

Кадмий в количестве 0,005 – 0,5 % используется для сокращения старения алюминиевых сплавов системы  $Al-Zn-Mg$ , что соответственно повышает прочность и коррозионные свойства будущих заготовок.

Кальций имеет низкое значение растворимости в расплаве алюминия и образует интерметаллид  $CaAl_4$ . При содержании в расплаве  $Ca$  – 5 % и  $Zn$  – 5 % возникает эффект повышенной сверхпластичности формируемых отливок.

При малом содержании кальция увеличивается склонность насыщения формируемого расплава соединениями водорода. При этом растворимость соединений водорода в расплавленном алюминии выше, чем в твердом состоянии, поэтому велика вероятность формирования газовой пористости при остывании отливок.

Такие элементы как бериллий, медь, олово и кремний снижают возможность поглощения водорода. Поддержание минимального уровня водорода осуществляется путем продувки инертными газами или вакуумной дегазацией.

Малое количество лития может вызывать очаги коррозии на алюминиевых отливках во влажной атмосфере. Повышение концентрации лития способствует повышению упругости, а также повышает сопротивляемость к появлению микротрещин при средневзвешенных коэффициентах интенсивности напряжения.

Магний считается наиболее распространенным легирующим элементом, применяемым при формировании алюминиевых сплавов. Максимальная растворимость магния составляет 17,4 %, но в реальности не превышает 5,5 %, например, в деформируемых сплавах. Добавление магния значительно увеличивает прочность алюминия без изменения пластичности.

Добавление марганца снижает электросопротивление алюминиевых сплавов. При этом марганец упрочняет свойства алюминиевых отливок без существенной потери коррозионной стойкости.

Медь с концентрацией 4 – 6 % используется для упрочнения и повышения твердости алюминиевых заготовок, что, в свою очередь, снижает относительное удлинение таких заготовок при обработке.

Молибден с концентрацией до 0,3 % используется как рафинирующая добавка, в том числе, служит для корректировки и усреднения химического состава

алюминиевого расплава.

Содержание никеля обычно не превышает 0,04 %. Никель вводят в сплавы системы *Al-Cu* или *Al-Si* с целью повышения прочности заготовок для снижения линейного расширения в средах с повышенными температурами.

Олово до 0,05 % усиливает эффект искусственного старения в алюминиевых сплавах после процедуры закалки. Так, добавление олова способствует повышению прочности и коррозионной стойкости создаваемых сплавов.

Ртуть в количестве до 0,05 % увеличивает защиту стальных конструкций, однако ее пары токсичны и при взаимодействии с соединениями солей вызывает ускоренную коррозию металла.

В некоторые сплавы вводят до 0,5 % свинца и висмута, что позволяет улучшить физические свойства приготовленного металла при механической обработке.

Серебро имеет значительную растворимость в твердых сплавах алюминия, например небольшие объемы добавок серебра от 0,1 – 0,5 % крайне эффективны для повышения прочности и обеспечения сплава коррозионным сопротивлением под влиянием высокого электрического напряжения.

Сурьма присутствует в алюминиевых сплавах в виде отдельных микроскопических следов, но при этом ее содержание можно увеличить с целью снижения образования трещин в сплавах системы *Al-Mg*.

Наличие некоторого количества титана в алюминиевых сплавах способствует снижению электропроводности алюминия, в дополнение к этому при присутствии титана и повышении концентрации бора достигается уменьшение образования зерновых пор в готовых слитках.

Добавление церия в алюминиевых сплавах повышает текучесть металла и благоприятно сказывается на литейных свойствах алюминия, например при разливке металла на транспортировочную линию фирмы «Brochot».

Цинк повышает прочностные свойства алюминиевых отливок при длительной термообработке, однако следует контролировать суммарную концентрацию цинка и магния, так как это влияет на общую коррозионную стойкость сплавов.

Цирконий используется для увеличения температуры рекристаллизации и

контроля пористости в полуфабрикатах алюминия. В том числе цирконий ослабляет действие титана и бора, что в свою очередь вызывает необходимость восполнения титана и бора с помощью соответствующих легирующих добавок.

Также стоит отметить, что небольшое количество углерода, фосфора и хрома присутствует в жидком расплаве алюминия, однако наиболее значительное влияние на электросопротивление оказывает умеренная концентрация хрома до 0,35 %, что придает отливкам золотистый оттенок.

Приготовление алюминиевых сплавов в виде мелких чушек массой 15,0 кг или 22,5 кг, а также крупногабаритных слитков массой до 750 кг осуществляется в литейном отделении промышленного предприятия с использованием стационарных и поворотных электрических миксеров сопротивления, оснащенных гидроплунжерами, а также индукционных тигельных печей разной емкости. Обычно для приготовления крупных заготовок деформируемых сплавов используются поворотные миксера, а стационарные миксера и тигельные печи чаще всего применяются для приготовления литейных сплавов в виде мелкой чушки, а также для переплавки технологических отходов в виде металлической обрезки, стружки, алюминиевого лома и шлака [66].

На рисунке 1.4 представлен электрический миксер одного из промышленных предприятий компании «РУСАЛ» стационарного типа для смешивания алюминия-сырца из литейных ковшей, оборудованный МГД-перемешивателем для организации движения расплава с целью усреднения концентрации его химических компонентов. Все миксеры чаще всего оборудованы чушкоукладчиками, а также машинами полунепрерывного типа для литья жидкого металла на разливочный конвейер с возможностью регулировки скорости движения потока жидкого металла. Также при производстве алюминиевых сплавов применяется пресс-установка «Altek» для извлечения металла из шлака. Принцип работы установки основан на том, что в результате прессования шлака осуществляется разрушение оксидной пленки на каплях расплава и их стекание через отверстие в днище изложницы.

Обработка шлака позволяет извлечь до 25 % исходной массы алюминия для повторного добавления в расплав. Стоит отметить, что при производстве



Снятый шлак представляет собой неоднородный конгломерат, содержащий алюминий или сплав на его основе [67]. Образование шлака происходит в результате взаимодействия расплава с воздухом или при обработке алюминиевого расплава флюсовыми добавками [68]. Обработка расплава осуществляется механически или с помощью передвижной дегазационной установки PAL FI 60R, которая подключается в миксер для продувки расплава инертными газами, например аргонном, что позволяет уменьшить содержание водорода в расплаве. Одновременно с этим имеется возможность вести обработку расплава дегазирующим флюсом Promag Fi/Si для улучшения эффективности очистки расплава от примесей водорода. Помимо МГД-перемешивателей миксера могут быть оснащены фильтрационной установкой SNIF P-140UNB для осуществления фильтрации расплава от шлаковых включений, растворенного водорода и щелочноземельных элементов. Разливка подготовленного алюминия осуществляется на линии «Wagstaff» с системой

«AirSlip», которая обеспечивает подачу воды, масла и воздуха в зону литья с целью снижения температуры отливаемых слитков.

В таблице 1.5 представлены технические характеристики миксеров литейного отделения разной емкости одного из крупнейших предприятий России АО «РУСАЛ Новокузнецк».

Таблица 1.5 – Технические характеристики миксеров литейного отделения

Параметры	Характеристики			
Тип миксера	поворот- ный	стационар- ный	поворот- ный	стационар- ный
Тип свода	плоский	арочный	плоский	арочный
Емкость миксера, полная, т	38	25	38	15
Емкость миксера, полезная, т	35	23	35	14
Ванна миксера, мм:				
- ширина	3400	2400	2400	1800
- длина (с откосами)	6200	7000	7000	6100
- глубина	950	800	800	710
Мощность, кВт	500	420	500	420
Тип нагревательных элем.	«Кантал»	Нихром Н-80	«Кантал»	Нихром Н-80
Кол-во элементов нагрева	12	24	12	24

На рисунке 1.5 представлен общий вид литейного ковша, а таблица 1.6 содержит технические характеристики различных типов литейных ковшей, используемых для наполнения полезной емкости миксера жидким алюминием-сырцом.

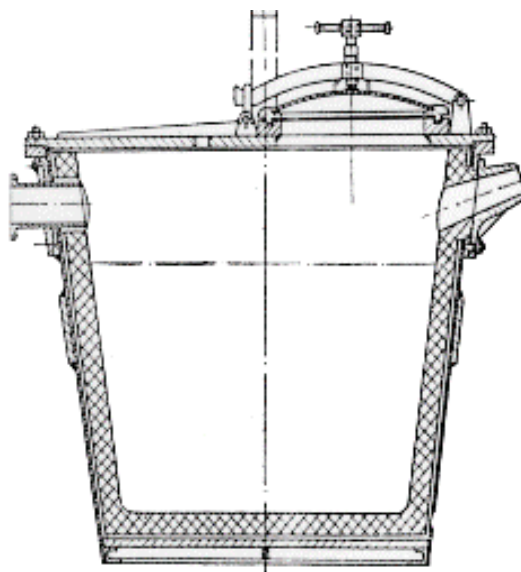


Рисунок 1.5 – Общий вид литейного ковша

Доставленные из электролизного цеха литейные ковши, содержащие расплавленный алюминий-сырец, предварительно взвешиваются на платформенных весах фирмы «VERTEX» и отправляются в специальную зону для отстаивания перед предстоящей разливкой в миксер. Перемещение литейных ковшей происходит с использованием электромостового крана, который обеспечивает заливку алюминия-сырца в миксер, а также предназначается для погрузочно-разгрузочных работ.

Таблица 1.6 – Технические характеристики ковшей литейного отделения

Параметры	Литейное отделение	
Тип ковша	разливочный	литейный
Емкость, т	до 5	до 5
Диаметр верхней части, мм	1690	1445
Диаметр нижней части, мм	1430	1244
Высота, мм	1770	1550
Передаточное число редуктора	8950	6000
Мощность, кВт	1,7	1.7
Напряжение, В	380	380
Частота вращения двигателя, об/мин	710 (11,8)	1420 (23,7)

С помощью отбора пробы определяется химический состав алюминия-сырца, привезенного из электролизного цеха, а также определяется содержание  $Fe$  и  $Si$ . Проба остужается, маркируется и с помощью пневматической почты доставляется в специальную лабораторию для проведения химического анализа с помощью эмиссионного ARL-спектрометра [69]. Результаты анализа отправляются сотруднику литейного отделения в АРМ «Шихтовщик» в виде табличных данных. Обычно время каждого отбора пробы составляет от 10 до 15 минут.

На этом этапе жидкий металл еще содержит около 15 – 25 % примесей, оказывающих негативное влияние на потребительские качества конечной продукции. В частности, к примесям относятся различные неметаллические включения, а также соединения щелочноземельных и тяжелых металлов. На основе полученных данных о химическом составе алюминия-сырца из привезенных литейных ковшей, предварительно подготавливается план шихтовки и осуществляется заливка алюминия-сырца из литейных ковшей в заливочный карман миксера спокойной струей, что занимает 4 – 5 минут. После этого осуществляется легирование алюминиевого



расплава в миксере необходимыми лигатурами.

Для обеспечения высокого качества готовой продукции используются покровно-рафинирующие флюсовые добавки, которые позволяют обеднять или очищать расплав от газовых включений и примесей. В общем случае, флюсами являются сухие порошковые смеси, которые добавляются в расплав миксера и состоят из галогенных соединений фторидов или хлоридов. Покровные флюсы служат для защиты расплава от окисления и являются необходимым компонентом при изготовлении алюминиевых сплавов заданной марки. Рафинирующие флюсы предназначены для коррекции химического состава расплава, а в их основе лежат хлориды щелочноземельных металлов [70]. Наиболее часто применяются такие солевые композиции, как  $NaCl-KCl$ ,  $KCl-MgCl_2$ ,  $NaF-AlF_3$ . Подобные многокомпонентные флюсы оказывают необходимое дегазирующее действие, а также способствуют удалению включений водорода из алюминиевого расплава путем образования комплекса компонентов  $(Al_2O_3)_x - (H_2)_y$ .

Все применяемые в промышленности шихтовые добавки определяют общие физические и типовые физико-химические характеристики сплавов, придают дополнительные свойства будущему металлу, но не изменяют исходные свойства сырья. В первую очередь осуществляется загрузка тугоплавких сплавов лигатур, а после вводятся легкоплавкие добавки, например  $Al-Sr$ ,  $Al-B$ . Для уменьшения угара легирующих добавок их притапливают в расплав. При этом для равномерного распределения компонентов алюминиевого расплава применяется либо механическое или МГД-перемешивание, что определяет движение расплава в одну или другую сторону. После окончания работы МГД-перемешивателя обязательно проверяется отсутствие нерастворенных кусков шихты, а также берется проба расплава и при необходимости осуществляется дошихтовка расплава [71, 72].

Для уменьшения безвозвратных потерь металла и очистки расплава от водорода и щелочноземельных металлов, например от кальция, натрия, стронция, лития используется покровно-рафинирующие флюсы марки ФПР-23 и специальные виды флюсов марки Promag Fi/Si, в том числе аналоги, обладающие необходимыми физико-химическими свойствами. После введения флюсов расплав обычно

отстаивается около 15 мин. Окончательным этапом производства алюминиевых сплавов является финишная очистка расплава от шлака и разливка жидкого алюминия в формы для складирования и транспортировки заказчикам [73, 74]. В период охлаждения разлитого металла происходит уменьшение объема слитка или объемная усадка. В результате, линейной усадкой считается процесс сокращения линейных размеров отлитого слитка алюминия в горизонтальном направлении в период затвердевания согласно соотношению:

$$\varepsilon_{\text{усадки}} = \alpha_{\text{коэф}} \frac{l_n - l_x}{l_n} \cdot 100 \%, \quad (1.20)$$

где  $l_n$  – исходный размер сформированной отливки, мм;

$l_x$  – размер отливки в заданный период времени в результате охлаждения, мм.

Таким образом, анализ технологии получения алюминиевых сплавов позволил рассмотреть важные особенности приготовления алюминиевого расплава в электрическом миксере сопротивления, определить принципиально значимые технологические закономерности, в том числе структурировать наиболее актуальные проблемы производства, которые возможно разрешить с использованием современных инструментов IT-технологий и средств математического моделирования.

### **1.3 Подходы к математическому моделированию процессов получения алюминиевых сплавов**

В настоящее время существует множество разработанных и реализованных в инструментальных системах математических моделей металлургических процессов [75, 76]. Что касается технологий получения алюминиевых сплавов, анализ литературных данных показал, что в настоящее время разработана математическая модель для одного из этапов производства алюминиевых сплавов [77], а именно для электролиза. Так, в таблице 1.7 представлены основные технологические параметры, характеризующие оптимальный процесс протекания электролиза алюминия [78].

Расчет выхода по току представляется, как отношение фактического

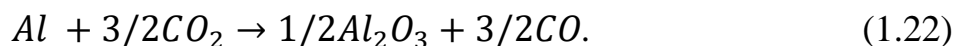
количества металла, полученного в результате электролиза к теоретически ожидаемому количеству металла за одну и ту же единицу времени:

$$\eta_m = \frac{P_{\phi}}{P_T} \cdot 100\%. \quad (1.21)$$

Таблица 1.7 – Технологические параметры процесса электролиза

Технологический параметр	Значение
Выход по току, $\eta T$	86 – 92 %
Рабочее напряжение, $U_{\text{э}}$	4,4 - 4,45 В
Сила тока, $I$	248,5 ± 5 кА
Расход электроэнергии, $W$	14800 кВт×ч на 1т
Межполюсное расстояние в середине продольной стороны на расстоянии 40 - 60 см от края анода, $MPP$	не менее 5,5 см
Температура электролита, $T_{\text{э}}$	955 - 965 °С
Криолитовое отношение, $KO$	2,6 - 2,85
Уровень электролита перед выливкой металла	19 - 23 см
Уровень металла	30 - 34 см
Расход глинозема	1900 - 1950 кг/т
Расход анодной массы	530 - 550 кг/т
Расход фторсолей	15 - 16 кг/т
Количество анодных эффектов	1 - 2 раз/сут
Длительность анодного эффекта	1,5 - 2 мин
Производительность ванны по алюминию, $P_{\text{э}}$	1,9 - 1,95 т/сут

Показатель  $\eta_m$  отражает общее качество всей работы электролизного цеха. Нормальное значение, отражающее эффективную работу электролизного цеха, составляет 86 – 92 %. С повышением температуры в среднем на 10 °С выход по току уменьшается на 2 – 5 % за счет обратной реакции процесса:



При увеличении фактического количества металла выход по току соответственно увеличивается и наоборот. При этом рабочее напряжение на правильно работающем электролизере составляет 4,1 – 4,7 В и формируется из напряжения реакции разложения глинозема 1,8 – 2,0 В, значения напряжения обратной ЭДС 1,4 – 1,6 В, а также значений падений напряжений на аноде и на катоде в огнеупорной

подине электролизера. Рабочее напряжение определяется выражением:

$$U_{\text{раб}} = U_{\text{разлож}} + \Delta U_{\text{анод}} + \Delta U_{\text{катод}} + \Delta U_{\text{электролит}}, \quad (1.23)$$

где  $U_{\text{разлож}}$  – напряжение разложения;

$\Delta U_{\text{анод}}$  – падение напряжения на анодном узле;

$\Delta U_{\text{катод}}$  – падение напряжения на катодном узле;

$\Delta U_{\text{электролит}}$  – падение напряжения в электролите.

Среднее значение напряжения вычисляется с помощью выражения:

$$U_{\text{сред}} = U_{\text{раб}} + \Delta U_{\text{ошин}} + \Delta U_{\text{ан.эф}}, \quad (1.24)$$

где  $U_{\text{раб}}$  – рабочее напряжение;

$\Delta U_{\text{ошин}}$  – падение напряжения в трансформаторе;

$\Delta U_{\text{ан.эф}}$  – падение напряжения при анодном эффекте.

Напряжение при анодном эффекте вычисляется по формуле:

$$\Delta U_{\text{ан.эф}} = \frac{nt(U_{\text{ан.эф}} - U_{\text{раб}})}{1440}, \quad (1.25)$$

где  $n$  – число анодных эффектов;

$t$  – продолжительность анодных эффектов;

$U_{\text{ан.эф}}$  – напряжение при анодном эффекте.

Общий расход электроэнергии при формировании 1 т алюминия называется удельным расходом электроэнергии  $W$  и может быть определен как результат отношения количества затраченной электроэнергии (кВт×ч) на сформированное при этом количество алюминия:

$$W_{\text{уд.расх}} = \frac{U_{\text{ср}}}{K_{\text{эл}} \cdot \eta_t} \cdot 10^3, \quad (1.26)$$

где  $K_{\text{эл}}$  – коэффициент, учитывающий дополнительные потери в электрических сетях комплексов сооружений (принимает значения в пределах 1,06 – 1,08).

Нормальная температура электролита при правильном режиме функционирования ванны составляет около 955 – 965 °С и определяется температурой

плавления самого электролита. Нарушение границ температуры обычно приводит к увеличению выхода по току из-за увеличенного растворения алюминия, выделившегося на основании катода в криолитоглиноземном расплаве.

Кроме этого, увеличение температуры отрицательно влияет на срок службы электролизеров, так как происходит прямой контакт электролита с футеровкой и элементами металлоконструкций электролизера. Неправильный режим эксплуатации электролизных установок оказывает непосредственное влияние на материально-трудовые затраты, так как при этом ухудшаются нормальные условия труда, повышается удельный расход электроэнергии, снижается качество алюминия-сырца, усиливается концентрация вредных примесей, а также появляется риск возникновения аварийных ситуаций или брака продукции.

При уменьшении необходимой температуры в электролите возникает эффект «холодной ванны», который увеличивает вероятность возникновения анодного эффекта, что соответственно ведет к необоснованному перерасходу электрической энергии и отвердеванию алюминиевого электролита. Отсюда следует, что температура расплава внутри электролизных установок должна быть всегда оптимальной. Установлено, что выполнение данных условий способствует повышению экономического эффекта до 10 – 15 руб. за 1 т при производстве алюминия-сырца.

Для придания особых свойств электролиту используются различные добавки, суммарное содержание которых не превышает 8 – 10 % от общего веса формируемого расплава алюминия на подине электролизера. Например, на заводе АО «РУСАЛ Саяногорск» используются «кислые» электролиты с криолитовым отношением 2,6 – 2,85. В случае, если криолитовое отношение изменяется, то имеющийся криолит раскисляется, например с помощью добавления соды  $Na_2CO_3$  или просто свежим криолитом  $Na_3AlF_6$ . При поддержании химического состава электролита в оптимальных пределах, можно существенно увеличить значение выхода по току и уменьшить омическое сопротивление электролита, что приведет к уменьшению выделения излишнего тепла и позволит поддерживать температуру электролита в оптимальном диапазоне значений.

Достаточный уровень формируемого электролита, например, в

электролизере С-255 составляет 19 – 23 см, в случае если уровень превышает норму, то электролит сливают в литейный ковш с использованием вакуумного принципа. И наоборот, при недостаточном уровне текущего электролита добавляется новый электролит из других электролизных ванн, который иногда называют обратным криолитом. Высокий уровень металла целесообразно поддерживать из соображений организации улучшенного теплоотвода от центра анода к периферии ванны, что способствует выравниванию температурного режима под анодом, однако увеличивает тепловые потери внутри электролизера.

Поддержание высокого слоя жидкого металла защищает подину электролизера от проникновения натрия, однако такое решение тоже имеет негативный оттенок, заключающийся в том, что при высоком уровне металла образуются осадочные настывы на подине и стенках электролизера. Настывание металла приводит к повышению напряжения и увеличивает трудозатраты на обслуживание электролизных установок в цехе промышленного предприятия.

В процессе электролиза происходит множество внутренних процессов, которые необходимо учитывать для осуществления эффективного режима работы электролизных установок, особенно важно отслеживать возникновение анодных эффектов и предпринимать соответствующие действия для их ликвидации.

С учетом вышеизложенного производительность электролизера  $P_{эл}$  определяется следующим выражением:

$$P_{эл} = K_{эл.эк} \cdot I \cdot t \cdot \eta_T \cdot 10^{-6}, \quad (1.27)$$

где  $K_{эл.эк}$  – электрохимический эквивалент алюминия, г/Ач;

$I$  – сила тока, А;

$t$  – длительность процесса электролиза, ч;

$\eta_T$  – выход по току, %.

Технологический процесс электролиза алюминия действительно является очень сложным и разнообразным, так как обладает большим количеством взаимосвязанных и непрерывно изменяющихся параметров. Поэтому для улучшения технико-экономических показателей производства алюминиевых сплавов требуется

разработка и использование компьютерных помощников, которые были бы способны осуществлять непрерывный мониторинг и автоматическое управление ключевыми параметрами не только процесса электролиза жидкого алюминия, но и других этапов производства, а также иметь необходимый набор функциональных возможностей, предназначенных для обучения и повышения уровня квалификации технологического персонала.

#### **1.4 Анализ существующих программно-инструментальных систем для моделирования технологических этапов алюминиевого производства**

В настоящее время на предприятиях одного из наиболее крупного представителя алюминиевого производства, а именно компании «РУСАЛ» существует адаптированный набор взаимосвязанных информационных программ, в частности АРМ «Весовщик», АРМ «Шихтовщик», АРМ «Литейщик», АРМ «Резчик», АРМ «Технический контроль», который помогает технологическому персоналу осуществлять приготовление алюминиевых сплавов. Однако, расчет параметров смешивания алюминия сырца, добавок лигатур и флюсов фактически осуществляется вручную на основе технологических инструкций, а также имеющихся знаний и трудового опыта шихтовщиков.

Действующий вариант системы, в частности автоматизированное рабочее место сотрудника АРМ «Шихтовщик» не обеспечивает непрерывный мониторинг и моделирование процесса формирования алюминиевого расплава в миксере, а также не предлагает оптимальный вариант шихтовки расплава с учетом исходного набора литейных ковшей с алюминием-сырцом и имеющихся ограничений.

Детальный анализ рынка программных продуктов показал, что одной из известных систем моделирования при подготовке алюминия-сырца является «Автоматизированная обучающая система основам управления электролиза алюминия», разработанная для АО «РУСАЛ Красноярск». Основное предназначение этой системы заключается в том, чтобы предоставить пользователю возможность ознакомиться с технологией электролиза алюминия-сырца [79].

Программа позволяет изучать степень влияния различных управляющих воздействий на технико-экономические показатели процесса электролитического получения алюминия-сырца. При реализации системы используются известные математические модели и физико-химические закономерности, характеризующие электролиз алюминия (рисунок 1.6) [80].

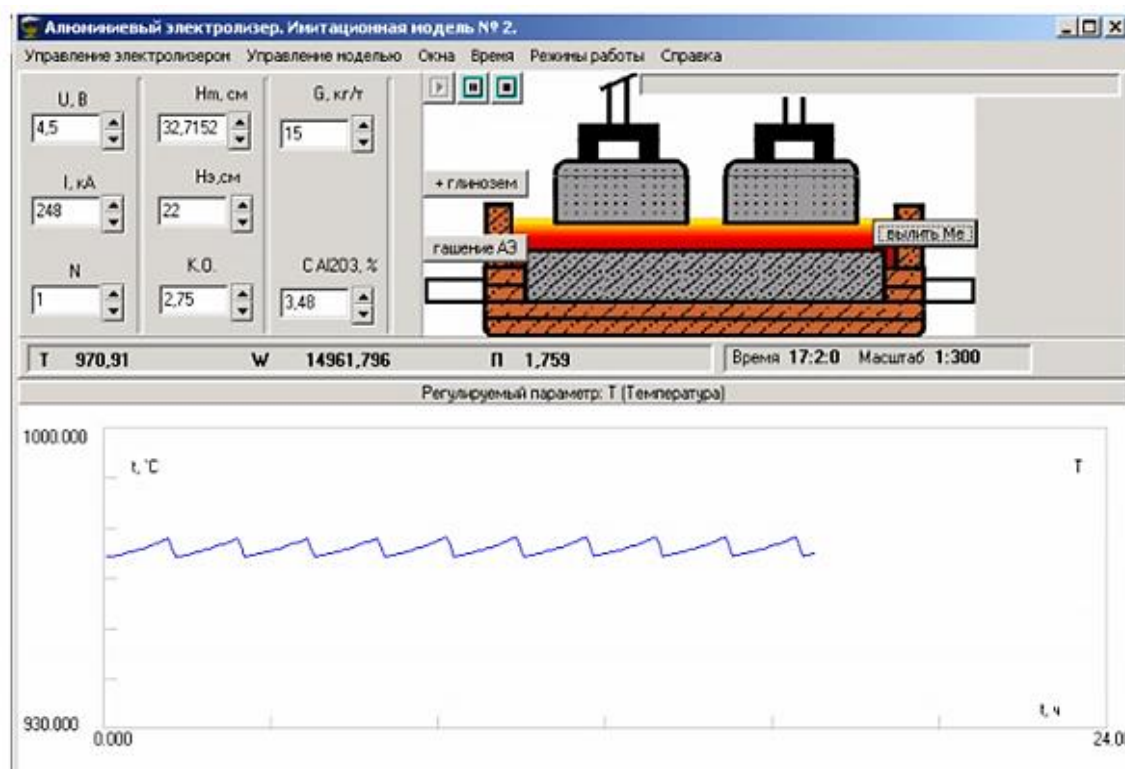


Рисунок 1.6 – Интерфейс «Автоматизированной обучающей системы основам управления электролиза алюминия»

Программный пакет «Автоматизированной обучающей системы основам управления электролиза алюминия» содержит:

- стандартный режим работы автоматизированной обучающей системы;
- режим индивидуальной настройки, определяющий альтернативный ход протекания процесса электролиза алюминия;
- блок отображения промежуточных результатов работы электролизера;
- специальный режим работы, фиксирующий изменения значений параметров процесса электролиза алюминия с использованием инфографики;
- редактор шаблонов и модуль настройки работы электролизеров;



- теоретическое описание процесса электролиза алюминия;
- техническое описание по использованию возможностей системы.

При первом запуске программы предусмотрен демонстрационный режим отображения мнемосхемы технологического процесса электролиза алюминия. Полоски ввода входных параметров позволяют регулировать процесс протекания электролиза. Компоненты ввода могут быть увеличены или уменьшены с помощью соответствующих инструментов. На схеме присутствуют кнопки, позволяющие регулировать управляющие воздействия на объект, а также осуществлять выполнение других технологических операций, а именно: гашение анодного эффекта, добавление глинозема в электролизер или алюминия-сырца в литейные ковши.

В верхней части интерфейса программы располагается меню, в котором отображаются все доступные функции и режимы работы модели. Табло состояния хранит данные о масштабе времени работы модели и содержит информацию о текущих выходных значениях параметров процесса электролиза. Возникающие в процессе моделирования предупреждения или события перехватываются встроенным обработчиком системы и сразу же передаются на экран пользователя в удобном виде для быстрого реагирования.

Графическое представление изменений выходных температурных параметров протекания процесса электролиза помогает пользователю принимать своевременные решения, направленные на определение необходимых регулирующих воздействий на модель объекта с учетом сложившейся траектории отклонений. Интерактивность графических данных позволяет демонстрировать промежуточные результаты работы модели с помощью установки временных меток.

С учетом вышеизложенного, представленная система является самодостаточным продуктом, так как имеет необходимый набор инструментов для независимого изучения процесса электролиза алюминия. Визуальные компоненты интерфейса и другие авторские приемы разработки, использованные в данной системе, являются хорошим примером для реализации аналогичных программных решений в области цветной металлургии [81].

Помимо представленной программной реализации, существует еще

несколько других специализированных программ, позволяющих моделировать процесс изготовления различных деталей на стадии разлива уже подготовленного алюминиевого расплава в электрическом миксере сопротивления.

К таким программам относятся: немецкие программы Magma [82] и WinCast [83], американские программы SolidCast [84] и ProCast [85], а также российская LVMFlow [86]. Такого рода программные комплексы непосредственно предназначены для моделирования и анализа процесса литья сформированного жидкого металла в необходимые детали заданной формы. Стоит отметить, что представленные программы отличаются используемыми численными методами, анализируемыми видами литья, объемом доступных баз данных с исходным набором материалов, требованиями к операционной системе и аппаратной поддержке. При этом интерфейс этих программ имеет схожий набор функциональных возможностей.

После выполнения основных этапов расчетов пользователю предоставляется возможность проанализировать полученные результаты и выполнить корректировку литья для более равномерного заполнения полостей формы и снижения расхода жидкого расплава. Этот процесс повторяется до тех пор, пока не будет получен наиболее корректный вариант отливки детали заданной формы с минимальным количеством дефектов за определенный промежуток времени.

Внутренняя структура данных программ моделирования состоит из универсальных модулей-решателей, которые соответствуют не определенным литейным технологиям, а общим физическим процессам в различных технологических сочетаниях. Представленные программы считаются наиболее развитыми видами ПО в данной отрасли, так как обладают некоторым набором конкурентных преимуществ, однако при этом так и не получили должного распространения на территории Российской Федерации и стран СНГ, что непосредственно связано с некоторыми очевидными недостатками, в частности:

- высокая стоимость приобретения лицензионных копий;
- зарубежная техническая поддержка со всеми вытекающими ограничениями;
- отсутствие или ограниченная русификация пользовательского интерфейса;
- вероятность возникновения ошибок моделирования в пределах 5 % из-за

несовершенства работы внутренних алгоритмов и неточности исходных данных;

- значительные временные и человеческие трудозатраты при внедрении подобных систем в структуру промышленных предприятий;
- каждому сотруднику литейного отделения необходимо проходить индивидуальный курс обучения с представителем компании-разработчика для освоения всех функциональных возможностей выбранного ПО;
- иностранные разработчики ПО не имеют возможности полностью воспроизводить локальные особенности другой страны и учитывать специфику работы других предприятий.

Отдельное внимание стоит уделить отечественной программе LVMFlow от команды разработчиков АО НПО «МКМ» г. Ижевск. Данная программа определено уступает зарубежным аналогам по своим функциональным возможностям, однако имеет определенные преимущества для более широкого использования с целью моделирования процессов литья в землю, в кокиль, в изложницу, а также литья под давлением с учетом технологических особенностей форм разливочной линии. Так, функционально-технические возможности LVMFlow позволяют учитывать применение противопопригарных покрытий, а также рассчитывать износ формы при ее многократном использовании.

К преимуществам отечественной программы стоит отнести:

- умеренная стоимость по сравнению с зарубежными аналогами;
- высокая степень соответствия моделирования и натурных экспериментов;
- русскоязычный пользовательский интерфейс программы;
- более понятный и лаконичный курс обучения пользователей системы;
- поддержка наиболее известных форматов файлов программ моделирования и разработки чертежей форм деталей;
- более высокое качество визуализации процесса моделирования литья;
- учет отечественных особенностей и устоявшейся специфики производств промышленных предприятий.

Однако, несмотря на представленные преимущества, LVMFlow также не является широко распространенным программным продуктом. Так, на сегодняшний

день после тщательнейшего тестирования, лицензионные копии программы LVMFlow были приобретены всего для нескольких организаций: АО «Оскольский завод металлургического машиностроения», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», ОАО «Коломенский завод», ОАО «Ливгидромаш», ЗАО «Механоремонтный комплекс» (г. Магнитогорск), ООО «Лебедянский машиностроительный завод», ОАО «Тяжпромарматура» (г. Алексин).

Стоит отметить, что в программную разработку подобных систем моделирования вложено много сил и денежных инвестиций, в связи с чем, средняя стоимость внедрения такого рода программных решений на реальные производственные объекты составляет более 100 тыс. долларов. Также функционал представленных программ предназначен для моделирования процесса литья с уже сформированным металлургическим расплавом и при этом их пользовательский интерфейс предназначен только для высококвалифицированных сотрудников, обладающих специфическими знаниями, как в IT-сфере, так и в области металлургии. Однозначно, функциональность представленных программных решений не приспособлена для начального обучения и получения первичных навыков при работе неопытного пользователя с элементами интерфейса, в том числе отсутствует интеллектуальная система сопровождения при взаимодействии пользователя с моделью объекта.

Таким образом, имеющиеся на IT-рынке программные продукты не дают возможности получать оптимальные результаты смешивания литейных ковшей за наименьшее количество технологических операций. Такие программные решения не могут быть полноценно адаптированы в структуру металлургических предприятий и не способны стать аналогом или дополнением для программного решения АРМ «Шихтовщик» компании РУСАЛ.

### **1.5 Постановка задачи исследования**

Как было отмечено ранее, формирование алюминиевого расплава осуществляется в электрическом миксере сопротивления литейного отделения при помощи метода последовательного приближения до заданного химического состава посредством смешивания алюминия-сырца из литейных ковшей с введением присадок

лигатур и флюсов. На сегодняшний день качество алюминиевого расплава в наибольшей степени зависит от человеческого фактора, в том числе от навыков и опыта шихтовщика расплава, который вручную управляет процессом, что зачастую приводит к избыточному количеству корректирующих воздействий и увеличивает время приготовления расплава в связи с наличием многозадачности и большого количества параметров металлургического процесса.

Действующее на предприятии АО «РУСАЛ Новокузнецк» автоматизированное рабочее место сотрудника АРМ «Шихтовщик» не обеспечивает непрерывный мониторинг процесса формирования алюминиевого расплава в миксере и не предлагает оптимальный вариант шихтовки расплава с учетом исходного набора литейных ковшей с алюминием-сырцом, а также присадок лигатур и флюсов.

Все это предопределяет необходимость совершенствования технологии производства алюминиевых сплавов. В связи с этим, актуальной задачей является разработка специального программного комплекса «Алюминщик», предназначенного для определения оптимальных технологических режимов процесса формирования алюминиевых сплавов в миксере в режиме интеллектуального помощника.

Таким образом, для реализации поставленной цели требуется:

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 computing technology; 09.03.03 Applied informatics.

## **2 Разработка математической модели и метода расчета оптимальных параметров процесса формирования алюминиевых сплавов в миксере**

### **2.1 Анализ технологии получения алюминиевых сплавов**

На рисунке 2.1 представлена функциональная схема литейного отделения одного из предприятий компании «РУСАЛ», отражающая основные технологические операции формирования алюминиевых сплавов. Основная сложность получения алюминиевых сплавов заключается в постоянно изменяющемся качестве первичного алюминия-сырца. Это происходит в связи с тем, что исходное сырье в виде сухого глинозема имеет непостоянный химический состав и различное количество вредных примесей. В связи с этим получение алюминиевых сплавов не имеет единого сценария приготовления и требует постепенного доведения формируемого алюминиевого расплава в миксере до заданного химического состава.

Для того, чтобы получить заданный химический состав алюминиевого расплава необходимо выполнить ряд технологических операций, количество которых определяется не только качеством исходного сырья, но и уровнем квалификации технологического персонала литейного отделения.

Ниже представлен набор наиболее часто используемых шихтовых материалов литейного отделения АО «РУСАЛ Новокузнецк» для производства литейных и деформируемых сплавов:

- низкосортный алюминий-сырец в жидком или твердом виде марки АВ;
- лигатура алюминий-титан  $AlTi_{2,5}$ ,  $AlTi_5$ ,  $AlTi_{10}$ ;
- лигатура алюминий-титан-бор  $Al-3Ti-1B$ ,  $Al-5Ti-1B$ ;
- лигатура титан-фтор  $Ti_{80}F_{20}$ ;
- лигатура магний Мг-90 первичный;
- лигатура марганец Мн-95 металлический;
- лигатура алюминий-марганец  $AlMn_{60}$ ,  $AlMn_{80}$ ;

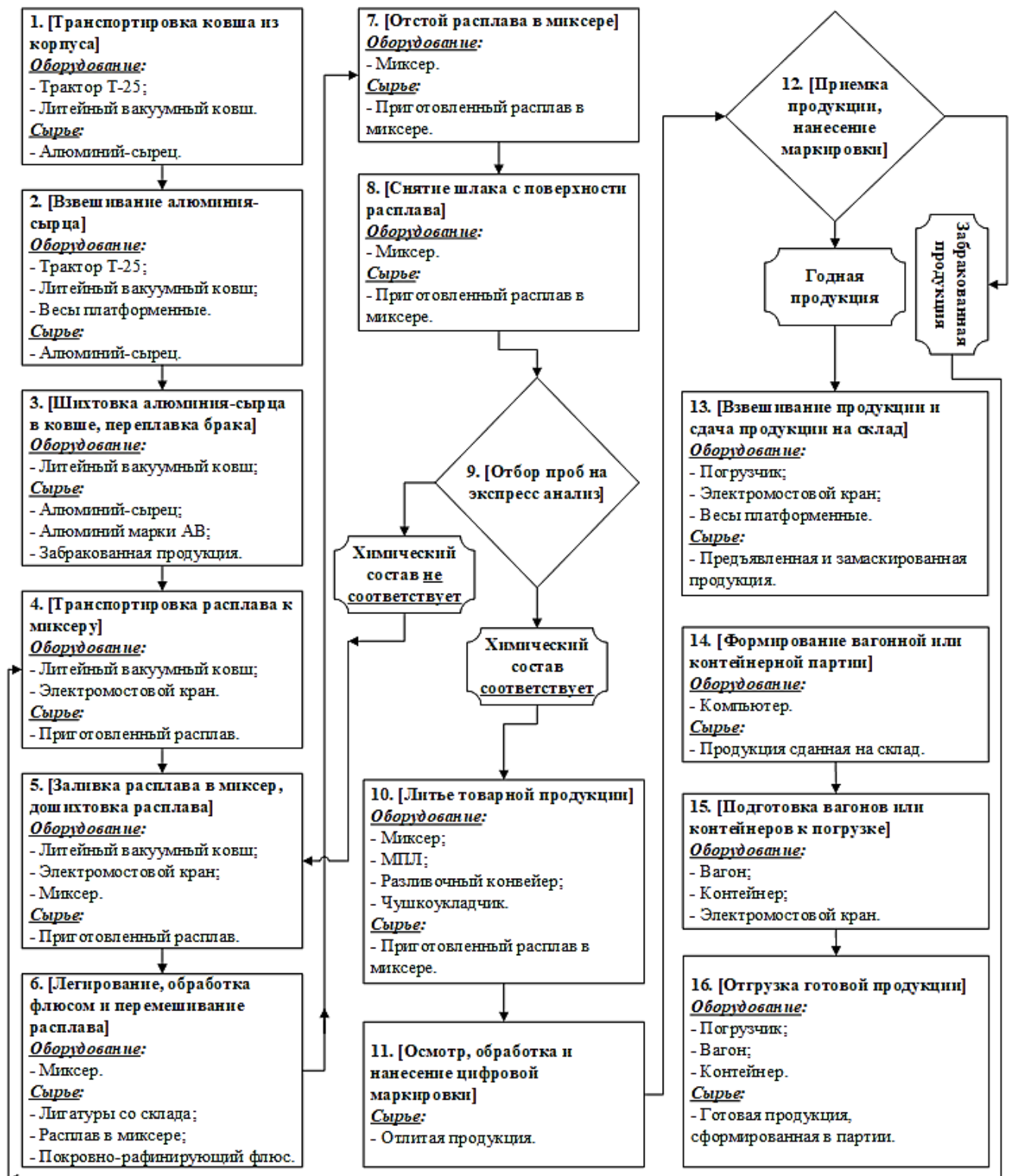


Рисунок 2.1 – Функциональная схема литейного отделения

- лом меди М00, М0, М1, М2, М3;
- лигатура никель Н-4 и выше;
- лигатуры алюминий-никель AlNi10, AlNi20;



- лигатура алюминий-стронций AlSr10;
- лигатура алюминий-бор AlB5;
- лигатура алюминий-ванадий AlV5;
- лигатура алюминий-цирконий AlZr2, AlZr5;
- лигатура меди CuF9, CuF10, CuF13;
- кристаллический кремний KP-00;
- производственные отходы (марки технического алюминия А5Е, А7, А7Е, АД, металлическая стружка или обрезь, шлак, различные виды брака);
- флюс ФПР-23 или аналог (норма-расход ~1 кг на 1 тонну расплава);
- флюс марки «Promag Fi/Si», «Super Grok» или аналог.

После завершения подготовки исходных материалов происходит формирование алюминиевого расплава с заданным химическим составом путем порционного смешивания алюминия-сырца в миксере с применением присадок лигатур и флюсов. Шихтовщик производит добавление алюминия-сырца из литейных ковшей в электрический миксер сопротивления до заполнения полезной емкости в нужных пропорциях на основании собственного трудового опыта.

Далее осуществляется ввод легирующих компонентов и отстой расплава для растворения легирующих материалов. Дозирование загружаемых шихтовых материалов осуществляется вручную с помощью напольных весов, что также вносит дополнительные неточности при приготовлении расплава.

На рисунке 2.2 представлен пример циклограммы процесса формирования алюминиевого сплава марки АЛ9М для электрического миксера емкостью 25 тонн. Среднее время приготовления сплава АЛ9М составляет 3 – 3,5 ч. При этом установлено, что количество корректировок химического состава расплава в наихудшем случае может происходить до 4 раз.

При приготовлении алюминиевого расплава сотрудник литейного отделения может использовать АРМ «Шихтовщик». Это автоматизированное рабочее место позволяет сотруднику произвести расчет содержания вредных примесей для выбранного набора литейных ковшей с учетом полученной информации о химическом составе алюминия-сырца из электролизного цеха.

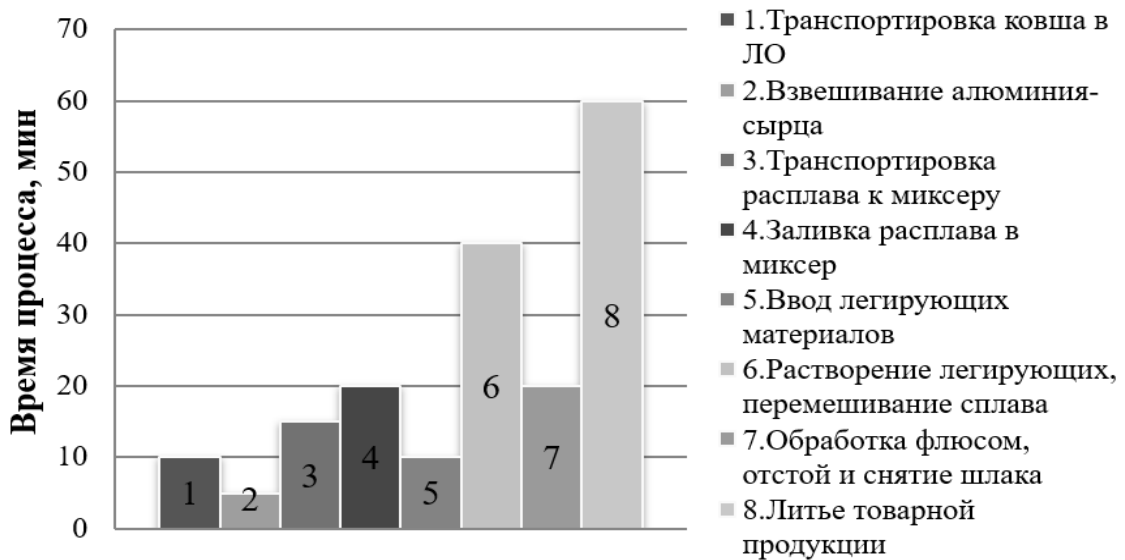


Рисунок 2.2 – Циклограмма процесса формирования сплава АЛ9М в миксере

Расчет массы алюминия-сырца в миксере из литейных ковшей в АРМ «Шихтовщик» осуществляется по формуле:

$$P = \frac{P_{\text{микс}} \cdot (B - A)}{(C - B)}, \quad (2.1)$$

где  $P$  – заданная масса металла в соответствии с заказом, кг;

$P_{\text{микс}}$  – масса расплава, имеющаяся в миксере, кг;

$A$  – содержание вредных примесей в миксере, %;

$B$  – заданное содержание примесей, %;

$C$  – содержание примесей в шихтовых материалах, %.

Процентное содержание примесей автоматически рассчитывается по формуле:

$$C = \frac{P_1 \cdot C_1 + P_2 \cdot C_2 + \dots + P_n \cdot C_n}{P_1 + P_2 + \dots + P_n}, \quad (2.2)$$

где  $C$  – среднее содержание примесей в расплаве, %;

$P_1, P_2, \dots, P_n$  – масса алюминия-сырца в литейных ковшах, кг;

$C_1, C_2, \dots, C_n$  – содержание вредных примесей в литейных ковшах, %.

Поэтому, качество готовой продукции и ее химический состав всецело определяются действиями технологического персонала. Получается, что результат шихтовки зависит не только от уровня квалификации шихтовщика, но и от его

способностей проводить необходимые численные расчеты значений параметров смешивания имеющихся масс алюминия-сырца и корректирующих компонентов. Вследствие этого, увеличивается время шихтовки расплава и уменьшается производительность литейного отделения.

## 2.2 Выделение объекта исследования

Объектом исследования является технологический процесс формирования алюминиевого расплава в миксере литейного отделения, который относится к сложным многопараметрическим объектам [87 – 93]. При выделении объекта исследования можно выделить следующие параметры: входных потоков, выходных потоков, технологические параметры и технико-экономические показатели (рисунок 2.3) [94].

При формировании алюминиевого расплава в миксере параметрами входного потока являются:  $K$  – количество литейных ковшей с алюминием сырцом из электролизного цеха;  $L$  – количество легирующих добавок;  $F$  – количество флюсовых добавок;  $m_k$  – масса расплава алюминия-сырца из  $k$ -го литейного ковша ( $k = 1 \div K$ ), кг;  $m_l$  – масса  $l$ -ой легирующей добавки ( $l = 1 \div L$ ), кг;  $m_f$  – масса  $f$ -ой флюсовой добавки для коррекции текущего химического состава расплава ( $f = 1 \div F$ ), кг;  $[R]_{ik}$  – исходный химический состав алюминия-сырца в  $k$ -ом литейном ковше, %;  $[R]_{il}$  – химический состав  $l$ -ой лигатуры, %;  $[R]_{if}$  – химический состав  $f$ -ого флюса, %;  $m_M^0$  – исходная масса расплава в миксере перед началом выполнения технологической операции формирования расплава, кг;  $m_k^0$  – исходная масса расплава алюминия-сырца в  $k$ -ом литейном ковше, кг;  $t_M^0$  – температура исходного расплава алюминия-сырца в миксере, °C;  $t_k$  – температура алюминия-сырца в  $k$ -ом литейном ковше, °C.

К параметрам выходного потока относятся:  $m_M$  – масса сформированного расплава в миксере с учетом легирующих и флюсовых добавок, кг;  $[R]_i$  – химический состав расплава в миксере согласно заданным требованиям установленного заказа, %;  $t_M$  – температура расплава в миксере, °C. К технологическим показателям и технико-экономическим показателям относятся:  $\tau_{общ}$  – общее время

формирования алюминиевого расплава в миксере, с;  $C_M$  – затраты на формирование алюминиевого расплава в миксере, руб;  $C_k$  – стоимость исходного алюминия-сырца в  $k$ -ом литейном ковше, руб/кг;  $C_l$  – стоимость  $l$ -ой лигатуры, руб/кг;  $C_f$  – стоимость  $f$ -ого флюса, руб/кг;  $C_{эл}$  – стоимость тарифа электроэнергии, руб/кВт×ч.

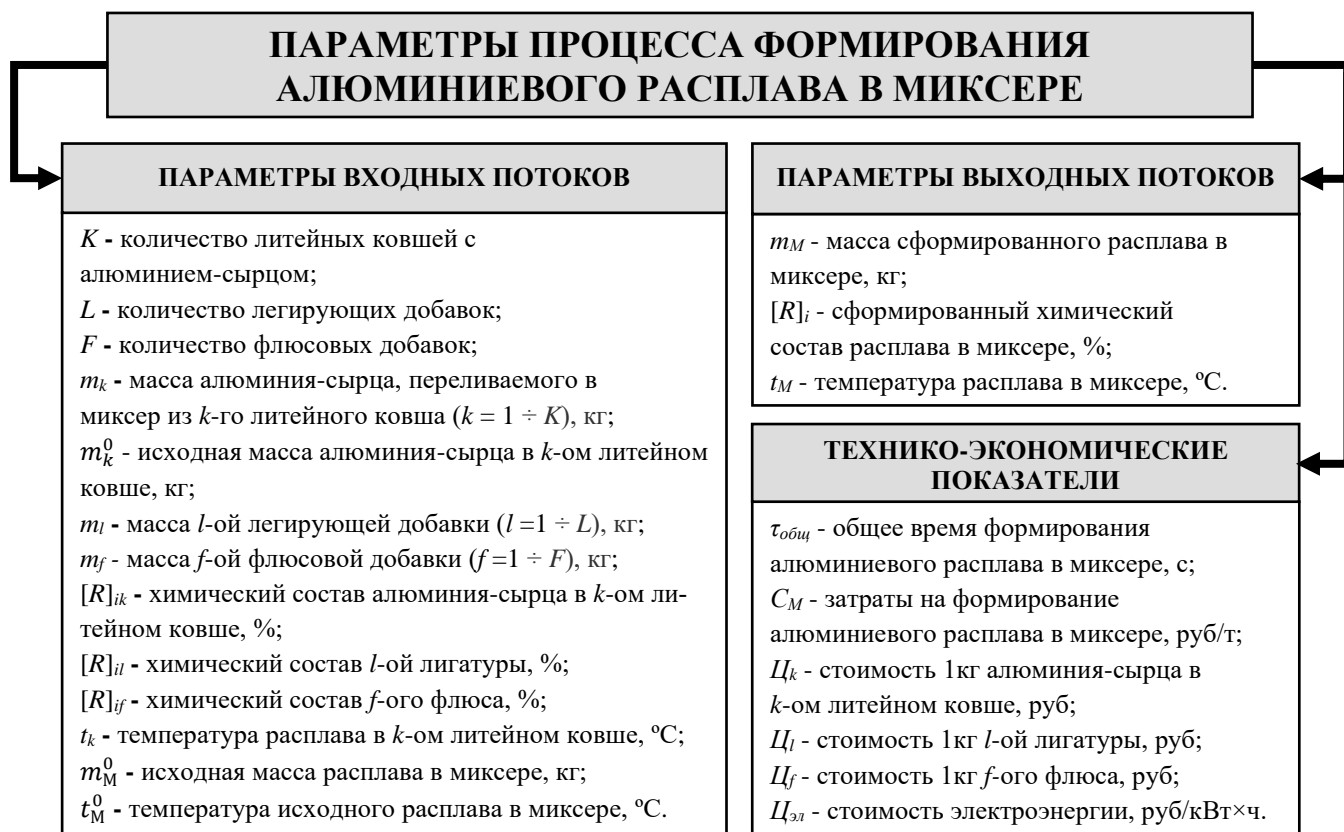


Рисунок 2.3 – Параметры технологического объекта

## 2.3 Разработка математической модели

Процесс получения алюминиевого расплава в миксере можно разделить на два последовательных этапа: формирование основы расплава путем смешивания алюминия-сырца из литейных ковшей и последующая корректировка расплава легирующими добавками и флюсами.

Первый этап процесса формирования алюминиевого расплава заключается в смешивании исходного алюминия-сырца из  $k$ -ых литейных ковшей и его дальнейшем перемешивании в миксере. Полученная масса расплава  $m_M$  в миксере определяется количеством перелитого алюминия-сырца из литейных ковшей:

$$m_M = m_M^0 + \sum_{k=1}^K m_k, \quad (2.3)$$

где  $K$  – количество литейных ковшей;

$m_M^0$  – исходная масса расплава в миксере перед началом технологической операции формирования расплава, кг;

$m_k$  – масса алюминия-сырца, поступающего из  $k$ -го литейного ковша, кг.

Масса  $i$ -го вещества в миксере рассчитывается с учетом массы и химического состава алюминия-сырца из литейных ковшей, а также угара элементов:

$$m_i = \left( \frac{m_M^0 [R]_i}{100} + \sum_{k=1}^K \frac{m_k [R]_{ik}}{100} \right) \cdot (1 - \eta_i), \quad (2.4)$$

где  $K$  – количество литейных ковшей;

$m_M^0$  – исходная масса расплава в миксере, кг;

$m_k$  – масса алюминия-сырца, поступающего из  $k$ -го литейного ковша, 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, %;

$\eta_i$  – коэффициент угара  $i$ -го элемента.

Скорости изменения масс химических веществ при формировании алюминиевого расплава в миксере можно представить в виде задачи Коши, определяемой системой обыкновенных дифференциальных уравнений относительно скоростей изменения масс расплавов алюминия-сырца из  $k$ -ых литейных ковшей и их начальными значениями:

$$\begin{cases} v_k = \frac{dm_k}{d\tau} = -\gamma m_k \\ v_M = \frac{dm_M}{d\tau} = \gamma(m_M^0 + m_k^0 - m_M), \\ m_k(0) = m_k^0 \\ m_M(0) = m_M^0 \end{cases} \quad (2.5)$$

где  $v_k$  – скорость расхода массы (истечения) расплава из литейного ковша, кг/с;

$v_M$  – скорость прироста массы расплава в миксере, кг/с;

$m_k$  – текущая масса расплава в  $k$ -ом литейном ковше, кг;

$m_k^0$  – начальная масса расплава в  $k$ -ом литейном ковше, кг;

$m_M$  – текущая масса расплава в миксере, кг;

$m_M^0$  – начальная масса расплава в миксере, кг;

$\tau$  – текущее время, с;

$\gamma$  – постоянная времени запаздывания инерционного процесса, 1/с.

При этом  $v_M = -v_k$ , то есть прирост массы формируемого расплава в миксере равен расходу массы алюминия-сырца в  $k$ -ом литейном ковше, что соответствует соотношению  $m_M + m_M^0 = m_k^0 - m_k$ . Прирост масс  $i$ -го вещества в миксере при переливании исходного алюминия-сырца из литейных ковшей с учетом начальных условий [95, 96] можно представить в следующем виде:

$$\frac{dm_M^X}{d\tau} = \gamma(m_M^{X_0} + m_k^{X_0} - m_M^X); m_M^X(0) = m_M^{X_0}. \quad (2.6)$$

Уменьшение массы  $i$ -го вещества из  $k$ -ых литейных ковшей при переливании расплава алюминия-сырца в миксер с учетом начальных условий можно представить уравнением:

$$\frac{dm_k^X}{d\tau} = -\gamma m_k^X; m_k^X(0) = m_k^{X_0}. \quad (2.7)$$

Для совокупности химических элементов  $X$  ( $Fe, Si, Ti, Al, Cu, Zn, Mn, Mg, Pb, Sn$ ) запись задачи Коши для миксера и литейных ковшей в векторной форме:

$$\begin{cases} X_M = (m_M^{Fe}, m_M^{Si}, m_M^{Ti}, m_M^{Al}, m_M^{Cu}, m_M^{Zn}, m_M^{Mn}, m_M^{Mg}, m_M^{Pb}, m_M^{Sn})^T \\ X_k = (m_k^{Fe}, m_k^{Si}, m_k^{Ti}, m_k^{Al}, m_k^{Cu}, m_k^{Zn}, m_k^{Mn}, m_k^{Mg}, m_k^{Pb}, m_k^{Sn})^T \end{cases} \quad (2.8)$$

Математическая модель динамики изменения концентрации химических элементов в миксере и литейных ковшах соответственно определяется системой обыкновенных дифференциальных уравнений следующего вида:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{dm_M^{Fe}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Fe_0} + m_k^{Fe_0} - m_M^{Fe}); m_M^{Fe}(0) = m_M^{Fe_0} \\
\frac{dm_M^{Si}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Si_0} + m_k^{Si_0} - m_M^{Si}); m_M^{Si}(0) = m_M^{Si_0} \\
\frac{dm_M^{Ti}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Ti_0} + m_k^{Ti_0} - m_M^{Ti}); m_M^{Ti}(0) = m_M^{Ti_0} \\
\frac{dm_M^{Al}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Al_0} + m_k^{Al_0} - m_M^{Al}); m_M^{Al}(0) = m_M^{Al_0} \\
\frac{dm_M^{Cu}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Cu_0} + m_k^{Cu_0} - m_M^{Cu}); m_M^{Cu}(0) = m_M^{Cu_0} \\
\frac{dm_M^{Zn}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Zn_0} + m_k^{Zn_0} - m_M^{Zn}); m_M^{Zn}(0) = m_M^{Zn_0} \\
\frac{dm_M^{Mn}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Mn_0} + m_k^{Mn_0} - m_M^{Mn}); m_M^{Mn}(0) = m_M^{Mn_0} \\
\frac{dm_M^{Mg}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Mg} + m_k^{Mg_0} - m_M^{Mg}); m_M^{Mg}(0) = m_M^{Mg_0} \\
\frac{dm_M^{Pb}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Pb} + m_k^{Pb} - m_M^{Pb}); m_M^{Pb}(0) = m_M^{Pb} \\
\frac{dm_M^{Sn}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Sn} + m_k^{Sn} - m_M^{Sn}); m_M^{Sn}(0) = m_M^{Sn}
\end{array} \right. , \quad (2.9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{dm_k^{Fe}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Fe}; m_k^{Fe}(0) = m_k^{Fe_0} \\
\frac{dm_k^{Si}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Si}; m_k^{Si}(0) = m_k^{Si_0} \\
\frac{dm_k^{Ti}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Ti}; m_k^{Ti}(0) = m_k^{Ti_0} \\
\frac{dm_k^{Al}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Al}; m_k^{Al}(0) = m_k^{Al_0} \\
\frac{dm_k^{Cu}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Cu}; m_k^{Cu}(0) = m_k^{Cu_0} \\
\frac{dm_k^{Zn}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Zn}; m_k^{Zn}(0) = m_k^{Zn_0} \\
\frac{dm_k^{Mn}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Mn}; m_k^{Mn}(0) = m_k^{Mn_0} \\
\frac{dm_k^{Mg}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Mg}; m_k^{Mg}(0) = m_k^{Mg_0} \\
\frac{dm_k^{Pb}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Pb}; m_k^{Pb}(0) = m_k^{Pb_0} \\
\frac{dm_k^{Sn}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Sn}; m_k^{Sn}(0) = m_k^{Sn_0}
\end{array} \right. . \quad (2.10)$$

В результате исходная задача Коши в векторной форме имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dX_k}{d\tau} = -\gamma X_k \\ \frac{dX_M}{d\tau} = \gamma(X_M^0 + X_k^0 - X_M), \\ X_k(0) = X_k^0 \\ X_M(0) = X_M^0 \end{cases} \quad (2.11)$$

где  $X_M$  – градиент изменения концентраций химических элементов в миксере;

$X_k$  – градиент изменения концентраций химических элементов в  $k$ -ом ковше.

Последующий этап корректировки расплава с использованием флюсов и лигатур можно представить в виде уравнения:

$$m_M = m_M^0 + \sum_{k=1}^K m_k + \sum_{l=1}^L m_l + \sum_{f=1}^F m_f, \quad (2.12)$$

где  $K$  – количество литейных ковшей;

$L$  – количество применяемых лигатур;

$F$  – количество применяемых флюсов;

$m_M^0$  – исходная масса расплава в миксере, кг;

$m_k$  – масса расплава, поступающего из  $k$ -го литейного ковша, кг;

$m_l$  – масса  $l$ -ой лигатуры, добавляемой в алюминиевый расплав, кг;

$m_f$  – масса  $f$ -ого флюса, добавляемого в алюминиевый расплав, кг.

Тогда масса  $i$ -го вещества в миксере будет определяться количеством алюминия-сырца из литейных ковшей и введенных в расплав лигатур и флюсов:

$$m_i = \left( \frac{m_M^0[R]_i}{100} + \sum_{k=1}^K \frac{m_k[R]_{ik}}{100} + \sum_{l=1}^L \frac{m_l[R]_{il}}{100} + \sum_{f=1}^F \frac{m_f[R]_{if}}{100} \right) \cdot (1 - \eta_i), \quad (2.13)$$

где  $K$  – количество литейных ковшей;

$L$  – количество применяемых лигатур;

$F$  – количество применяемых флюсов;

$m_M^0$  – исходная масса алюминиевого расплава в миксере, кг;



$m_k$  – масса жидкого алюминия-сырца, поступающего из  $k$ -го литейного ковша в миксер, кг;

$m_l$  – масса  $l$ -ой лигатуры, добавляемой в алюминиевый расплав в миксере, кг;

$m_f$  – масса  $f$ -ого флюса, добавляемого в алюминиевый расплав в миксере, кг;

$[R]_i$  – химический состав алюминиевого расплава в миксере, полученный с предыдущей 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, %;

$\eta_i$  – коэффициент угара  $i$ -го элемента.

Технологический процесс формирования алюминиевого расплава реализуется в заданном температурном режиме 900 – 1000 °С. Для расчета текущей температуры формируемого алюминиевого расплава в результате смешивания исходного алюминия-сырца с разной температурой используется следующее уравнение:

$$t_M = \frac{(m_M^0 t_M^0 + \sum_{k=1}^K m_k t_k) C_M}{m_M C_M} + \Delta t, \quad (2.14)$$

где  $C_M$  – 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 жидкого алюминия-сырца в  $k$ -ом литейном ковше, °С;

$\Delta t$  – приращение температуры в миксере за счет нагревательных элементов, °С.

Блок-схема математической модели процесса формирования алюминиевого расплава представлена на рисунке 2.4.

Процесс диффузии компонентов расплава в миксере при добавлении алюминия-сырца из литейного ковша представляет собой краевую задачу математической физики с соответствующими краевыми условиями. Концентрация произвольного химического элемента  $C$ , входящего в состав алюминиевого расплава, является функцией времени и пространственных координат  $C = C(\tau, x, y, z)$ .

$K, L, F, m_k^0, m_M^0, m_k, m_l, m_f, [R]_{ik}, [R]_{il}, [R]_{if}, t_k, t_M^0$

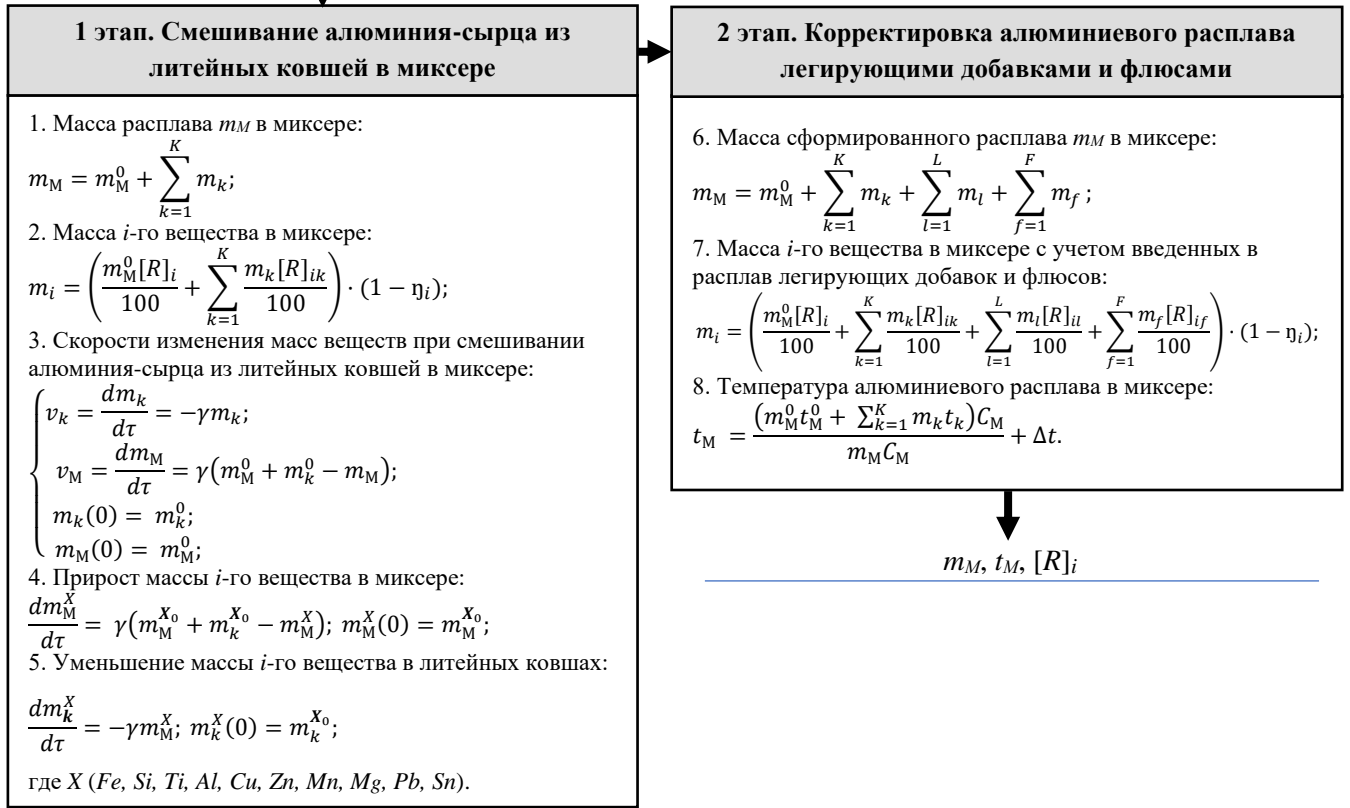


Рисунок 2.4 – Блок-схема математической модели процесса формирования алюминиевого расплава в миксере

Процесс диффузии рассматриваемого компонента можно описать уравнением диффузии, которое в дивергентной форме имеет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = \text{div} (D \cdot \text{grad} C), \quad (2.15)$$

где  $\text{grad} C = \left( \frac{\partial C}{\partial x}, \frac{\partial C}{\partial y}, \frac{\partial C}{\partial z} \right)^T$  – градиент скалярного поля концентрации  $C$  соответствующего компонента 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;

$$\text{div} \vec{U} = \frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z} - \text{дивергенция векторного поля } \vec{U} (\vec{U} = D \cdot \text{grad} C).$$

Уравнение диффузии (2.15) в координатной форме представлено следующим уравнением:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = \frac{\partial D}{\partial x} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial D}{\partial y} \cdot \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial D}{\partial z} \cdot \frac{\partial C}{\partial z} + D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right). \quad (2.16)$$

Краевая задача математической физики для вычисления значений концентраций компонентов расплава  $C(x, y, z)$  с начальным распределением концентрации  $C_0(x, y, z)$  имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial \tau} = \operatorname{div} (D \cdot \operatorname{grad} C) \\ C(0, x, y, z) = C_0(x, y, z) \\ (\operatorname{grad} C, \mu)|_{\partial G_M} = \varphi(x, y, z) \end{cases}, \quad (2.17)$$

где  $\varphi(x, y, z)$  – значение производной от  $C(x, y, z)$  на границе  $\partial G_M$  вдоль вектора нормали  $\mu$ ,  $G_M$  – геометрическая область расплава алюминия в миксере.

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

Граничное условие краевой задачи (2.17), записанное как скалярное произведение векторов  $\operatorname{grad} C$  и  $\mu$  в любой точке границы  $\partial G_M$ , позволяет учесть наклон участков границы исследуемой области миксера и в покоординатной форме записи имеет вид:

$$(\operatorname{grad} C, \mu)|_{\partial G_M} = \frac{\partial C}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial C}{\partial y} \cos \beta + \frac{\partial C}{\partial z} \cos \gamma = \varphi(x, y, z). \quad (2.18)$$

После формирования заданной массы алюминиевого расплава в миксере необходимо учесть распределение коэффициента диффузии компонентов расплава в диапазоне изменения значений при молекулярной и турбулентной диффузии под воздействием сил перемешивания различной степени интенсивности.

В месте заливки алюминия-сырца из литейных ковшей имеет место 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 центральном вертикальном сечении миксера место заливки алюминия-сырца можно приближенно отразить в виде отрезка прямой на определенном фрагменте верхней границы объема миксера.

Если бы местом заливки была точка, а не отрезок, то линиями равного уровня

значений коэффициента диффузии были бы фрагменты концентрических окружностей и значение коэффициента диффузии уменьшалось бы при переходе от окружности с меньшим радиусом к окружности с большим радиусом.

Но так как место заливки интерпретируется в виде отрезка прямой на верхней границе миксера с координатами концов отрезка  $(x_{k1}, y_k)$  и  $(x_{k2}, y_k)$ , то предлагается вместо концентрических окружностей, как линий равного уровня значений коэффициента диффузии, использовать кривые в виде концентрических эллипсов с растущими значениями их полуосей  $a$  и  $b$ .

Уравнение эллипсов имеет вид:

$$\frac{(x-x_k)^2}{a^2} + \frac{(y-y_k)^2}{b^2} = 1, \text{ где } x_k = \frac{x_{k1}+x_{k2}}{2}. \quad (2.19)$$

Расстояние от центра эллипса до фокусов определяется с помощью соотношения  $c = \sqrt{a^2 - b^2}$ , а координаты фокусов соответственно равны  $(x_{kc1}, y_k) = (x_k - c, y_k)$  и  $(x_{kc2}, y_k) = (x_k + c, y_k)$ .

По мере удаления от места заливки алюминия-сырца значение коэффициента диффузии приближенно описывается с помощью экспоненциального закона с отрицательным значением показателя, отражающим меру удаления. Так как эллипс характеризуется тем, что сумма расстояний в произвольной его точке до фокусов является константой, то в качестве меры удаленности эллипса от места заливки алюминия-сырца предлагается использовать именно эту величину.

Процесс диффузии складывается как процесс молекулярной и турбулентной диффузии, эффекты которых необходимо учитывать в общем коэффициенте диффузии  $D = D_m + D_m$ . Тогда общий коэффициент диффузии предлагается оценивать с помощью следующего соотношения:

$$D = D_m + \alpha e^{-\beta S}, \quad (2.20)$$

где  $D_m$  – коэффициент молекулярной диффузии;

$S$  – сумма расстояний точки эллипса с координатами  $(x, y)$  до фокусов эллипса  $(S = \sqrt{(x - x_{kc1})^2 + (y - y_k)^2} + \sqrt{(x - x_{kc2})^2 + (y - y_k)^2})$ ;

$\alpha, \beta$  – настроечные параметры, характеризующие процесс диффузии.

Для решения уравнения диффузии (2.15) использовался метод конечно-разностной аппроксимации дифференциальных уравнений [97 – 104].

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 (2.17) аппроксимируется с помощью неявной конечно-разностной схемы, что приводит к следующей задаче относительно значений сеточной функции  $C_{ijk}^n$ :

$$\begin{cases} \frac{C_{ijk}^{n+1} - C_{ijk}^n}{\Delta\tau} = \Lambda_{ijk}^{n+1} \\ C_{ijk}^n|_{n=0} = C_{0ijk} \\ \frac{3C_\Gamma - 4C_{\Gamma-1} + C_{\Gamma-2}}{2\Delta\mu} = \varphi_\Gamma \end{cases}, \quad (2.21)$$

где  $\frac{3C_\Gamma - 4C_{\Gamma-1} + C_{\Gamma-2}}{2\Delta\mu}$  – конечно-разностная трехточечная аппроксимация нормальной производной в любой точке границы  $\partial G_M$ ;

$\Delta\mu$  – шаг дискретизации пространства вдоль направления нормали к произвольной точке границы  $\partial G_M$ ;

$\Gamma, \Gamma-1, \Gamma-2$  – нумерация узлов конечно-разностной сетки в произвольной точке границы  $\partial G_M$ , 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;

$\varphi_\Gamma$  – значение заданной на границе функции  $\varphi(x, y, z)$  в произвольной точке границы  $\partial G_M$ , описывающей значение потока концентрации компонента расплава.

Для решения конечно-разностной задачи (2.21) необходимо сформировать соотношение  $C_{ijk}^{n+1} = \varphi(C_{ijk}^n)$  для вычисления сеточных значений  $C_{ijk}^{n+1}$  в  $(n+1)$ -ый момент времени на основе значений  $C_{ijk}^n$  в  $n$ -ый момент времени.

Соотношение  $C_{ijk}^{n+1} = \varphi(C_{ijk}^n)$  для вычисления сеточных значений  $C_{ijk}^{n+1}$  в  $(n+1)$ -ый момент времени на основе значений  $C_{ijk}^n$  в  $n$ -ый момент времени при использовании неявной конечно-разностной схемы имеет вид:

$$\begin{aligned} C_{ijk}^{n+1} = C_{ijk}^n + \Delta\tau & \left( \frac{(D_{i+1,j,k} - D_{i-1,j,k})(C_{i+1,j,k}^{n+1} - C_{i-1,j,k}^{n+1})}{4(\Delta x)^2} + \right. \\ & + \frac{(D_{i,j+1,k} - D_{i,j-1,k})(C_{i,j+1,k}^{n+1} - C_{i,j-1,k}^{n+1})}{4(\Delta y)^2} + \frac{(D_{i,j,k+1} - D_{i,j,k-1})(C_{i,j,k+1}^{n+1} - C_{i,j,k-1}^{n+1})}{4(\Delta z)^2} + \\ & \left. + D \left( \frac{C_{i-1,j,k}^{n+1} - 2C_{ijk}^{n+1} + C_{i+1,j,k}^{n+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{C_{i,j-1,k}^{n+1} - 2C_{ijk}^{n+1} + C_{i,j+1,k}^{n+1}}{(\Delta y)^2} + \frac{C_{i,j,k-1}^{n+1} - 2C_{ijk}^{n+1} + C_{i,j,k+1}^{n+1}}{(\Delta z)^2} \right) \right). \end{aligned} \quad (2.22)$$

Тогда система линейных алгебраических уравнений относительно искомых значений  $C_{ijk}^{n+1}$  имеет вид:

$$F(C_{ijk}^{n+1}) = 0. \quad (2.23)$$

В результате преобразований получается:

$$\begin{aligned} F(C_{ijk}^{n+1}) = C_{ijk}^{n+1} - C_{ijk}^n - \Delta\tau & \left( \frac{(D_{i+1,j,k} - D_{i-1,j,k})(C_{i+1,j,k}^{n+1} - C_{i-1,j,k}^{n+1})}{4(\Delta x)^2} + \right. \\ & + \frac{(D_{i,j+1,k} - D_{i,j-1,k})(C_{i,j+1,k}^{n+1} - C_{i,j-1,k}^{n+1})}{4(\Delta y)^2} + \frac{(D_{i,j,k+1} - D_{i,j,k-1})(C_{i,j,k+1}^{n+1} - C_{i,j,k-1}^{n+1})}{4(\Delta z)^2} + \\ & \left. + D \left( \frac{C_{i-1,j,k}^{n+1} - 2C_{ijk}^{n+1} + C_{i+1,j,k}^{n+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{C_{i,j-1,k}^{n+1} - 2C_{ijk}^{n+1} + C_{i,j+1,k}^{n+1}}{(\Delta y)^2} + \frac{C_{i,j,k-1}^{n+1} - 2C_{ijk}^{n+1} + C_{i,j,k+1}^{n+1}}{(\Delta z)^2} \right) \right). \end{aligned} \quad (2.24)$$

Полученная система уравнений решается итерационным методом на ЭВМ с помощью следующего соотношения:

$$C_{ijk}^{n+1(s+1)} = C_{ijk}^{n+1(s)} + \lambda F(C_{ijk}^{n+1(s)}), \quad (2.25)$$

где  $\lambda$  – параметр итерационного метода, значение которого связано как со скоростью, так и с возможностью сходимости итерационного процесса,  $|\lambda| < 1$ .

Значение параметра  $\lambda$  выбиралось достаточно малым по модулю, в частности  $|\lambda| \ll 1$ , с целью обеспечения сходимости итераций с дальнейшим его увеличением для ускорения сходимости итерационного процесса. При этом в качестве начальных значений в итерационном процессе выбираются значения сеточной функции, вычисленные на предыдущем  $n$ -ом шаге по времени  $C_{ijk}^{n+1(0)} = C_{ijk}^n$ .

При подстановке (2.24) в (2.25) получается следующая последовательность итерационных вычислений:

$$\begin{aligned}
 C_{ijk}^{n+1(s+1)} = & C_{ijk}^{n+1(s)} + \lambda(C_{ijk}^{n+1(s)} - C_{ijk}^n - \Delta\tau(\frac{(D_{i+1,j,k}-D_{i-1,j,k})(C_{i+1,j,k}^{n+1(s)}-C_{i-1,j,k}^{n+1(s)})}{4(\Delta x)^2} + \\
 & + \frac{(D_{i,j+1,k}-D_{i,j-1,k})(C_{i,j+1,k}^{n+1(s)}-C_{i,j-1,k}^{n+1(s)})}{4(\Delta y)^2} + \frac{(D_{i,j,k+1}-D_{i,j,k-1})(C_{i,j,k+1}^{n+1(s)}-C_{i,j,k-1}^{n+1(s)})}{4(\Delta z)^2} + \\
 & + D(\frac{C_{i-1,j,k}^{n+1(s)} - 2C_{ijk}^{n+1(s)} + C_{i+1,j,k}^{n+1(s)}}{(\Delta x)^2} + \frac{C_{i,j-1,k}^{n+1(s)} - 2C_{ijk}^{n+1(s)} + C_{i,j+1,k}^{n+1(s)}}{(\Delta y)^2} + \\
 & + \frac{C_{i,j,k-1}^{n+1(s)} - 2C_{ijk}^{n+1(s)} + C_{i,j,k+1}^{n+1(s)}}{(\Delta z)^2})).
 \end{aligned} \quad (2.26)$$

Итерационный процесс завершается при выполнении условия:

$$\sum_{ijk} |C_{ijk}^{n+1(s+1)} - C_{ijk}^{n+1(s)}| \leq \varepsilon, \quad (2.27)$$

где  $\varepsilon$  – заданная точность вычислений.

При выполнении условия (2.27) в качестве значений  $C_{ijk}^{n+1}$  используются значения, достигнутые на последней итерации, то есть  $C_{ijk}^{n+1} = C_{ijk}^{n+1(s+1)}$ .

Таким образом, реализовано математическое описание процесса смешивания компонентов расплава на основе решения краевой задачи математической физики для уравнения диффузии с учетом распределения коэффициента диффузии по полезному объему миксера.

## 2.4 Постановка и решение задачи оптимизации

Разработанная математическая модель предназначена для определения количества использованного алюминия-сырца из литейных ковшей с учетом введенных лигатур и флюсов, обеспечивающих формирование алюминиевого расплава заданной массы, химического состава и температуры.

Для решения данной задачи также была поставлена и решена задача оптимизации, которая заключается в определении оптимального массового расхода алюминия-сырца из литейных ковшей, а также соответствующих корректирующих

добавок с целью получения необходимого количества алюминиевого расплава в миксере с заданными физико-химическими свойствами [105 – 109].

Постановка задачи оптимизации заключается в минимизации материальных затрат на формирование алюминиевого расплава в миксере с соблюдением действующих технологических ограничений, а также с учетом выполнения условий материального и теплового балансов [110, 111]. Целевая функция представляет собой суммарные затраты на получение единицы продукции, руб/т:

$$C = \frac{(\sum_{k=1}^K m_k \Pi_k + \sum_{l=1}^L m_l \Pi_l + \sum_{f=1}^F m_f \Pi_f + \Pi_{эл})}{m_M} \rightarrow \min. \quad (2.28)$$

Решение задачи оптимизации заключается в определении минимума целевой функции при соблюдении следующих ограничений:

а) масса формируемого алюминиевого расплава в миксере должна не превышать полезную емкость миксера:

$$m_{min} \leq m_M \leq m_{max}, \quad (2.29)$$

б) масса алюминия-сырца, переливаемая в миксер из  $k$ -ого литейного ковша, должна не превышать исходную массу алюминия-сырца в  $k$ -ом литейном ковше:

$$0 \leq m_k \leq m_k^0, \quad (2.30)$$

в) массы лигатур и флюсов должны не превышать массы имеющихся в наличии корректирующих материалов:

$$\begin{aligned} m_{l\ min} &\leq m_l \leq m_{l\ max}, \\ m_{f\ min} &\leq m_f \leq m_{f\ max}, \end{aligned} \quad (2.31)$$

г) формируемый химический состав алюминиевого расплава должен соответствовать заданному химическому составу установленной марки сплава:

$$[R]_{i\ min} \leq [R]_i \leq [R]_{i\ max}, \quad (2.32)$$

д) температура формируемого расплава должна соответствовать заданному



диапазону значений согласно требованиям технологической инструкции:

$$t_{min} \leq t_M \leq t_{max}. \quad (2.33)$$

Стоит отметить, что при такой постановке задачи применение формальных методов оптимизации не всегда приводит к однозначному получению решения поставленной расчетно-технологической задачи. Данный факт непосредственно объясняется действующими особенностями технологического процесса формирования алюминиевого расплава.

Для этого рассмотрим несколько случаев, определяющих возможные варианты решения поставленной задачи. К первому случаю относится ситуация, когда имеется возможность найти полное решение, то есть, из текущего набора литейных ковшей можно сразу сформировать требуемую массу расплава в миксере в соответствии с заданным химическим составом установленной марки алюминиевого сплава. Ко второму случаю относится ситуация, когда можно получить лишь неполное решение, то есть, из текущего набора литейных ковшей можно сформировать заданный химический состав алюминиевого расплава в соответствии с установленной маркой алюминиевого сплава, но только меньшей массы.

Это происходит из-за того, что набор литейных ковшей с алюминием-сырцом, поступивших из электролизного цеха, содержит разную массу и химический состав исходного алюминия-сырца, что не всегда обеспечивает достижение заданной массы, химического состава и температуры формируемого алюминиевого расплава в миксере. Однако, через некоторый промежуток времени неполное решение возможно свести к полному за счет изменения начальных условий поставленной технологической задачи. Это связано с тем, что технологический процесс формирования алюминиевых сплавов является непрерывным, то есть спустя некоторое время будет сформирован набор новых литейных ковшей с алюминием-сырцом иного химического состава. Благодаря этому, имеется возможность скорректировать текущее неполное решение с учетом необходимого критерия (по массе или по химическому составу формируемого расплава).

Вместе с тем, присадки лигатур и флюсов могут не дать полноценного

результата. Следовательно, в ходе выполнения технологического процесса сотрудникам литейного отделения приходится принимать решение о преждевременной готовности расплава в миксере, даже если не достигнут заданный химический состав или количество сформированного расплава оказалось меньше необходимого. Как уже сказано, с течением времени в литейное отделение могут поступать новые литейные ковши с другой массой, температурой и химическим составом алюминия-сырца, то есть в таком случае, меняются начальные условия, и возникает необходимость реализации дополнительных расчетов с использованием разработанной математической модели процесса.

Получается, что процесс формирования алюминиевого расплава в миксере – это сложный технологический процесс с постоянно изменяющимися начальными условиями, которые сильно влияют на получение конечного результата. С учетом вышеизложенного разработан соответствующий алгоритм решения поставленной задачи, структурная блок-схема которого приведена на рисунке 2.5.

Работа алгоритма начинается с ввода исходных данных для расчета, к которым относится: 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.

Далее формируется целевая функция затрат на единицу продукции, а также система ограничений на емкость миксера и литейных ковшей, на химический состав, массу и температуру готового продукта. При этом задаются входные параметры метода – начальные значения расходов шихтовых материалов и точность расчета.

Затем осуществляется поиск оптимального решения поставленной задачи для получения наилучшего варианта компоновки расплавов алюминия-сырца из литейных ковшей. Если решение получено, производится расчет оптимальных расходов лигатур и флюсов, и делается вывод, что алюминиевый расплав сформирован в полном объеме и все ограничения соблюдены.

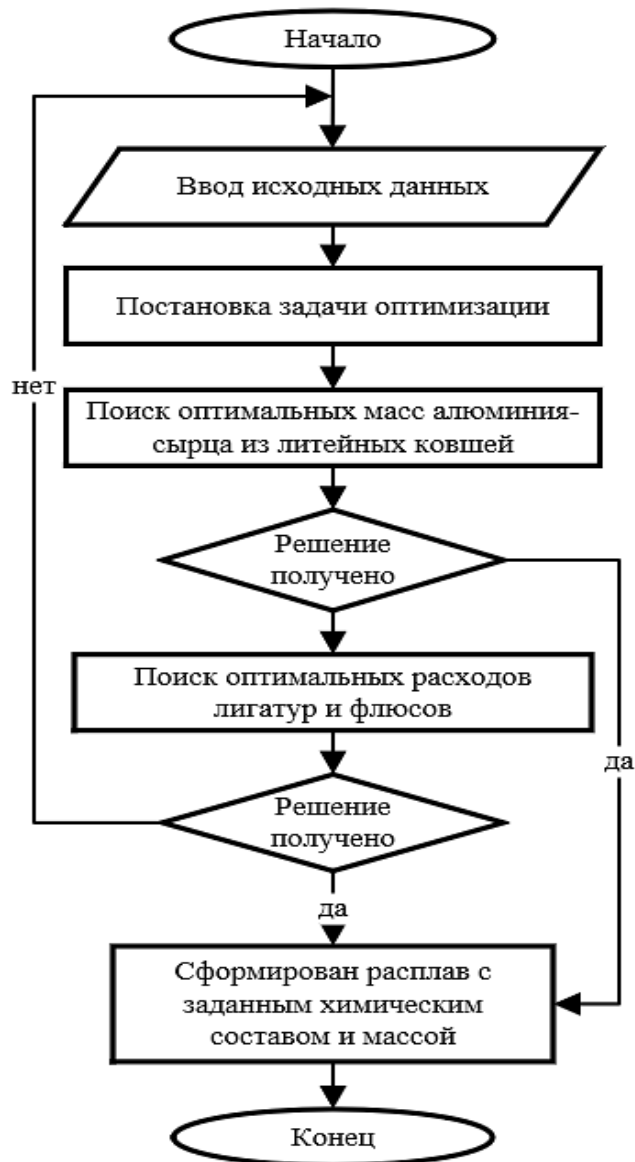


Рисунок 2.5 – Блок-схема алгоритма решения задачи оптимизации

В случае если расплав заданной массы и химического состава невозможно получить, то происходит корректировка начальных условий с учетом вновь поступивших литейных ковшей, либо принимается решение о том, что расплав сформирован с учетом неполного выполнения ограничений.

Для реализации алгоритма расчета параметров смешивания компонентов расплава адаптирован метод динамического программирования. Основное предназначение динамического программирования заключается в разбиении главной вычислительной задачи на ряд более простых подзадач. После нахождения решения соответствующих подзадач результаты объединяются в одно общее решение,

которое является наилучшим и оптимальным с учетом текущих исходных данных. [112]. При этом в рамках метода динамического программирования для каждой подзадачи предлагается использовать метод линейного программирования – симплекс-метод, алгоритм которого представлен ниже на рисунке 2.6.

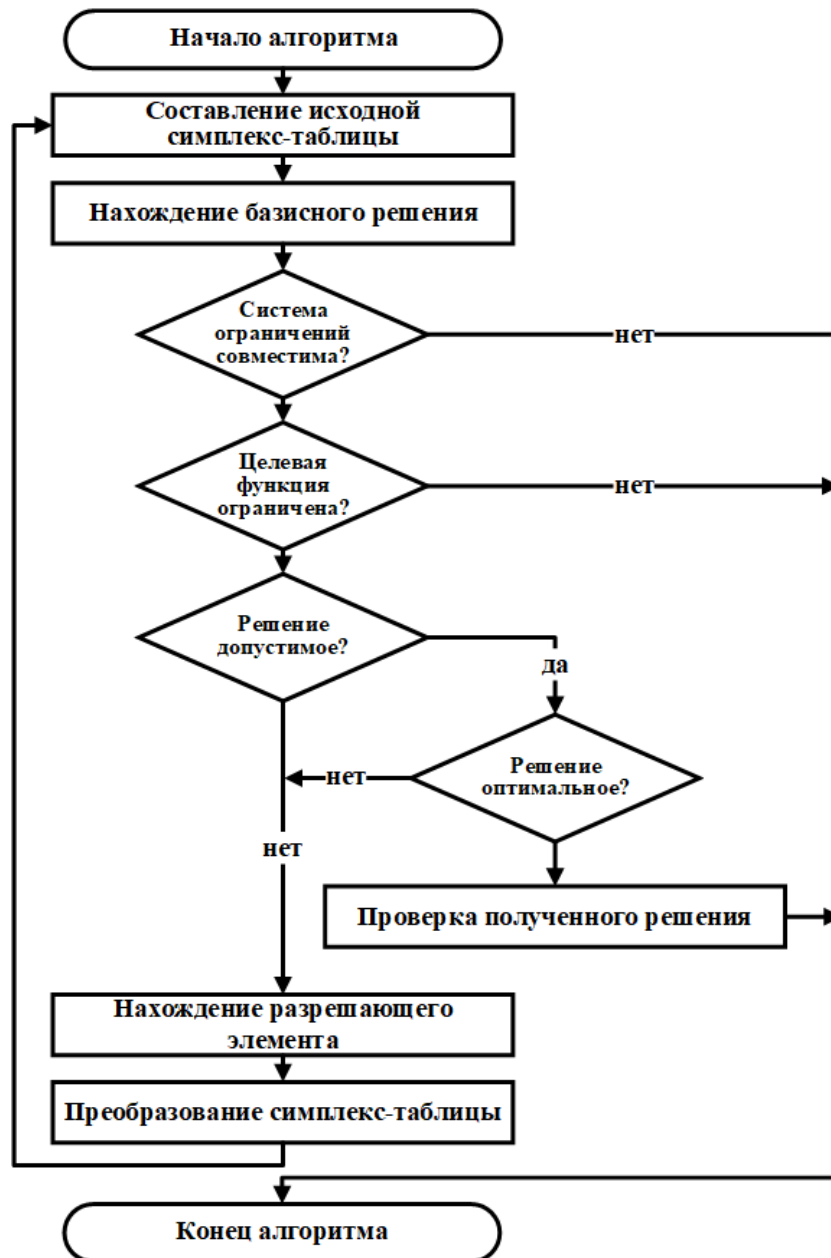


Рисунок 2.6 – Алгоритм работы симплекс-метода линейного программирования

Таким образом, при формировании расплава решается 3 вида подзадач, в частности определяется оптимальный вариант смешивания исходного алюминия-сырца из литейных ковшей в миксере, а также вычисляется минимально необходимое количество присадок лигатур и флюсов, обеспечивающее наиболее близкое

соответствие формируемого химического состава расплава заданным значениям требуемой марки сплава.

С учетом того, что на первом этапе определяется наилучший вариант смешивания алюминия-сырца из литейных ковшей, имеется возможность снизить количество корректировок расплава с использованием лигатур и флюсов [113 – 118].

Постановка задачи линейного программирования в стандартной форме с  $m$  ограничениями и  $n$  переменными заключается в минимизации функции вида  $f(X) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$  при ограничениях произвольной строки  $\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j = b_i$ :

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &= b_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &= b_2, \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &= b_m, \end{aligned} \quad (2.34)$$

с учетом того, что  $x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0$ .

Так, постановку задачи можно привести к каноническому виду и записать в матричной форме: минимизировать  $f(C, X) = C^T X$  при ограничениях  $AX = b, X \geq 0$ , где  $A$  – матрица коэффициентов;

$X$  – вектор переменных;

$C$  – вектор оценок задачи;

$B$  – вектор ресурсов.

Каноническую форму получают путем известных в математике преобразований. Например, неравенство вида  $\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \leq b_i$ , можно заменить равенством, вводя

неотрицательную дополнительную переменную  $x_{j+1}$ , так что  $\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j + x_{j+1} = b_i$ .

В основе симплекс метода лежит возможность представления точек многогранного множества через экстремальные точки (вершины) и экстремальные направления (границы). Метод представляет собой систематическую процедуру решения, которая состоит в выборе движения от одной экстремальной точки  $\bar{X}$  допустимой области к другой с наилучшими значениями целевой функции с помощью ведущего преобразования. Процесс длится до тех пор, пока не будет найдена

оптимальная экстремальная точка  $X^*$ , либо экспериментальное направление  $S^*$  для которого  $C^T S^* < 0$ .

При этом стоит отметить, что главной особенностью использования метода линейного программирования является тот факт, что данный метод включен в алгоритм расчета оптимальных технологических режимов процесса получения алюминиевого расплава в миксере с учетом неопределенности и постоянно изменяющихся во времени начальных условий.

## 2.5 Выводы к главе 2

1. Выделен объект исследования, определены параметры входных-выходных потоков и выбраны технико-экономические показатели.

2. Разработана математическая модель технологического процесса формирования алюминиевого расплава в миксере, позволяющая рассчитывать параметры смешивания алюминия-сырца из литейных ковшей в миксере с учетом присадок лигатур и флюсов. Математическая модель включает в себя уравнения диффузии, материального и теплового балансов, динамические уравнения скоростей изменения масс и химического состава расплава при смешивании алюминия-сырца из литейных ковшей в миксере, что позволяет определить необходимое количество алюминия-сырца из литейных ковшей с учетом расходов лигатур и флюсов, для формирования расплава с заданной массой, химическим составом и температурой.

3. Разработан численный метод решения уравнения диффузии, отличающийся учетом распределения коэффициента диффузии компонентов формируемого расплава по объему миксера в диапазоне изменения значений при молекулярной и турбулентной диффузии под воздействием сил перемешивания различной степени интенсивности, что позволяет наиболее точно оценить время усреднения концентраций компонентов алюминиевого расплава в миксере.

4. Поставлена и решена задача оптимизации, заключающаяся в минимизации затрат на получение необходимого количества алюминиевого расплава в миксере с заданным химическим составом и температурой при ограничениях на параметры

входных-выходных потоков и технологические параметры.

5. В связи с тем, что решение оптимизационной задачи невозможно получить формальными методами условной оптимизации из-за постоянно меняющихся начальных условий, для поиска решения предложен метод динамического программирования с использованием симплекс-метода линейного программирования.

6. Разработан алгоритм решения задачи оптимизации расходов алюминия-сырца из литейных ковшей, а также лигатур и флюсов для получения алюминиевого расплава с заданной массой, химическим составом и температурой.

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

#### **3.1 Принципы разработки функциональных возможностей системы «Алюминщик»**

Для эффективной разработки программного комплекса «Алюминщик» и реализации его функциональных возможностей выполнены следующие подготовительные этапы:

- разработана математическая модель технологического объекта;
- разработан метод расчета оптимальных значений параметров смешивания алюминия-сырца из литейных ковшей в электрическом миксере сопротивления с учетом присадок лигатур и флюсов;
- сформирован набор исходных технологических данных процесса формирования алюминиевых сплавов с учетом действующих особенностей производства компании АО «РУСАЛ Новокузнецк»;
- выбран современный язык объектно-ориентированного программирования С#, что обеспечивает возможность внедрения программного продукта в информационную среду промышленных предприятий;
- описана структура и способы информационного взаимодействия основополагающих классов технологических объектов программного комплекса;
- спроектированы диалоговые окна пользовательского интерфейса с использованием визуальных компонентов среды разработки;
- спроектирован информационный блок, содержащий сведения об основных этапах производства алюминиевых сплавов для самостоятельного изучения;
- разработан блок информационной поддержки пользователя, позволяющий отображать системные сообщения и информацию о протекании металлургического процесса во времени;



- разработан алгоритм оценки действий пользователя при работе с моделью объекта с использованием всплывающих подсказок и рекомендаций.

К наиболее важным функционально-техническим возможностям относятся:

- ввод данных о температуре, полезной емкости, исходном химическом составе расплава в миксере, а также аналогичных параметров, характеризующих алюминий-сырец в литейных ковшах с возможностью проверки исходных значений на их допустимость и корректность;
- доступ к структурированной информационной базе знаний, которая содержит сведения об основных этапах производства алюминия;
- 2-D визуализация технологического процесса приготовления алюминиевого расплава для наглядного управления его составляющими операциями (заливка алюминия-сырца, удаление осадка, подогрев расплава, разливка слитков);
- использование легирующих компонентов и флюсов для корректировки химического состава алюминиевого расплава в электрическом миксере сопротивления;
- отбор пробы химического состава формируемого расплава в миксере;
- имитация и настройка параметров продувки алюминиевого расплава в миксере с использованием инертных газов;
- поиск оптимального решения исходной расчетно-технологической задачи на любом этапе шихтовки с учетом имеющихся промежуточных результатов;
- интеллектуальный голосовой помощник, обеспечивающий пользователя необходимыми рекомендациями при возникновении трудностей;
- запись всех произведенных пользователем управляющих воздействий в отдельный файл для дальнейшего анализа и обработки данных администратором программного комплекса «Алюминщик».

Структуру программы «Алюминщик» можно упрощенно представить в виде блоков (рисунок 3.1), позволяющих в интерактивном режиме вводить исходные данные по расходам, температуре, химическому составу материалов и технологическим параметрам процесса, рассчитывать материальный и тепловой балансы, оптимальные параметры смешивания металла в миксере [119 – 121]. Также в зависимости от выбранной роли пользователя открываются индивидуальные настройки.

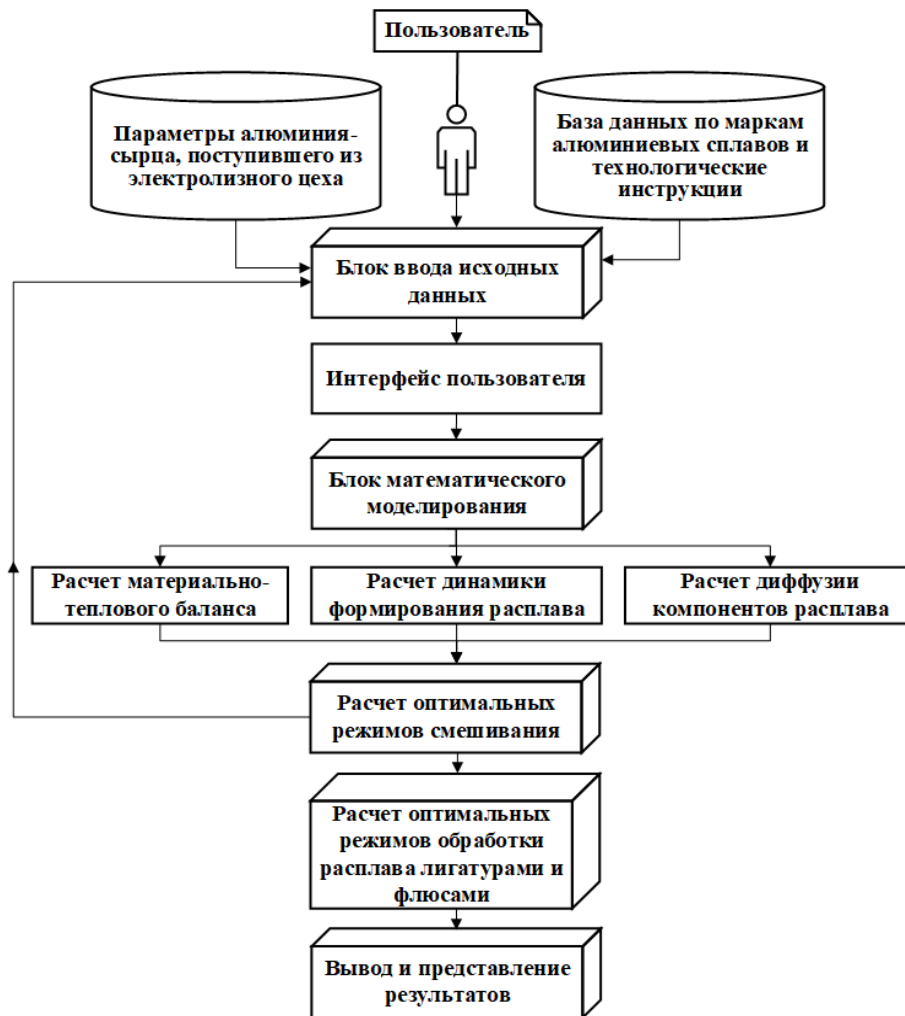


Рисунок 3.1 – Схема взаимодействия основных компонентов программы «Алюминщик»

С учетом представленных функционально-технических возможностей программный продукт может осуществлять моделирование и оптимизацию технологических режимов процесса формирования алюминиевых сплавов с заданным химическим составом и температурой в соответствии с различным набором исходных данных и действующих ограничений.

### 3.2 Реализация программного комплекса «Алюминщик»

Реализация программного комплекса «Алюминщик» осуществлена на языке объектно-ориентированного программирования высокого уровня C# с использованием современной среды разработки Microsoft Visual Studio в редакции Community

[122, 123]. Высокоуровневый язык программирования C# повышает стабильность и безопасность конечного программного продукта за счет применения скомпилированного набора функций, позволяющих осуществлять автоматическое управление внутренними ресурсами исполняемого кода. Такое решение положительно влияет на скорость разработки, снижая количество неявных ошибок программирования и отладки [124 – 127].

В работе проведен подбор специальных компонентов разработки для организации хранения, ввода и вывода информации в программном комплексе «Алюминщик». Для редактирования и просмотра данных программы применены диалоговые окна. При этом обеспечивается контроль и анализ редактируемых данных, чтобы исключить выполнение недопустимых пользовательских действий. Работа с системой сопровождается различными всплывающими сообщениями, описывающими причины некорректных действий пользователя [128 – 131].

Принцип программной реализации заключается в описании основных классов объектов. Каждый класс характеризует объект технологического процесса в установленном виде. Экземпляры классов хранят первичную информацию об объектах и производят корректирующую обработку данных, передаваемых в конструктор класса. Важным требованием при реализации решения является беспрепятственное взаимодействие классов программы между собой и другими структурами данных [132 – 134].

В разработанном программном комплексе «Алюминщик» используются три основных класса: Form (Форма), Mixer (Миксер) и Bucket (Ковш), которые являются основополагающими структурными единицами [135 – 139] и непосредственно взаимодействуют между собой (рисунок 3.2).

Класс Form является системным и обеспечивает отрисовку основных визуальных компонентов пользовательского интерфейса. Также класс Form обеспечивает хранение множества полей и методов, обеспечивающих работоспособность всей программы с момента ее запуска.

Класс Form представлен следующим набором полей, которые определяют:

- системные методы и сообщения;

- информацию о времени работы пользователя;
- время завершения очередной технологической операции;
- итоговую стоимость всех технологических операций;
- процент выполнения текущего заказа;
- промежуточные данные вычислительных действий;
- набор заданных химических элементов для визуализации и анализа;
- генерацию технологических помех;
- журнал истории последовательных этапов шихтовки расплава в миксере;
- информацию о взятых пробах из расплава в миксере;
- взаимодействие классов и обмен данными между диалоговыми окнами.

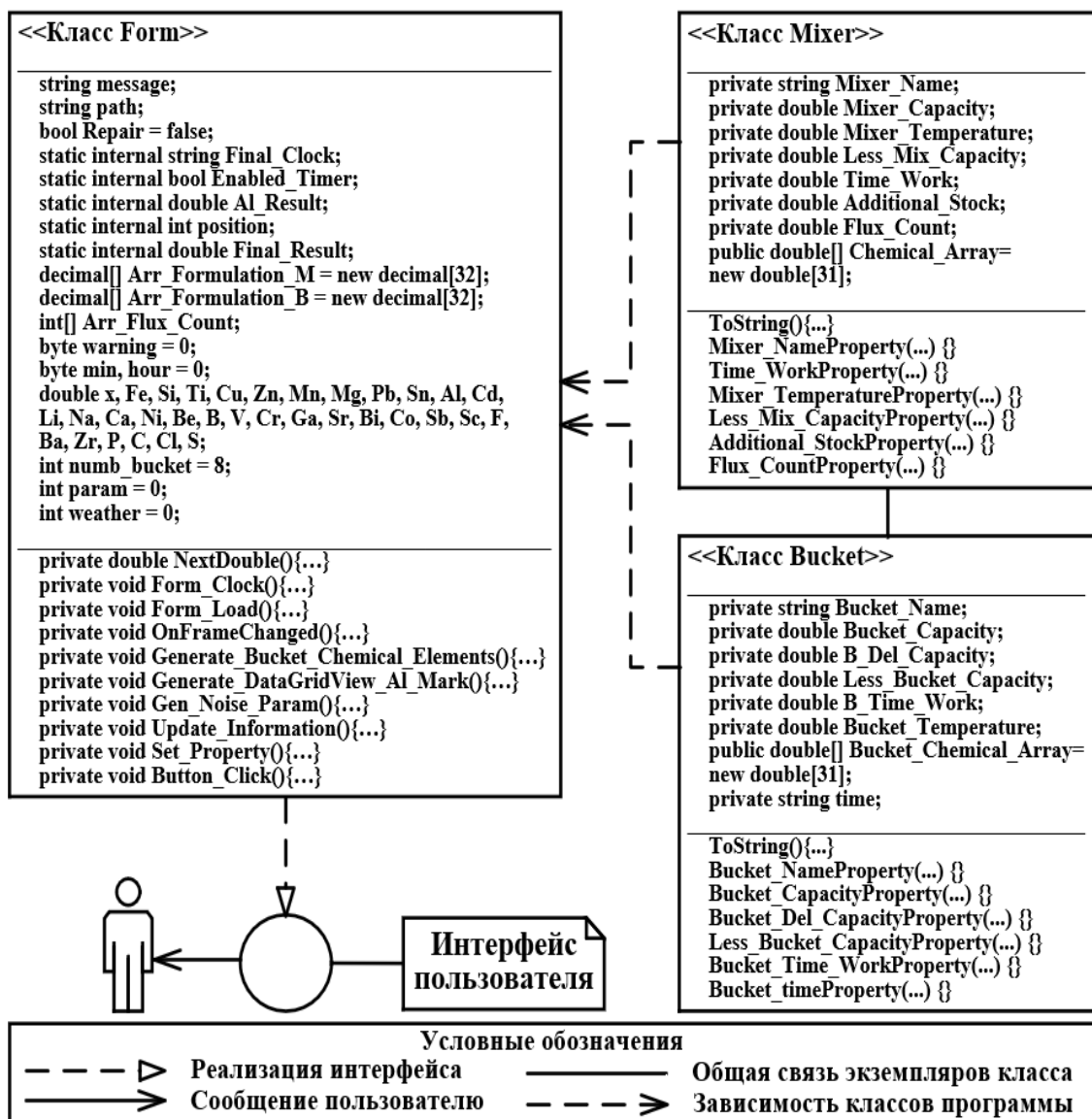


Рисунок 3.2 – Диаграмма основных классов системы «Алюминщик»

Также класс `Form` обеспечивает взаимосвязь всех информационных потоков в программе и определяет интерфейс диалоговых окон, располагая множеством скрытых системных функций и правил.

Класс `Mixer` служит для хранения и обработки данных о технических характеристиках миксера и содержит детальное описание следующего набора полей (Приложение А):

- идентификационное наименование миксера;
- настраиваемый объем полезной емкости миксера;
- отметка о статусе использования;
- температура в миксере;
- объем осадка на стенках миксера;
- масса добавляемых шихтовых материалов в расплав миксера;
- масса добавляемых флюсовых порошков в расплав миксера;
- набор данных о химическом составе расплава в миксере.

Класс `Bucket` предназначен для хранения и обработки данных о доступных литейных ковшах и содержит описание следующего набора полей (Приложение Б):

- идентификационное наименование литейного ковша;
- текущий объем полезной емкости литейного ковша;
- расчетный объем переливаемой массы расплава из литейного ковша;
- объем осадка на стенках выбранного литейного ковша;
- отметка о статусе использования литейного ковша;
- температура алюминия-сырца в литейном ковше;
- набор данных о химическом составе алюминия-сырца в литейном ковше.

Классы `Bucket` и `Mixer` помимо основных полей имеют строго типизированные списки `Bucket_K` и `Mixer_M`, которые хранят экземпляры сгенерированных параметров уникальных литейных ковшей и миксера соответственно.

Для получения текущих и присвоения вновь рассчитанных данных в классах `Mixer` и `Bucket` реализованы такие средства языка, как свойства полей класса, позволяющие осуществлять проверку передаваемых параметров [140 – 142].

Классы *Mixer* и *Bucket* имеют заранее описанный конструктор без параметров, который предназначен для проверки и инициализации полей класса значениями по умолчанию. Стоит отметить, что применение строго типизированных списков позволяет использовать множество методов обработки элементов списка, встроенных в исполняемую среду разработки. Например, в строго типизированном списке можно осуществлять поиск и сортировку элементов, а также обращаться к выбранному элементу коллекции по известному индексу.

Также при разработке программного комплекса «Алюминщик» были использованы стандартные компоненты и средства разработки программной среды Microsoft Visual Studio (рисунок 3.3) [143 – 147].

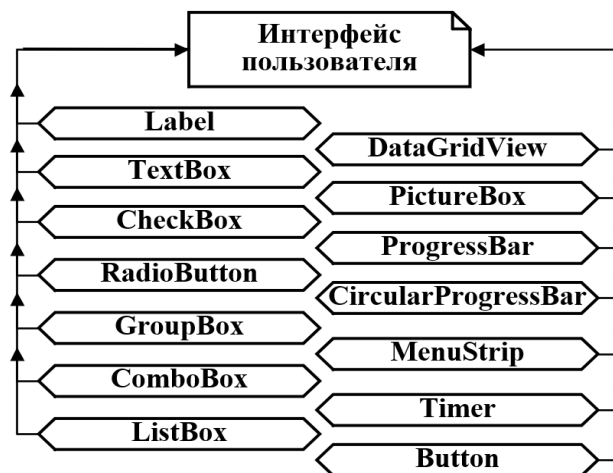


Рисунок 3.3 – Схема использованных компонентов в Microsoft Visual Studio

Компонент *DataGridView* позволяет хранить первоначальные или модифицированные исходные данные программы в табличном виде с возможностью редактирования. Компонент предназначен для отображения информации о заданной марке алюминия, химическом составе расплава в миксере и литейных ковшах, в том числе, служит для вывода дополнительных сведений о шихтовых добавках в виде лигатур и флюсов. Сетчатая структура компонента *DataGridView* позволяет улучшить восприятие информации благодаря настройке полезных свойств ячеек в режиме редактирования табличных данных.

Компонент *MenuStrip* используется для организации основного меню управления возможностями программы. Меню управления содержит сгруппированный

по смысловой нагрузке набор функций, который позволяет производить настройку параметров работы программы и взаимодействовать с проводником Windows.

Компоненты типа Button представлены в виде кнопок и предназначены для активизации различных событий программы. Кнопки позволяют осуществлять события удаления, изменения, просмотра данных, а также обеспечивают запуск заранее описанных процедур или функций (методов).

Компонент TextBox необходим для визуализации ввода или вывода информации на интерфейс пользователя. Компоненты типа TextBox выполняют роль контейнеров данных и определяют отображение результатов вычислений, а также предназначены для отслеживания корректного ввода исходных данных.

Компонент Label требуется для установки поясняющего текста к различным компонентам интерфейса пользователя.

Компонент ComboBox исполняет роль выпадающего списка с уже заполненными данными для удобной организации выбора необходимого параметра. В программном комплексе «Алюминщик» компонент ComboBox содержит сформированный список марок алюминиевых сплавов для выплавки.

Компоненты выбора CheckBox и RadioButton организуют индикацию выделенного параметра с последующей деактивацией остальных логических отметок.

Компонент Timer позволяет осуществлять управление данными программы во взаимосвязи со временем. Таймер воспроизводит технологические операции с учетом шкалы времени.

Визуальный компонент ProgressBar используется в целях идентификации прогресса выполнения различных действий, связанных с обработкой информации. В системе «Алюминщик» компонент ProgressBar идентифицирует прогресс выполнения анимационных сцен.

Компонент ListBox реализует возможность структурированного хранения информации в виде списка. При работе с интерфейсом системы список пополняется различными сообщениями, которые необходимо учитывать.

Визуальный компонент CircularProgressBar используется для отображения круговой диаграммы, содержащей актуальные параметры, описывающие

количественные значения газовых включений в расплаве миксера.

Компоненты PictureBox и GroupBox предназначены для организации хранения различных типов изображений и их граничного оформления.

Таким образом, на основании рассмотренных компонентов, имеющих в среде разработки Microsoft Visual Studio, создан функциональный интерфейс программного комплекса «Алюминщик» (Приложения Е, Ж, И, К).

### 3.3 Описание функциональных возможностей системы «Алюминщик»

На рисунке 3.4 представлен пользовательский интерфейс программного комплекса (системы) «Алюминщик» после запуска исполняемого файла в формате \*.exe. После выбора необходимого режима доступа к системе происходит запуск настроечного окна пользовательского интерфейса, которое позволяет осуществить настройку исходных параметров технологической задачи по формированию алюминиевого сплава требуемой марки из портфеля заказов.

**Настройки пользовательского интерфейса**

Действия: ☐ Пассивный режим работы анимации миксера [X] Режим: Обучение [Администратор]

**[Общие настройки]:**

- Ограничение времени работы: → Отключено
- Скорость анимации: → Нормально
- Емкость миксера (Max): → 30 тонн
- Емкость ковшей (Max): → 5 тонн
- Помехи: → Каждые 5 сек
- Объем заказа: → 20 тонн
- Стоимость 1 кг сырья AL (руб.): → 50
- Стоимость технологической операции (руб.): → 1000

**[Дополнительные настройки]:**

- Интеллектуальный помощник → Активирован
- Инертный газ для продувки: → Азот (N)
- Затраты электроэнергии: → Учитывать
- Σ Мощность электронагревателей миксера, кВт: → 350,0
- Стоимость (руб) кВт·ч: → 50,0

**[Условные обозначения]:**

+ Добавить строку | - Удалить последнюю строку | ! Генерация данных | x Удалить все имеющиеся строки | ! Проверка данных

**[Исходные Данные]:** Σ (0) строки = 0 (0) % По умолчанию | Настраиваемый режим

Объект:	T(°C)	Доступно(кг):	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd	Li
Миксер:	708.7	9194	0.382	5.787	0.012	87.821	3.253	0.811	0.039	1.459	0.041	0.09	0	0.012
Ковш № 1	680.6	4099	0.143	2.831	0.128	89.385	3.838	0.066	0.023	2.244	0.079	0.075	0	0.009
Ковш № 2	731.7	4000	0.841	4.433	0.099	86.35	2.959	1.159	0.068	1.839	0.238	0.056	0	0.014
Ковш № 3	689.5	4000	0.069	0.811	0.198	89.782	2.499	2.257	0.051	2.445	0.161	0.1	0	0.021
Ковш № 4	735.9	1941	0.081	7.464	0.076	84.373	2.438	2.51	0.087	0.38	0.031	0.104	0	0.001
Ковш № 5	728.2	2684	0.706	7.063	0.153	86.8	1.906	0.398	0.004	1.519	0.082	0.127	0	0.016
Ковш № 6	723.4	4305	0.881	5.874	0.06	88.071	0.53	2.383	0.037	1.259	0.192	0.021	0	0
Ковш № 7	686.1	3498	0.797	4.624	0.053	87.066	2.668	1.763	0.087	0.425	0.268	0.02	0	0.023
Ковш № 8	699.5	3962	0.476	4.712	0.05	90.543	1.063	0.649	0.068	0.649	0.001	0.176	0	0.01

**[Список Лигатур]:** Σ (1) строки = 0 (0) % По умолчанию | Настраиваемый режим

Лигатура:	Цена(руб/кг):	Доступно(кг):	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd
ЛВ3	8500	1000	0.3	0.3	0	96.04	0	0	0	0	0.04	0.04	0
ЛВ4	240	1000	0.3	0.3	0	95.04	0	0	0	0	0.04	0.04	0
ЛВ5	250	1000	0.3	0.3	0	94.04	0	0	0	0	0.04	0.04	0

**[Список Флюсов]:** Σ (1) строки = 0 (0) % По умолчанию | Настраиваемый режим

Флюс:	Норма(%):	Цена(руб/кг):	Доступно(кг):	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb
№1	0.8	50	100	0	-100	0	0	0	0	0	0	0
№2	1	45	200	0	0	0	0	0	0	0	-100	0
№3	1.5	40	300	0	-50	0	0	-50	0	0	0	0

**[Марки Алюминия]:** Σ (1) строки = 0 (0) % По умолчанию | Настраиваемый режим

Марка Al:	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd	Li	Na	Ca	Ni
A0	0.5	0.4	0.03	99	0.02	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A35	0.03	0.4	0.02	99.35	0.05	0.05	0.05	0.05	0	0	0	0	0	0	0
A5	0.15	0.25	0.03	99.5	0.02	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**[Информация о команде или участнике]:**

Пользователь: №1

\*Обязательно для заполнения!

Статус: данные загружены.

← Вернуться назад Принять и проверить →

Рисунок 3.4 – Настройка исходных параметров технологической задачи



Представленное окно позволяет редактировать исходный химический состав расплава в миксере и алюминия-сырца в литейных ковшах, определять набор шихтовых добавок, формировать требуемые марки алюминиевых сплавов для пользователя системы. Ввод и редактирование исходных данных сопровождается их непрерывной проверкой, что обеспечивает ввод только допустимых значений. Введенные данные можно сохранять на компьютере и загружать при необходимости.

Раздел «Общие настройки» позволяет устанавливать ограничения на время работы и генерировать помехи, определять размер заказа, утверждать максимальную емкость литейных ковшей и миксера, а также назначать стоимостные характеристики технологических операций и исходного полупродукта. После выполнения всех настроек выполняется проверка корректности введенных данных, а также запуск главного окна интерфейса системы «Алюминщик» (рисунок 3.5).

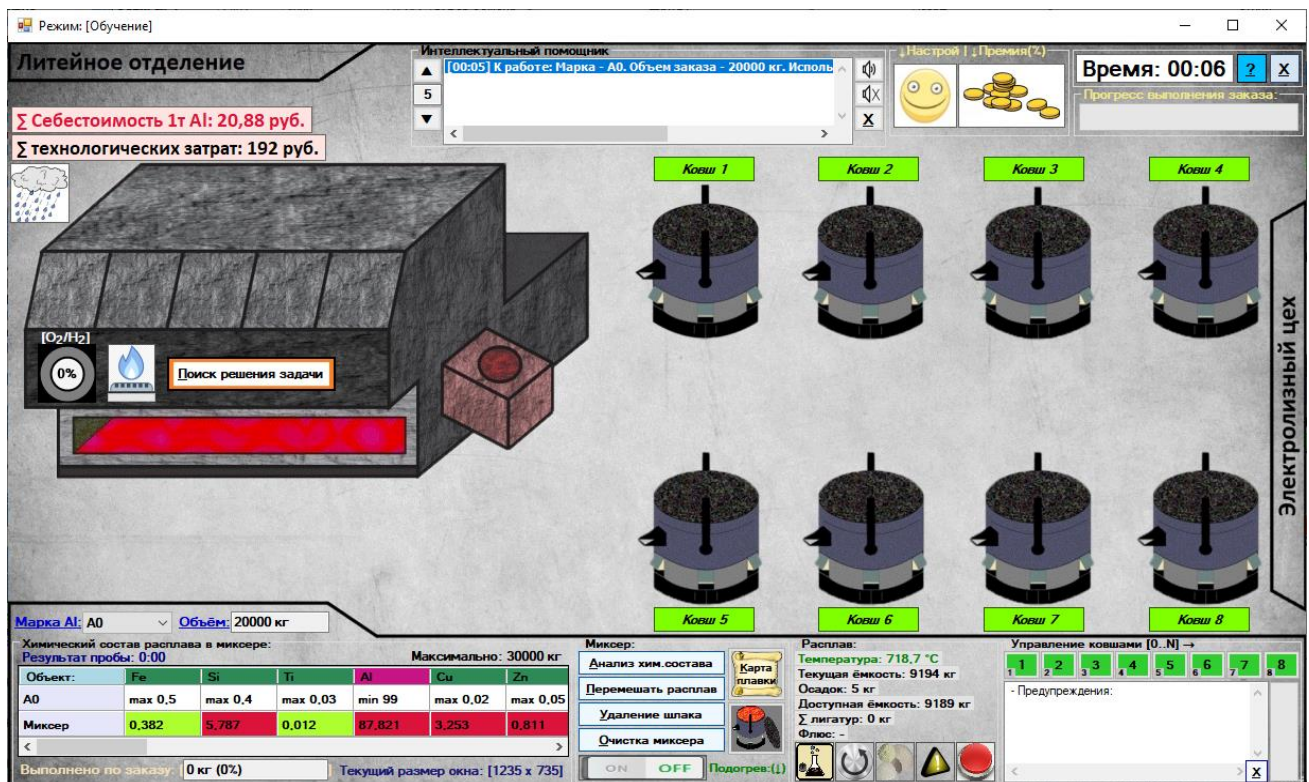


Рисунок 3.5 – Главное окно интерфейса системы «Алюминщик»

В главное окно интерфейса системы «Алюминщик» входят элементы:

- кнопка «Описание технологической задачи», позволяющая открыть информационное окно, отображающее краткое описание технологической задачи;

- таймер прямого отсчета, характеризующий прошедшее время;
- несколько информационных полей, отражающих текущие значения общих технологических затрат, а также затраты на выплавку 1 тонны алюминия;
- иконка, показывающая текущие погодные условия в атмосфере;
- шкала прогресса выполнения заданного объема заказа;
- визуальный блок интерактивной помощи, сигнализирующий о точности выполнения различных технологических операций;
- интеллектуальный помощник, который позволяет получать актуальную и оперативную информацию во время работы с системой, что сокращает время выполнения расчетно-технологической задачи и повышает точность попадания текущего химического состава в установленный диапазон значений выбранной марки алюминиевого сплава.

В левой части интерфейса системы находится миксер, здесь же расположены кнопки «Поиск решения задачи» и «Продувка инертными газами», а также мини-диаграмма, отражающая процентное содержание газовых включений в алюминиевом расплаве.

В правой части интерфейса располагается набор литейных ковшей, доставленных из электролизного цеха. Каждый ковш имеет свой собственный уникальный химический состав расплава и полезную емкость, в том числе литейные ковши имеют разную долю осадка на стенках. В процессе работы системы осадок в литейных ковшах и миксере постепенно увеличивается.

Активация кнопки выбранного ковша позволяет просматривать и регулировать параметры добавления необходимой массы алюминия-сырца с учетом доступной емкости в миксере. В представленном окне также находится таблица химического состава алюминия-сырца из литейного ковша (рисунок 3.6).

После определения необходимых технологических параметров содержимого литейного ковша, требуется подтвердить настройки нажатием на кнопку «Слить в миксер». В этом случае запустится анимационная сцена, отражающая процесс добавления алюминия-сырца из литейного ковша в миксер (рисунке 3.7).

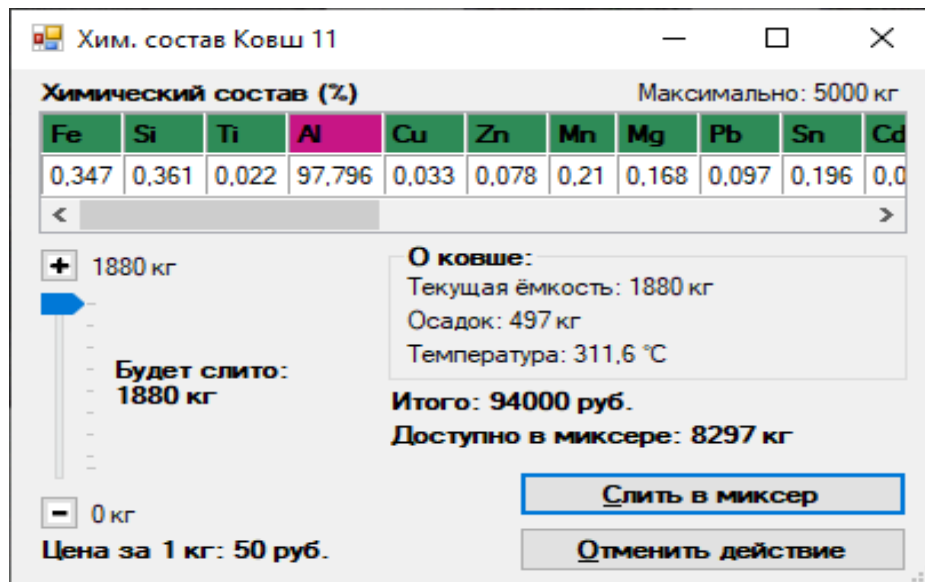


Рисунок 3.6 – Управление параметрами ковша с исходным алюминием-сырцом

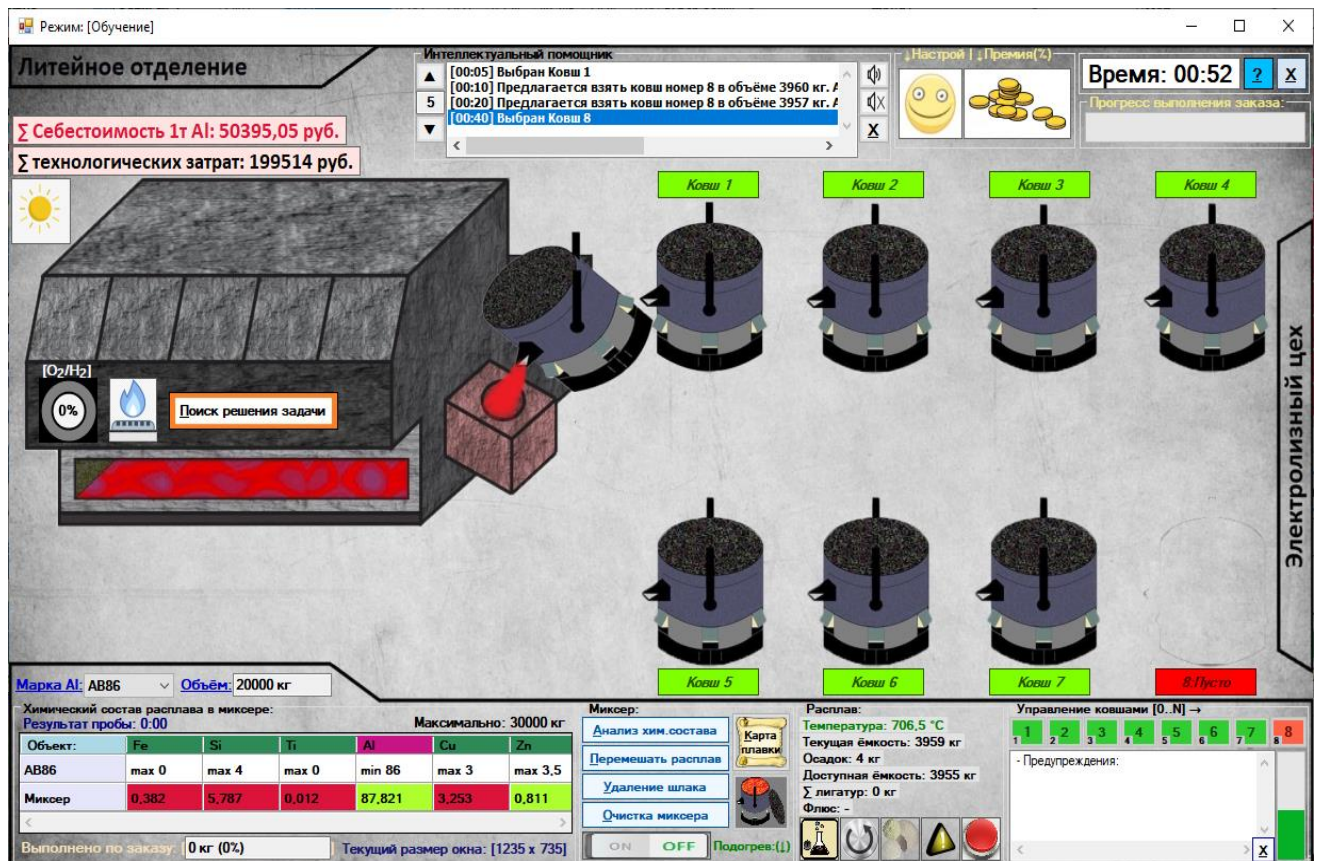


Рисунок 3.7 – Процесс добавления алюминия-сырца из ковша в миксер

В левой нижней части экрана находится информация об объеме заказа, здесь же располагаются сведения о требуемом и текущем химическом составе алюминиевого сплава согласно технологической инструкции (рисунок 3.8).



Марка Al:	A0	Объём:	20000 кг			
Химический состав расплава в миксере:				Максимально: 30000 кг		
Результат пробы: 0:00						
Объект:	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn
A0	max 0,5	max 0,4	max 0,03	min 99	max 0,02	max 0,05
Миксер	0,382	5,787	0,012	87,821	3,253	0,811
< >						
Выполнено по заказу: 0 кг (0%)				Текущий размер окна: [1240 x 735]		

Рисунок 3.8 – Сведения о текущем и заданном химическом составе расплава

В информационном контейнере «Миксер» содержатся все необходимые технологические операции, обеспечивающие формирование заданного химического состава расплава в миксере (рисунок 3.9):

- «Анализ химического состава»;
- «Перемешать расплав»;
- «Удаление шлака»;
- «Очистка миксера»;
- «Карта плавки»;
- «Наполнение литейного ковша алюминиевым расплавом из миксера»;
- «Автоматический регулятор температуры расплава».

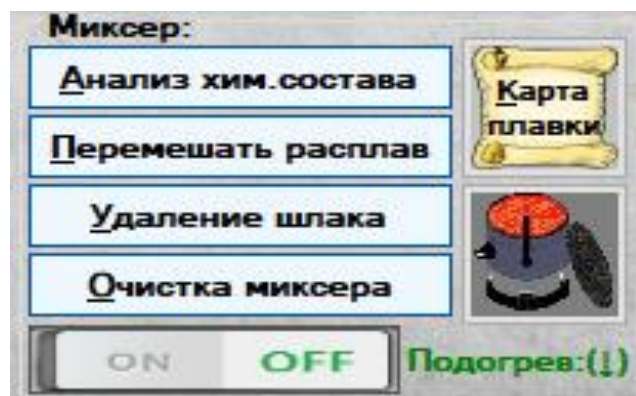


Рисунок 3.9 – Информационный контейнер «Миксер»

Регулировка температуры расплава в миксере производится в автоматическом режиме благодаря нагревательным элементам, которые расходуют электроэнергию. Во время наполнения миксера металлом на его стенках могут

образовываться осадочные отложения, то есть происходит «налипание» металла. В таком случае предусмотрен механизм очистки миксера. В случае, если не удалось сформировать заданный химический состав расплава, можно отлить часть приготовленного расплава из миксера в специально подготовленный литейный ковш. Все действия записываются в оперативную память компьютера и отображаются при активации кнопки «Карта плавки» (рисунок 3.10).

Информационный контейнер «Расплав» позволяет непрерывно отслеживать показатели формирования химического состава расплава в миксере (рисунок 3.11).

Карта плавки марки алюминия

Карта плавки: АВ86.  
Текущая дата: Вс 10.11.19 г.  
Наименование исходных и шихтовых материалов:

№ Материала:	Время:	Масса(кг):	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd	Li
Ковш 1	00:02	4099	0,143	2,831	0,128	91,385	3,026	0,066	0,023	2,244	0,079	0,075	0	0
Ковш 2	00:09	3990	0,841	4,433	0,099	88,308	2,959	1,159	0,068	1,839	0,238	0,056	0	0
АВЗ	00:23	50	0,3	0,3	0	96,04	0	0	0	0	0,04	0,04	0	0,04
[Флюс] №1	00:33	10	0	-100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ковш 6	00:53	4255	0	5,874	0,06	89,644	0,53	2,383	0,037	1,259	0,192	0,021	0	0

Итого: 12350 (осадок: 36) кг  
Результаты экспресс-анализа:

№ Пробы:	Время:	Масса(кг):	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd	Li	Na
Проба: 1	00:48	8095	0,489	3,072	0,114	90,402	2,991	0,604	0,045	2,042	0,157	0,066	0	0	0
Проба: 2	01:01	12350	0,321	4,037	0,095	90,142	2,143	1,217	0,042	1,772	0,169	0,05	0	0	0

Данные на момент времени: 01:17

Закончить просмотр

Рисунок 3.10 – Карта плавки алюминиевого расплава заданной марки

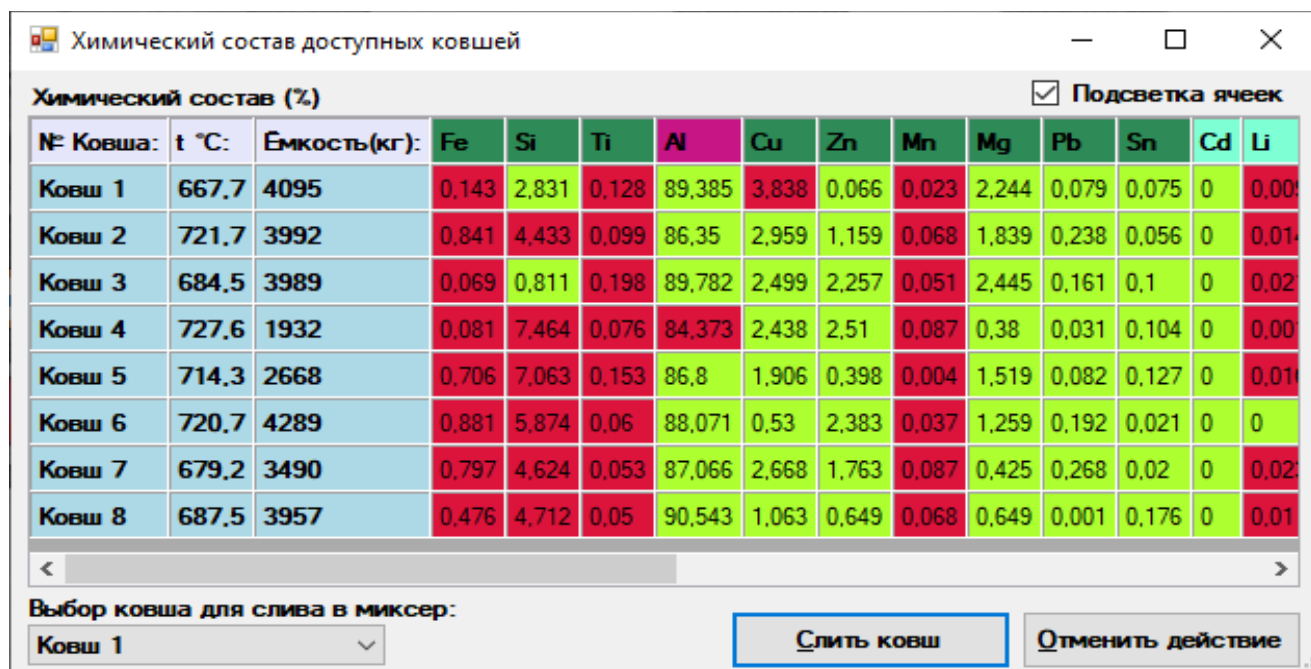


Рисунок 3.11 – Информационный контейнер «Расплав»

Остальные кнопки определяют возможности коррекции расплава:

- «Просмотр химического состава текущих ковшей» (определяет набор доступных для использования литейных ковшей);
- «Добавление легирующих металлов» (открывает возможность выбора любой легирующей добавки);
- «Добавление флюсов в расплав миксера» (позволяет осуществлять обработку текущего алюминиевого расплава в миксере при помощи флюсовых солей определенного химического состава);
- «Текущее качество расплава» (обеспечивает проверку текущего качества расплава в миксере и зависит от доли газовых включений);
- «Разливка металла в готовую продукцию» (производит разливку сформированного расплава в готовую продукцию с учетом требований заказа).

Система «Алюминщик» предоставляет возможность просмотра набора имеющихся литейных ковшей и их химического состава в структурированном виде для организации обоснованного принятия решения пользователем (рисунок 3.12).



Химический состав доступных ковшей

Химический состав (%) ☒ Подсветка ячеек

№ Ковша:	t °C:	Емкость(кг):	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd	Li
Ковш 1	667,7	4095	0,143	2,831	0,128	89,385	3,838	0,066	0,023	2,244	0,079	0,075	0	0,000
Ковш 2	721,7	3992	0,841	4,433	0,099	86,35	2,959	1,159	0,068	1,839	0,238	0,056	0	0,014
Ковш 3	684,5	3989	0,069	0,811	0,198	89,782	2,499	2,257	0,051	2,445	0,161	0,1	0	0,02
Ковш 4	727,6	1932	0,081	7,464	0,076	84,373	2,438	2,51	0,087	0,38	0,031	0,104	0	0,00
Ковш 5	714,3	2668	0,706	7,063	0,153	86,8	1,906	0,398	0,004	1,519	0,082	0,127	0	0,010
Ковш 6	720,7	4289	0,881	5,874	0,06	88,071	0,53	2,383	0,037	1,259	0,192	0,021	0	0
Ковш 7	679,2	3490	0,797	4,624	0,053	87,066	2,668	1,763	0,087	0,425	0,268	0,02	0	0,02
Ковш 8	687,5	3957	0,476	4,712	0,05	90,543	1,063	0,649	0,068	0,649	0,001	0,176	0	0,01

Выбор ковша для слива в миксер:

Ковш 1

Слить ковш

Отменить действие

Рисунок 3.12 – Список доступных литейных ковшей и их химический состав

На рисунке 3.13 представлен список разнообразных легирующих добавок с различным химическим составом, которые можно добавить в алюминиевый

расплав для его корректировки. Каждая легитурa из представленного списка имеет свое собственное значение цены за 1 кг, поэтому требуется тщательно взвешивать необходимость использования той или иной легирующей добавки в целях доведения алюминиевого расплава до заданного химического состава. Масса добавляемых в расплав миксера легирующих металлов определяется числом, которое необходимо указать в поле «Масса добавки (кг)».

Максимальная масса легирующих добавок ограничивается только полезной емкостью электрического миксера и их количеством. При определении массы необходимого количества легирующих добавок система подсчитывает конечную стоимость выбранных шихтовых материалов с учетом их единичной стоимости.

**Легирующие компоненты**

Химический состав доступных легирующих компонентов ☒ Подсветка ячеек

Лигатура:	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn
AlB3	0,3	0,3	0	96,04	0	0	0	0	0,04	0,04
AlB4	0,3	0,3	0	95,04	0	0	0	0	0,04	0,04
AlB5	0,3	0,3	0	94,04	0	0	0	0	0,04	0,04
AlBe5	0,3	0,3	0	93,99	0	0	0	0,05	0,04	0,04
AlBi3	0,3	0,3	0	96	0	0	0	0	0,04	0,04
AlCa6	0,3	0,3	0	92,94	0	0	0,05	0,05	0,04	0,04
AlCa10	0,3	0,3	0	89,04	0	0	0	0	0,04	0,04

Выберите легитурa: **AlB3**      Масса добавки(кг): **0**      Доступно в миксере: 0 кг  
 Доступно лигатурa: 1000 кг

Химический состав лигатурa

Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd	Li	Na
0,3	0,3	0	96,04	0	0	0	0	0,04	0,04	0	0,04	0,04

Принять данные      Отменить действие      Цена за 1 кг: 8500 руб.  
 Итого: 0 руб.

Рисунок 3.13 – Список легирующих добавок и их химический состав

Также система «Алюминщик» позволяет выполнять добавление флюсовых добавок в расплав миксера. Каждый флюс имеет свой уникальный номер, цену, а также индивидуальные свойства (рисунок 3.14).

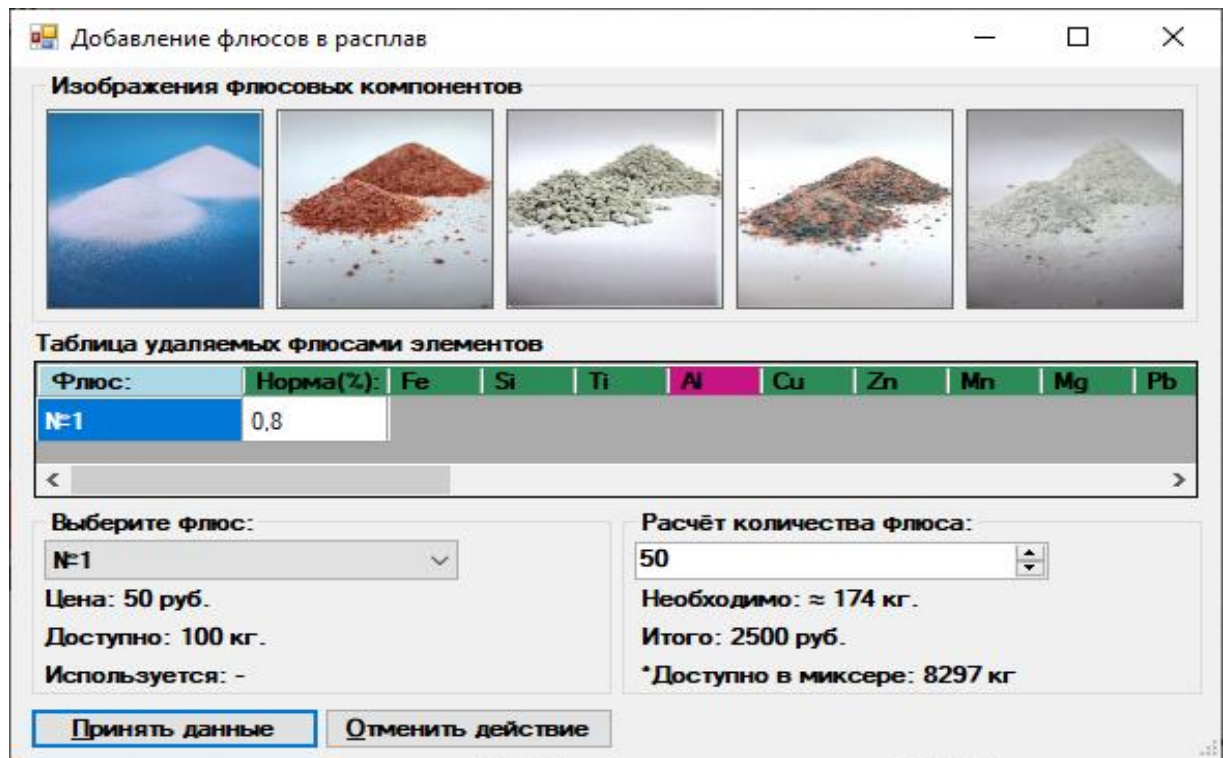


Рисунок 3.14 – Список флюсовых добавок и их химический состав

При подтверждении управляющих воздействий по добавлению легирующих или флюсовых добавок запустится анимационная сцена, демонстрирующая процесс загрузки металлических или сыпучих материалов в миксер (рисунок 3.15).

Легирующие добавки полностью растворяются в жидком расплаве алюминия почти без образования шлаковых излишков. При выполнении различных технологических операций в расплаве могут образовываться газовые включения, которые снижают качество готовой продукции, образуя полости в затвердевших слитках после разливки. Для борьбы с этим явлением можно использовать порошковую добавку флюса ФПР-23, либо кнопку «Перемешать расплав» или произвести продувку расплава инертными газами, влияние которых определяется соответствующими настройками системы «Алюминщик».

Также система «Алюминщик» позволяет производить текущую оценку качества алюминиевого расплава в любой момент времени. В случае если алюминиевый расплав сформирован в соответствии с заданным химическим составом выбранной марки сплава имеется возможность запустить анимационную сцену разливки расплава из миксера в готовые слитки (рисунок 3.16).



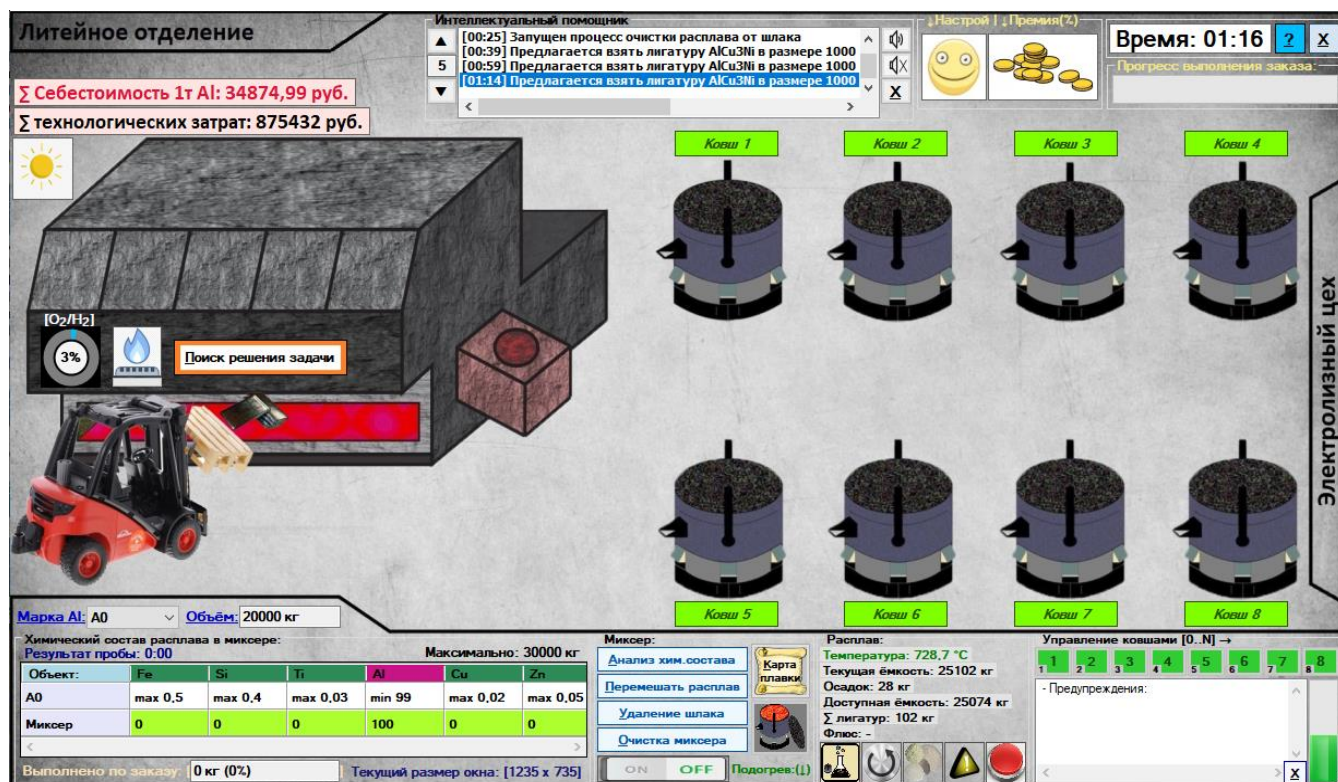


Рисунок 3.15 – Процесс загрузки шихтовых материалов в миксер

Главной отличительной особенностью системы «Алюминщик» является «Модуль прогнозирования управляющих воздействий», который позволяет осуществлять поиск оптимального варианта решения поставленной технологической задачи на основе исходных данных, либо с учетом уже внесенных пользователем системы изменений в процесс формирования алюминиевого расплава (рисунок 3.17). Работа «Модуля прогнозирования управляющих воздействий» основана на программной реализации численного метода расчета оптимальных параметров смешивания алюминия-сырца из литейных ковшей с учетом лигатур и флюсов.

Этот метод расчета позволяет решить задачу формирования алюминиевого расплава с заданными характеристиками при минимальных технологических затратах для изменяющихся начальных условий и ограничений с использованием алгоритма динамического программирования и симплекс-метода для поиска экстремума целевой функции. Поиск оптимального варианта формирования алюминиевого расплава в миксере возможен благодаря анализу исходных данных и имеющихся материальных ограничений, на основе которых осуществляется автоматическое определение критерия оптимизации.

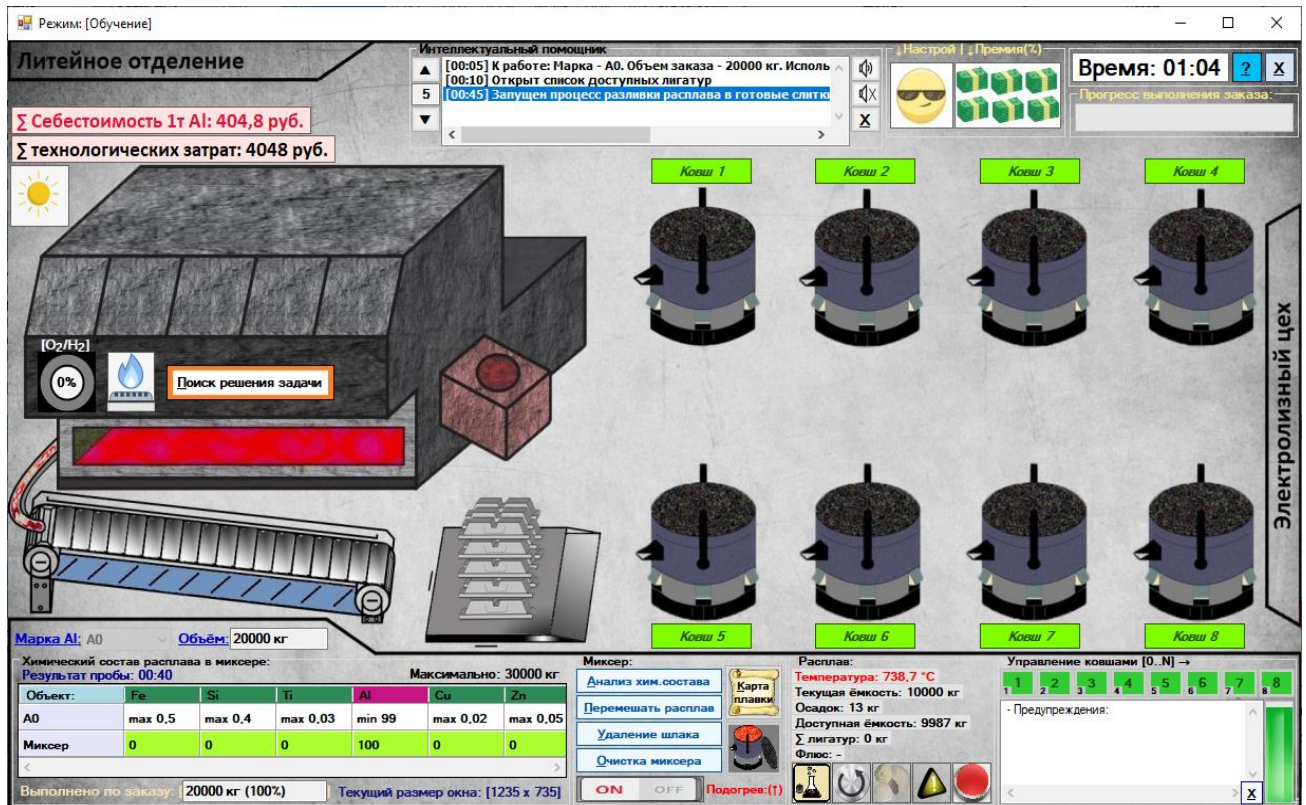


Рисунок 3.16 – Процесс разливки алюминиевого расплава в готовые слитки

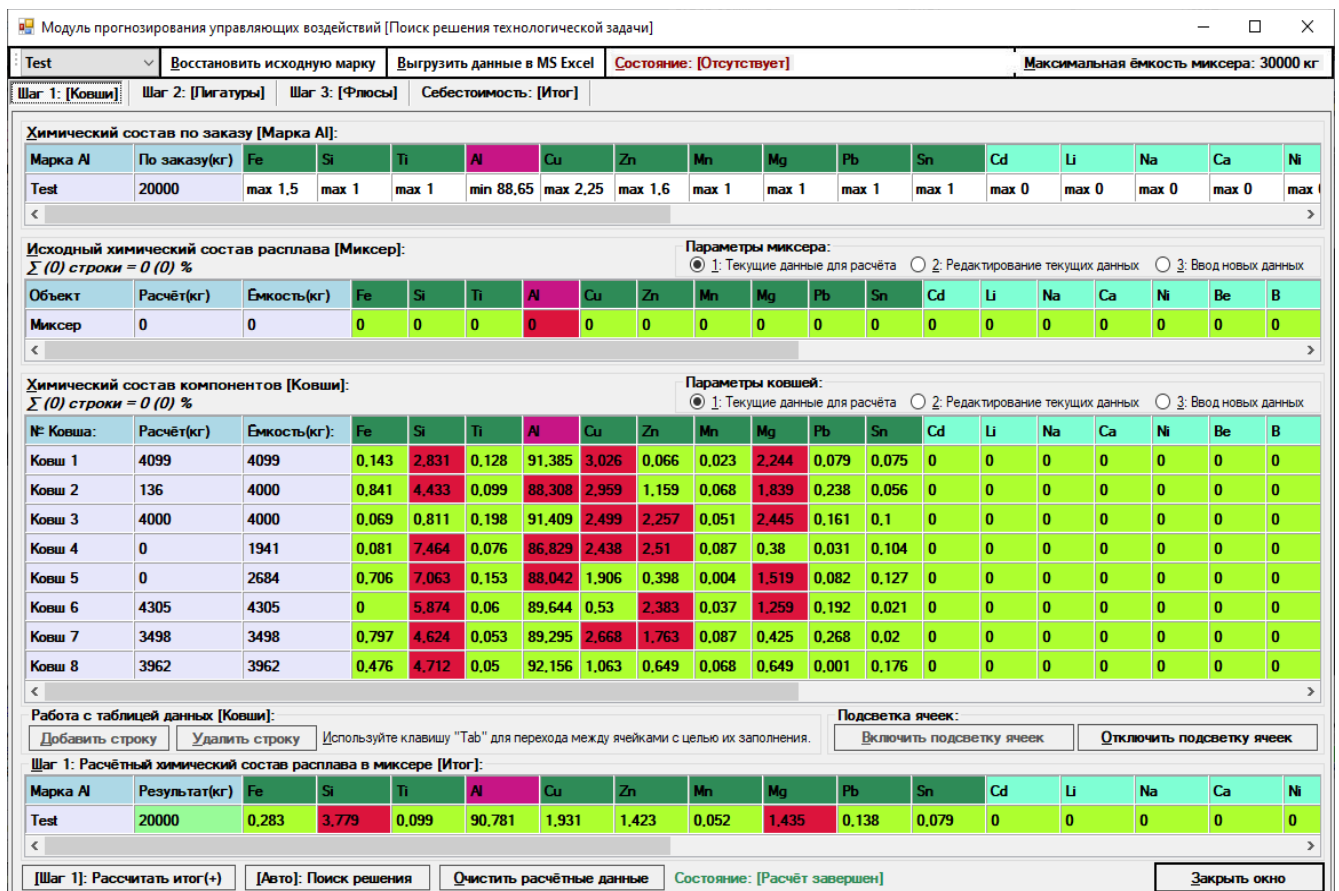


Рисунок 3.17 – Модуль поиска решения расчетно-технологической задачи

«Модуль прогнозирования управляющих воздействий» обеспечивает нахождение полного или неполного решения при конкретных начальных условиях. Как уже упоминалось ранее, к полному решению относится случай, когда из текущего набора литейных ковшей можно сформировать необходимую массу расплава в миксере в соответствии с заданным химическим составом марки алюминиевого сплава. К неполному решению относится случай, когда из текущего набора ковшей можно сформировать меньшую, но не заданную массу расплава в миксере, однако в соответствии с установленной маркой алюминиевого сплава, либо при заданных начальных условиях невозможно сформировать расплав необходимого химического состава.

С учетом того, что процесс производства алюминиевых сплавов является непрерывным, то имеется возможность скорректировать неполное решение до полного с использованием новых литейных ковшей, а также лигатур и флюсов за минимальное количество технологических операций, что соответствует принципам динамического программирования, то есть непрерывному поиску решения оптимизационной задачи с учетом постоянно изменяющихся начальных условий с использованием симплекс метода для осуществления расчета параметров смешивания литейных ковшей, присадок лигатур и флюсов.

Реализованный алгоритм симплекс-метода, предназначенный для поиска оптимального варианта смешивания компонентов расплава, определяет целевую ячейку данных и подбирает необходимые значения параметров смешивания. В данной ситуации оптимум является, чаще всего единственным и находится в границах исследуемой области, определенной ограничениями.

То есть, технологическая задача разбивается на три упрощенные подзадачи:

- поиск значений параметров смешивания алюминия-сырца из литейных ковшей в миксере;
- поиск значений расчетных масс легирующих компонентов с учетом их наличия, стоимости и влияния на химический состав расплава в миксере;
- поиск значений расчетных масс флюсовых добавок с учетом их наличия, стоимости и влияния на химический состав расплава в миксере.

В таком случае, найденный набор результирующих значений одной подзадачи является исходным набором начальных условий для расчета новых значений следующей подзадачи. Цикл вычислений продолжается до тех пор, пока не найдется итоговое решение главной технологической задачи, удовлетворяющее всем имеющимся условиям и ограничениям.

### **3.4 Выводы к главе 3**

1. Разработаны принципы создания программного комплекса «Алюминщик» и определены его функционально-технические возможности.

2. Выбран и обоснован язык программирования высокого уровня для реализации математической модели и метода расчета оптимальных значений параметров процесса формирования алюминиевого расплава с учетом изменяющихся начальных условий в программном комплексе «Алюминщик».

3. Разработан программный комплекс «Алюминщик» на основе объектно-ориентированного подхода, предназначенный для проведения вычислительных экспериментов, оптимизации и исследования процесса формирования алюминиевого расплава в миксере.

4. Разработаны рекомендации по использованию основных функциональных возможностей программного комплекса «Алюминщик».



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

### 4.1 Проверка адекватности модели

Для проверки адекватности математической модели проведен сравнительный анализ фактических и полученных модельных данных. Были проанализированы данные из 250 паспортов плавов различных марок, реализованных на АО «РУСАЛ Новокузнецк». По фактическим данным были проведены расчеты на модели. На рисунке 4.1 представлен сравнительный анализ фактического и модельного содержания алюминия для сплавов АЛ6, АМг4, В65, АД31.

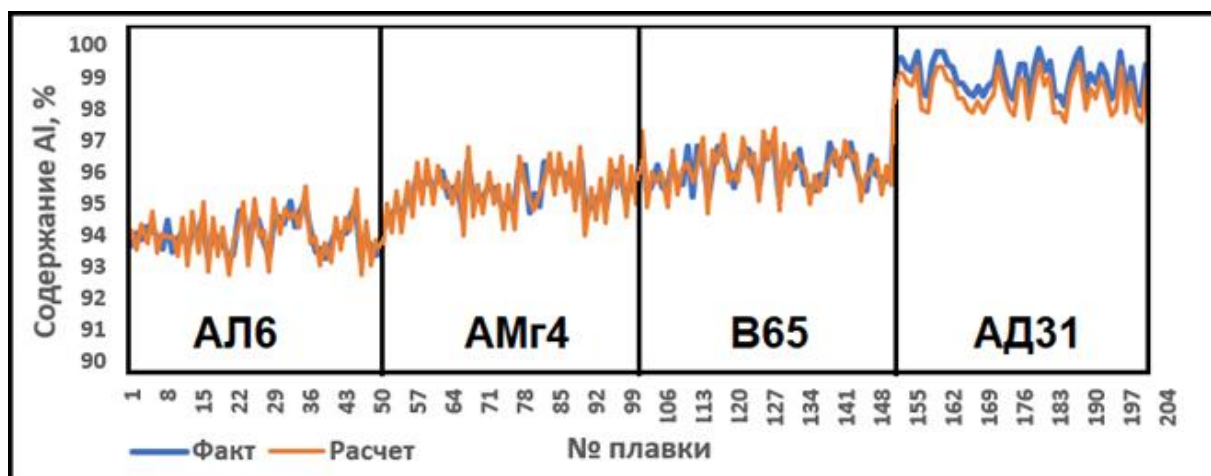


Рисунок 4.1 – Сравнительный анализ фактических и модельных данных по содержанию алюминия

Относительная погрешность модели рассчитывалась как отношение средне-квадратичного отклонения фактического содержания элементов в сплаве от рассчитанного по модели к среднему значению содержания этих элементов:

$$\varepsilon_{\text{отн}} = \frac{\sum_{i=1}^N ([R]_i^{\text{факт}} - [R]_i^{\text{расч}})^2}{\frac{\sum_{i=1}^N [R]_i^{\text{факт}}}{N}}, \quad (4.1)$$

где  $[R]_i^{\text{факт}}$  – фактическое значение концентрации  $i$ -ого химического элемента в

алюминиевом сплаве, %;

$[R]_i^{\text{расч}}$  – расчетное значение концентрации  $i$ -ого химического элемента в алюминиевом сплаве, %;

$N$  – количество химических элементов.

В таблице 4.1 представлен сравнительный анализ погрешностей по всем элементам алюминиевого расплава для марки АЛ6.

Таблица 4.1 – Результаты расчета погрешностей для элементов расплава АЛ6

	Состав расплава, %									
	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn
Погрешность модели	0,007	0,014	0,006	0,110	0,013	0,007	0,006	0,014	0,007	0,007
Погрешность результатов анализа по ГОСТ 25086-2011	0,008	0,015	0,008	0,150	0,015	0,008	0,008	0,015	0,008	0,008

Полученные результаты расчетов показали, что погрешность математической модели не превышает погрешности измерения химического состава алюминиевого расплава и соответствует погрешности, предусмотренной ГОСТ 25086-2011. Таким образом, погрешность моделирования не превышает точности измерения химического состава алюминиевого расплава в электрическом миксере сопротивления, поэтому можно считать, что разработанная математическая модель является адекватной.

## 4.2 Исследование процесса формирования алюминиевого расплава в миксере с использованием математической модели

С использованием реализованной в программном комплексе «Алюминщик» математической модели были проведены исследования динамики процесса формирования алюминиевых сплавов в электрическом миксере сопротивления.

На основе технологических данных, приведенных в таблицах 4.2 – 4.4, получены результаты математического моделирования динамики изменения концентраций основных компонентов формируемого расплава при последовательном

добавлении алюминия-сырца из 8 литейных ковшей в миксер через одинаковые промежутки времени  $\tau$  для сплавов АЛ6, АМг4, В65 (рисунки 4.2 – 4.4).

Таблица 4.2 – Химический состав алюминия-сырца в литейных ковшах для получения сплава АЛ6 (1)

№ ковша	Масса, кг	Химический состав алюминия-сырца в литейных ковшах, %									
		Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn
ЛК 1	4639	0,733	5,297	0,331	91,582	1,054	0,195	0,099	0,004	0,216	0,489
ЛК 2	2161	0,427	6,487	0,278	89,312	1,824	0,547	0,078	0,296	0,488	0,263
ЛК 3	909	0,39	7,412	0,111	89,161	2,055	0,197	0,037	0,023	0,392	0,222
ЛК 4	2915	0,231	2,17	0,015	93,699	3,098	0,167	0,284	0,329	0,004	0,003
ЛК 5	3786	0,339	3,676	0,084	92,629	2,411	0,097	0,013	0,212	0,487	0,052
ЛК 6	4847	0,03	4,489	0,467	92,115	2,255	0,19	0,243	0,013	0,162	0,036
ЛК 7	1165	0,329	5,507	0,407	90,172	1,909	0,433	0,348	0,36	0,226	0,309
ЛК 8	3118	0,746	3,344	0,11	92,913	1,947	0,062	0,17	0,036	0,247	0,425

Таблица 4.3 – Химический состав алюминия-сырца в литейных ковшах для получения сплава АМг4

№ ковша	Масса, кг	Химический состав алюминия-сырца в литейных ковшах, %									
		Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn
ЛК 1	2647	0,553	0,183	0,099	93,968	0,005	0,121	0,468	4,371	0,112	0,12
ЛК 2	4677	0,332	0,249	0,085	93,134	0,024	0,087	0,479	5,303	0,032	0,275
ЛК 3	3616	0,01	0,364	0,151	92,077	0,035	0,112	0,397	6,259	0,231	0,364
ЛК 4	3318	0,477	0,527	0,005	92,898	0,008	0,093	0,077	5,5	0,119	0,296
ЛК 5	3920	0,407	0,221	0,033	95,515	0,053	0,024	0,229	3,306	0,046	0,166
ЛК 6	3596	0,444	0,056	0,114	95,299	0,039	0,064	0,092	3,173	0,403	0,316
ЛК 7	4257	0,027	0,064	0,178	94,88	0,077	0,106	0,263	4,003	0,09	0,312
ЛК 8	2998	0,326	0,082	0,097	94,843	0,018	0,121	0,262	3,358	0,461	0,432

Таблица 4.4 – Химический состав алюминия-сырца в литейных ковшах для получения сплава В65

№ Объекта	Доступная масса(кг)	Химический состав алюминия-сырца в литейных ковшах, %									
		Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn
Миксер	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ЛК 1	4749	0,158	0,169	0,003	95,101	4,217	0,005	0,11	0,111	0,062	0,064
ЛК 2	4215	0,098	0,072	0,033	94,207	5,035	0,036	0,134	0,133	0,158	0,094
ЛК 3	2102	0,086	0,066	0,049	94,318	4,997	0,046	0,104	0,163	0,085	0,086
ЛК 4	2330	0,121	0,048	0,068	95,975	3,029	0,042	0,414	0,189	0,071	0,043
ЛК 5	2962	0,155	0,137	0,029	95,546	3,483	0,019	0,44	0,092	0,014	0,085
ЛК 6	3093	0,203	0,119	0,044	94,786	4,397	0,039	0,304	0,096	0,001	0,011
ЛК 7	2090	0,178	0,134	0,062	94,683	4,454	0,083	0,254	0,093	0,047	0,012
ЛК 8	2429	0,077	0,103	0,036	96,219	3,047	0,011	0,351	0,075	0,047	0,034

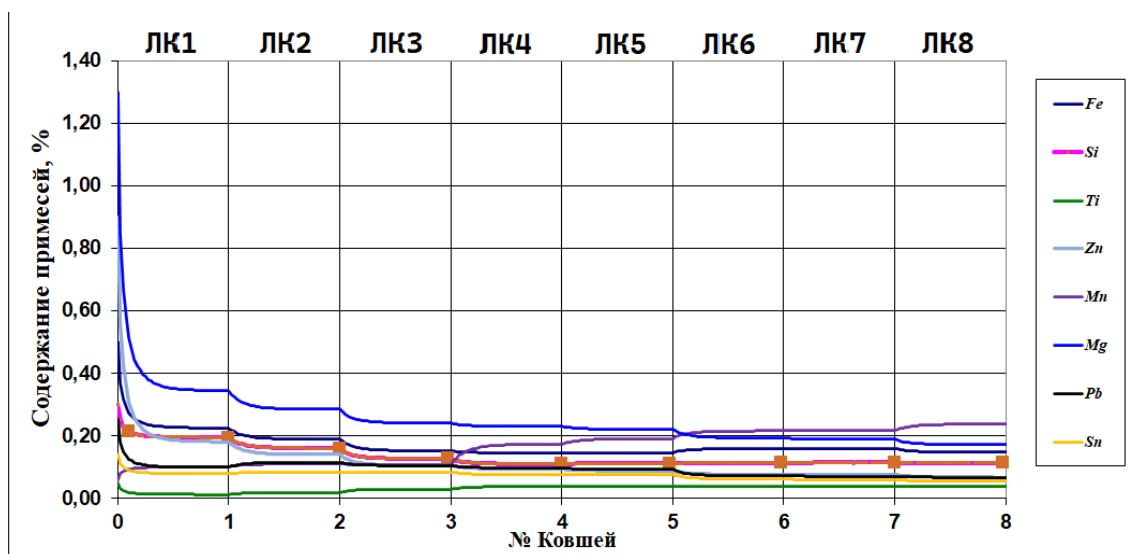
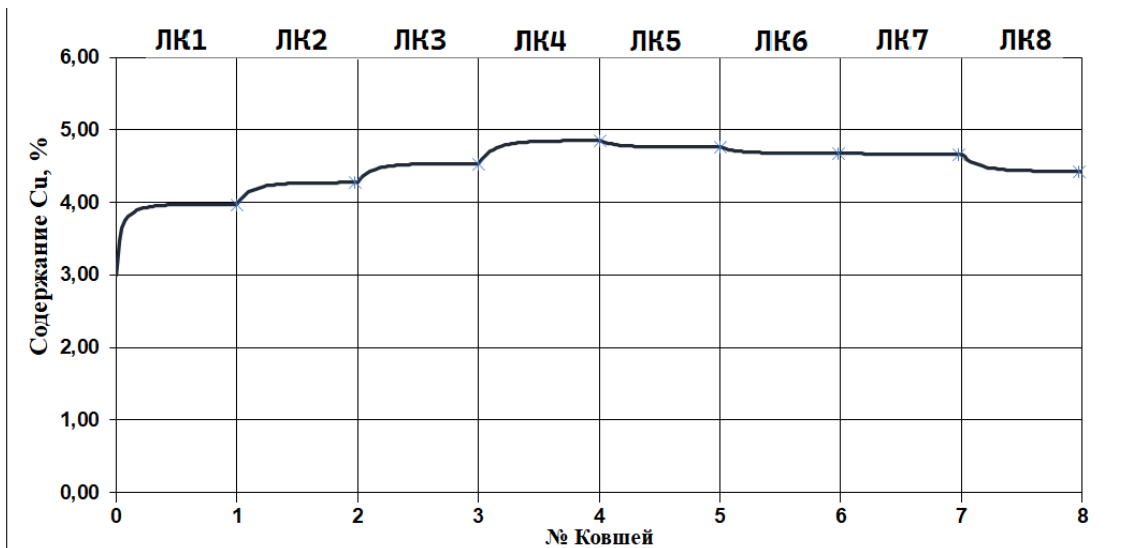
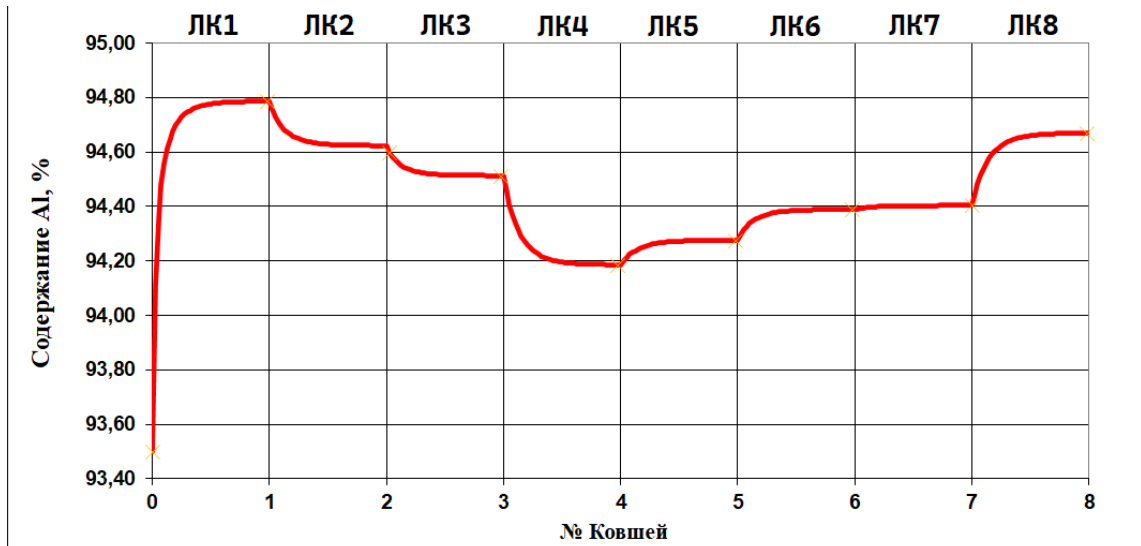


Рисунок 4.2 – Динамика процесса формирования марки АЛ6 в миксере



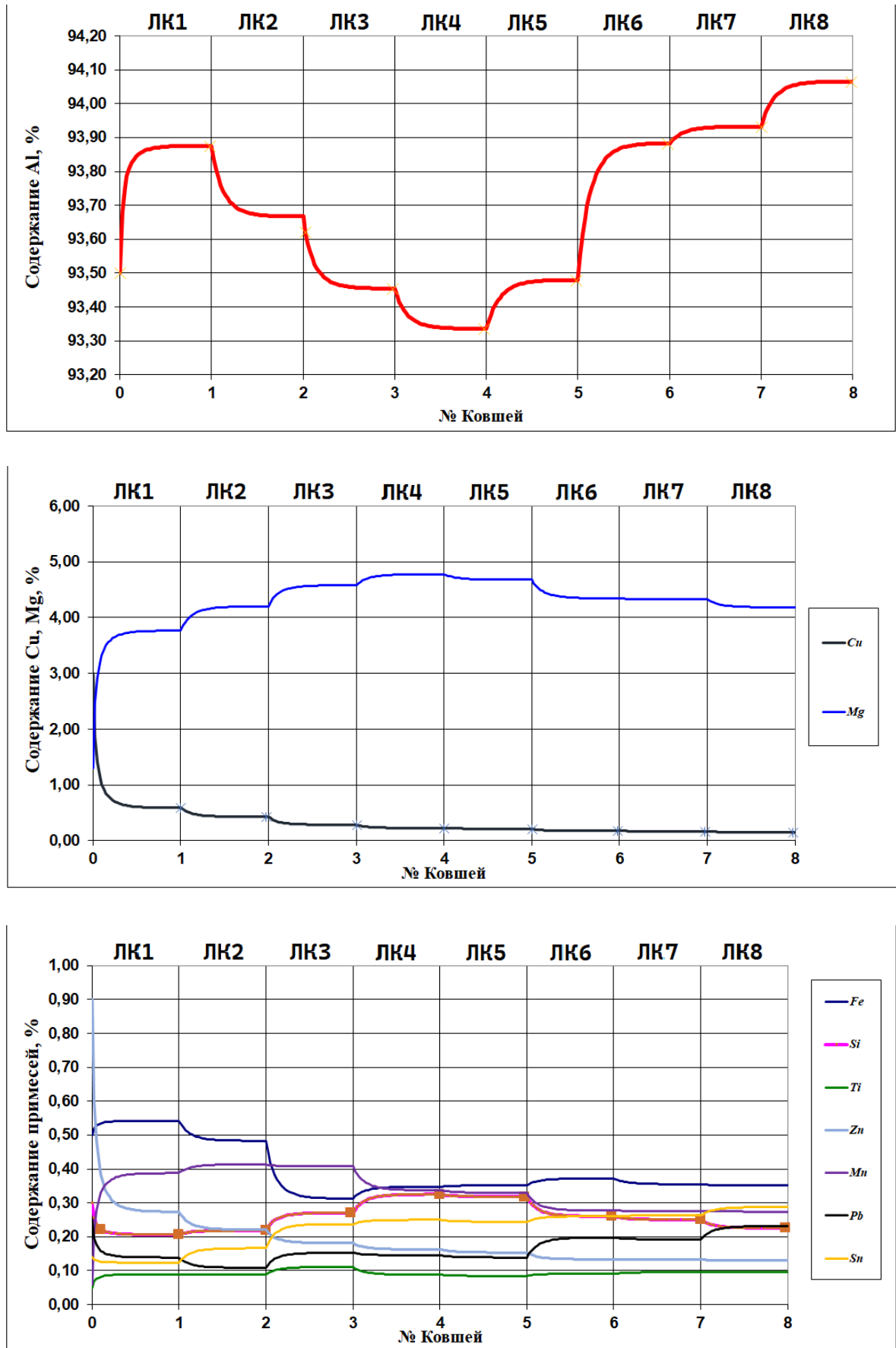


Рисунок 4.3 – Динамика процесса формирования марки АМг4 в миксере

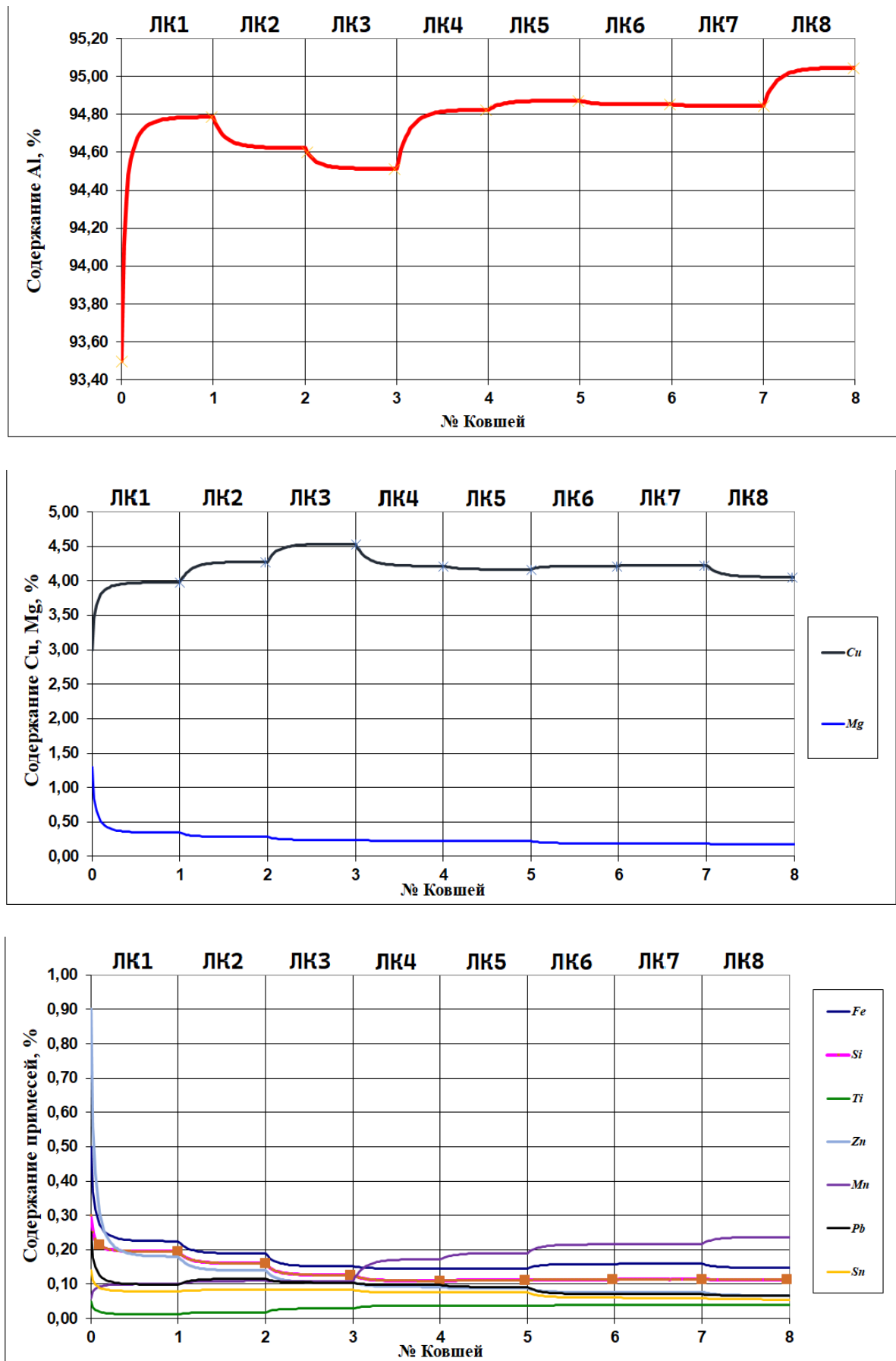


Рисунок 4.4 – Динамика процесса формирования марки В65

На рисунке 4.5 представлена визуализация динамики изменения концентраций компонентов расплава АЛ6 по объему миксера при добавлении алюминия-сырца из литейного ковша в карман миксера на основе решения уравнения диффузии в рамках задачи математической физики.

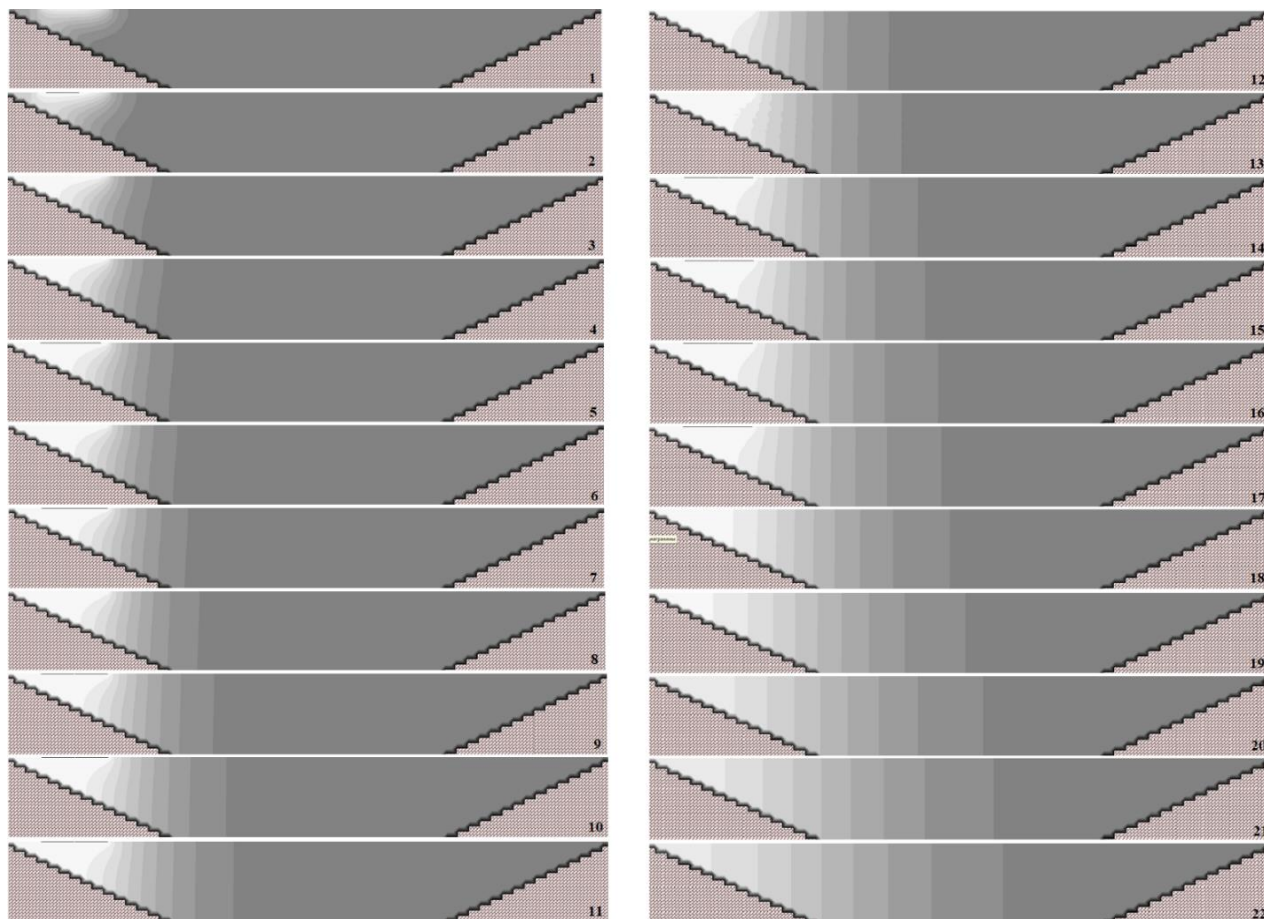


Рисунок 4.5 – Визуализация динамики изменения концентраций компонентов расплава АЛ6 по объему миксера

Представленные рисунки отражают последовательность изменения концентраций компонентов формируемого алюминиевого расплава АЛ6 в миксере при добавлении алюминия-сырца из литейных ковшей.

Таким образом, с использованием программного комплекса «Алюминщик» можно производить расчет параметров смешивания алюминия-сырца из литейных ковшей и осуществлять визуализацию динамики формирования химического состава алюминиевого расплава в электрическом миксере сопротивления с учетом изменяющихся начальных условий и ограничений.

### 4.3 Определение оптимальных технологических режимов процесса формирования алюминиевого расплава в миксере с использованием программного комплекса «Алюминщик»

С использованием программного комплекса «Алюминщик» были реализованы расчеты оптимальных режимов процесса формирования алюминиевого расплава в миксере. Ниже приведен пример расчета процесса формирования алюминиевого сплава марки АЛ6 с соответствующими исходными данными для расчета (таблица 4.5). На рисунке 4.6 представлены результаты математического моделирования динамики изменения концентраций компонентов расплава при смешивании алюминия-сырца, поступающего из имеющегося набора литейных ковшей.

Таблица 4.5 – Химический состав алюминия-сырца для получения сплава АЛ6 (2)

№ ковша	Масса, кг	Химический состав алюминия-сырца в литейных ковшах, %									
		Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn
ЛК 1	4052	0,143	4,031	0,128	92,885	2,526	0,066	0,023	0,044	0,079	0,075
ЛК 2	3965	0,341	4,933	0,099	91,108	2,959	0,159	0,068	0,039	0,238	0,056
ЛК 3	3953	0,069	4,211	0,198	92,409	2,499	0,257	0,051	0,045	0,161	0,10
ЛК 4	1910	0,081	5,464	0,076	91,371	2,438	0,31	0,087	0,038	0,031	0,104
ЛК 5	2646	0,606	5,063	0,153	91,642	1,906	0,398	0,004	0,019	0,082	0,127
ЛК 6	4270	0,505	5,074	0,06	92,139	1,53	0,383	0,037	0,059	0,192	0,021
ЛК 7	3454	0,597	5,624	0,053	90,395	2,668	0,263	0,087	0,025	0,268	0,02
ЛК 8	3908	0,476	5,712	0,05	91,756	1,663	0,049	0,068	0,049	0,001	0,176

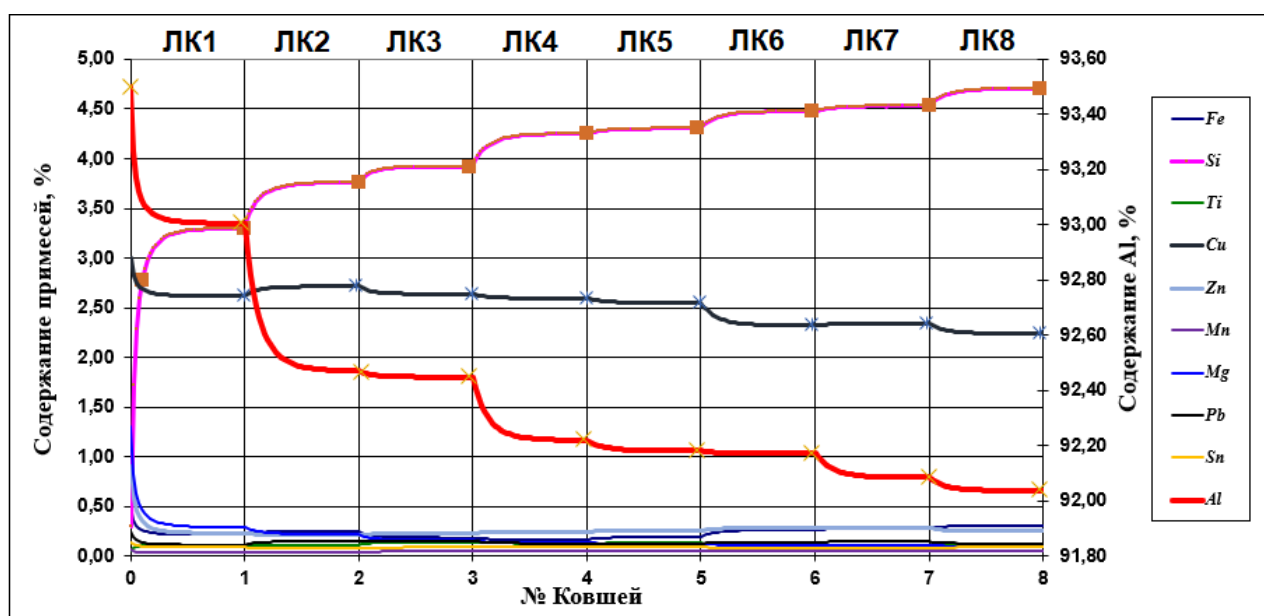


Рисунок 4.6 – Динамика процесса формирования расплава марки АЛ6

На первом этапе вычислений производится поиск первоначального соответствия химического состава формируемого расплава согласно требованиям заданной марки алюминия путем расчета наилучшего варианта смешивания расплавов алюминия-сырца из литейных ковшей. На втором и третьем этапе вычислений происходит расчет параметров корректирующих операций химического состава расплава в миксере путем поиска оптимального количества легирующих добавок и флюсов. На рисунках 4.7 – 4.8 приведен пример расчета шихтовки алюминиевого сплава марки АЛ6 с использованием модуля поиска оптимального решения.

Шаг 1: [Ковши]    Шаг 2: [Лигатуры]    Шаг 3: [Флюсы]    Себестоимость: [Итог]

**Химический состав по заказу [Марка АЛ]:**

Марка АЛ	По заказу(кг)	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd	Li	Na	Ca	Ni
АЛ6	20000	max 0,45	max 4,9	max 0,1...	min 91,9	max 2,05	max 0,25	max 0,05	max 0,05	max 0,1...	max 0,1	max 0	max 0	max 0	max 0	max 0

**Исходный химический состав расплава [Миксер]:**  
 $\Sigma (0) \text{ строки} = 0 (0) \%$

Параметры миксера: ☒ 1: Текущие данные для расчёта    ☐ 2: Редактирование текущих данных    ☐ 3: Ввод новых данных

Объект	Расчёт(кг)	Емкость(кг)	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd	Li	Na	Ca	Ni	Be	B
Миксер	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Химический состав компонентов [Ковши]:**  
 $\Sigma (0) \text{ строки} = 0 (0) \%$

Параметры ковшей: ☒ 1: Текущие данные для расчёта    ☐ 2: Редактирование текущих данных    ☐ 3: Ввод новых данных

№ Ковша:	Расчёт(кг)	Емкость(кг)	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd	Li	Na	Ca	Ni	Be	B
Ковш 1	4099	4099	0,143	4,031	0,128	92,885	2,526	0,066	0,023	0,044	0,079	0,075	0	0	0	0	0	0	0
Ковш 2	4483	4483	0,341	4,933	0,099	91,108	2,959	0,159	0,068	0,039	0,238	0,056	0	0	0	0	0	0	0
Ковш 3	2832	2832	0,069	4,211	0,198	92,409	2,499	0,257	0,051	0,045	0,161	0,1	0	0	0	0	0	0	0
Ковш 4	1941	1941	0,081	5,464	0,076	91,371	2,438	0,31	0,087	0,038	0,031	0,104	0	0	0	0	0	0	0
Ковш 5	2684	2684	0,606	5,063	0,153	91,642	1,906	0,398	0,004	0,019	0,082	0,127	0	0	0	0	0	0	0
Ковш 6	4305	4305	0,505	5,074	0,06	92,139	1,53	0,383	0,037	0,059	0,192	0,021	0	0	0	0	0	0	0
Ковш 7	0	3498	0,597	5,624	0,053	90,395	2,668	0,263	0,087	0,025	0,268	0,02	0	0	0	0	0	0	0
Ковш 8	3962	3962	0,476	5,712	0,05	91,756	1,663	0,049	0,068	0,049	0,001	0,176	0	0	0	0	0	0	0

Работа с таблицей данных [Ковши]:  
 [Добавить строку]    [Удалить строку]    Используйте клавишу "Tab" для перехода между ячейками с целью их заполнения.

Подсветка ячеек: ☐ Включить подсветку ячеек    ☐ Отключить подсветку ячеек

**Шаг 1: Расчётный химический состав расплава в миксере [Итог]:**

Марка АЛ	Результат(кг)	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd	Li	Na	Ca	Ni
АЛ6	20000	0,334	4,9	0,106	92,104	2,049	0,227	0,043	0,044	0,097	0,097	0	0	0	0	0

[Шаг 1]: Рассчитать итог(+)    [Авто]: Поиск решения    Очистить расчётные данные    Состояние: [Расчёт завершен]    [Закрыть окно]

Рисунок 4.7 – Расчет параметров смешивания алюминия-сырца для марки АЛ6

**Химический состав доступных компонентов [Лигатуры]:**  
 $\Sigma (0) \text{ строки} = 0 (0) \%$

Параметры лигатур: ☒ 1: Текущие данные для расчёта    ☐ 2: Редактирование текущих данных    ☐ 3: Ввод новых данных

№ Лигатуры:	Расчёт(кг)	Доступно(кг)	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd	Li	Na	Ca	Ni	Be	B
АВ3	0	1000	0,3	0,3	0	96,04	0	0	0	0,04	0,04	0	0,04	0,04	0,04	0	0,04	3	
АВ4	0	1000	0,3	0,3	0	95,04	0	0	0	0,04	0,04	0	0,04	0,04	0,04	0	0,04	4	
АВ5	0	1000	0,3	0,3	0	94,04	0	0	0	0,04	0,04	0	0,04	0,04	0,04	0	0,04	5	
АВe5	0	1000	0,3	0,3	0	93,99	0	0	0,05	0,04	0,04	0	0,04	0,04	0,04	0	5	0,04	
АВ3	0	1000	0,3	0,3	0	96	0	0	0	0,04	0,04	0	0,04	0,04	0,04	0	0,04	0,04	
АСа6	0	1000	0,3	0,3	0	92,94	0	0	0,05	0,05	0,04	0,04	0	0,04	0,04	5	0	0,04	
АСа10	0	1000	0,3	0,3	0	89,04	0	0	0	0,04	0,04	0	0,04	0,04	10	0	0,04	0,04	
АСо10	0	1000	0,3	0,2	0	89,1	0	0	0	0,04	0,04	0	0,04	0,04	0,04	0	0,04	0,04	

Работа с таблицей данных [Лигатуры]:  
 [Добавить строку]    [Удалить строку]    Используйте клавишу "Tab" для перехода между ячейками с целью их заполнения.

Подсветка ячеек: ☐ Включить подсветку ячеек    ☐ Отключить подсветку ячеек

**Шаг 2: Расчётный химический состав расплава в миксере [Итог]:**

Марка АЛ	Результат(кг)	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd	Li	Na	Ca	Ni
АЛ6	20000	0,334	4,9	0,106	92,104	2,049	0,227	0,043	0,044	0,097	0,097	0	0	0	0	0

[Шаг 2]: Рассчитать итог(+)    [Авто]: Поиск решения    Очистить расчётные данные    Состояние: [Расчёт завершен]    [Закрыть окно]

Рисунок 4.8 – Расчет легирующих добавок и флюсов для марки АЛ6

В таблице 4.6 представлен сравнительный анализ реальных технологических данных и полученных оптимальных параметров процесса получения алюминиевых сплавов для различных марок.

Таблица 4.6 – Сравнительный анализ фактических и расчетных (оптимальных) значений химического состава алюминиевых сплавов 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)
АЛ6	заданное	1,5	6	0,25	91,9	3	0,3	0,3	0,1	0,25	0,25
	факт	0,271	4,05	0,096	91,99	2,901	0,285	0,074	0,051	0,087	0,195
	расчет	0,334	4,9	0,106	92,104	2,049	0,227	0,043	0,044	0,097	0,097
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	0,349	0,295	0,146	98,825	0,099	0,098	0,091	0,097	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	0,2	0,149	0,05	99,596	0,005	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	0,349	0,015	0,048	99,579	0,005	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	0,175	0,03	0,017	99,762	0,016	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	0,077	0,06	0,04	99,813	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	0,0099	0,0086	0,00179	99,9777	0,002	0	0	0	0	0
	расчет	0,0098	0,0096	0,00189	99,9757	0,003	0	0	0	0	0

Анализ полученных результатов показал, что с использованием программного комплекса «Алюминщик» можно определять оптимальные массы алюминия-сырца из имеющегося набора литейных ковшей, количество присадок лигатур и флюсов, позволяющие сформировать расплав с заданными технологическими параметрами и минимальными затратами.

В таблице 4.7 и на рисунках 4.9 – 4.13 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.

Таблица 4.7 – Сравнительный анализ фактических и расчетных значений химического состава алюминиевого сплава марки АЛ6

№ плавки	Тип	Fe(max)	Si(max)	Ti(max)	Al(min)	Cu(max)	Zn(max)	Mn(max)	Mg(max)	Pb(max)	Sn(max)
-	заданное	1,5	6	0,25	91,9	3	0,3	0,3	0,1	0,25	0,25
1	факт	0,271	4,58	0,096	92,41	2,41	0,242	0,074	0,44	0,087	0,195
	расчет	0,334	3,93	0,106	92,83	2,08	0,189	0,043	0,324	0,097	0,097
2	факт	0,271	4,4	0,096	92,13	2,355	0,2145	0,074	0,363	0,087	0,195
	расчет	0,334	3,82	0,106	92,62	1,96	0,164	0,043	0,214	0,097	0,097
3	факт	0,271	4,7	0,096	91,99	2,458	0,2185	0,074	0,28	0,087	0,195
	расчет	0,334	4,1	0,106	92,66	2,08	0,18	0,043	0,1	0,097	0,097
4	факт	0,271	5	0,096	92,1	2,568	0,2474	0,074	0,357	0,087	0,195
	расчет	0,334	4,32	0,106	92,49	2,23	0,193	0,043	0,132	0,097	0,097
5	факт	0,271	4,9	0,096	92,34	2,41	0,2353	0,074	0,291	0,087	0,195
	расчет	0,334	4,4	0,106	92,87	2,18	0,203	0,043	0,1	0,097	0,097
6	факт	0,271	5,12	0,096	92,06	2,588	0,2243	0,074	0,352	0,087	0,195
	расчет	0,334	4,51	0,106	93	2,26	0,196	0,043	0,192	0,097	0,097
7	факт	0,271	4,53	0,096	92,43	2,677	0,2133	0,074	0,313	0,087	0,195
	расчет	0,334	4,08	0,106	92,72	2,35	0,182	0,043	0,148	0,097	0,097
8	факт	0,271	4,4	0,096	92,28	2,657	0,2295	0,074	0,28	0,087	0,195
	расчет	0,334	3,88	0,106	92,98	2,46	0,2	0,043	0,159	0,097	0,097
9	факт	0,271	4,77	0,096	92,45	2,629	0,2324	0,074	0,319	0,087	0,195
	расчет	0,334	3,97	0,106	92,92	2,29	0,204	0,043	0,209	0,097	0,097
10	факт	0,271	4,65	0,096	92,52	2,54	0,237	0,074	0,484	0,087	0,195
	расчет	0,334	3,54	0,106	92,81	2,33	0,212	0,043	0,352	0,097	0,097

Из рисунков видно, что расчетные значения таких элементов как *Al*, *Fe*, *Si*, *Cu*, *Zn* ниже фактических, но при этом попадают в заданные пределы по технологической инструкции, а расчетное содержание алюминия превышает фактическое.

Пределы по содержанию алюминия согласно технологической инструкции часто заданы только нижним значением, поэтому повышенное содержание алюминия не является нарушением для некоторых марок алюминиевых сплавов, если при этом не указаны конкретные границы диапазона значений, иначе это будет учитываться в ограничениях и последующих расчетах.

За счет оптимального выбора масс алюминия-сырца из литейных ковшей, снижения расходов лигатур и флюсов в результате поиска оптимального решения достигается не только положительный экономический эффект, но и сокращается время выполнения технологических операций и повышается производительность

литейного отделения. На рисунке 4.14 приведен пример циклограммы литейного сплава АД31, приготовленного на предприятии АО «РУСАЛ Новокузнецк».

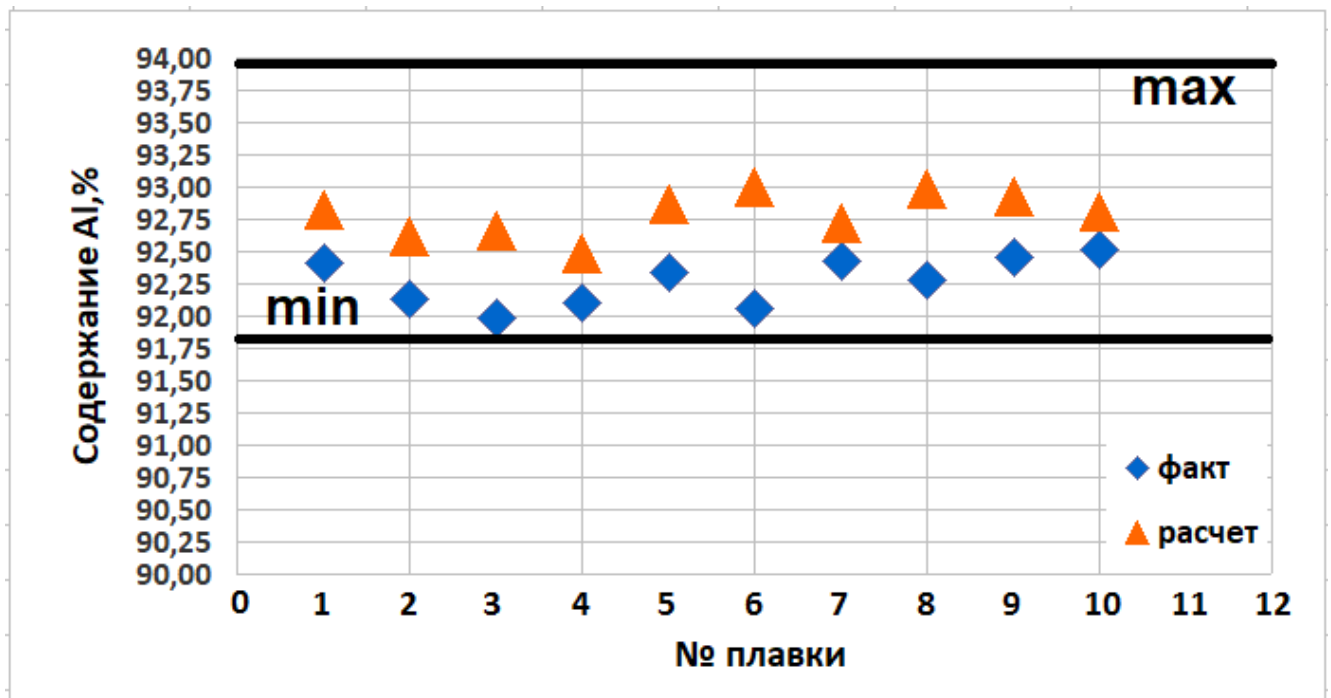


Рисунок 4.9 – Корреляционное поле фактических и расчетных значений содержания  $Al$  в расплаве марки АЛ6

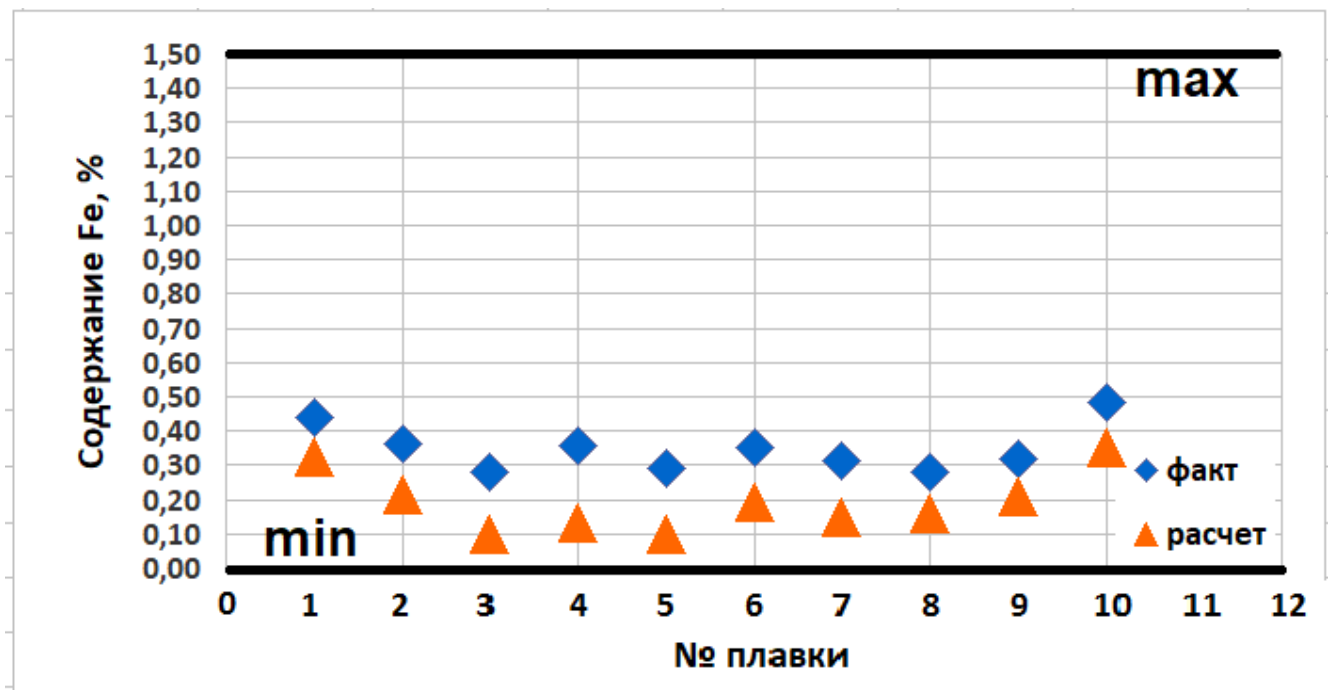


Рисунок 4.10 – Корреляционное поле фактических и расчетных значений содержания  $Fe$  в расплаве марки АЛ6



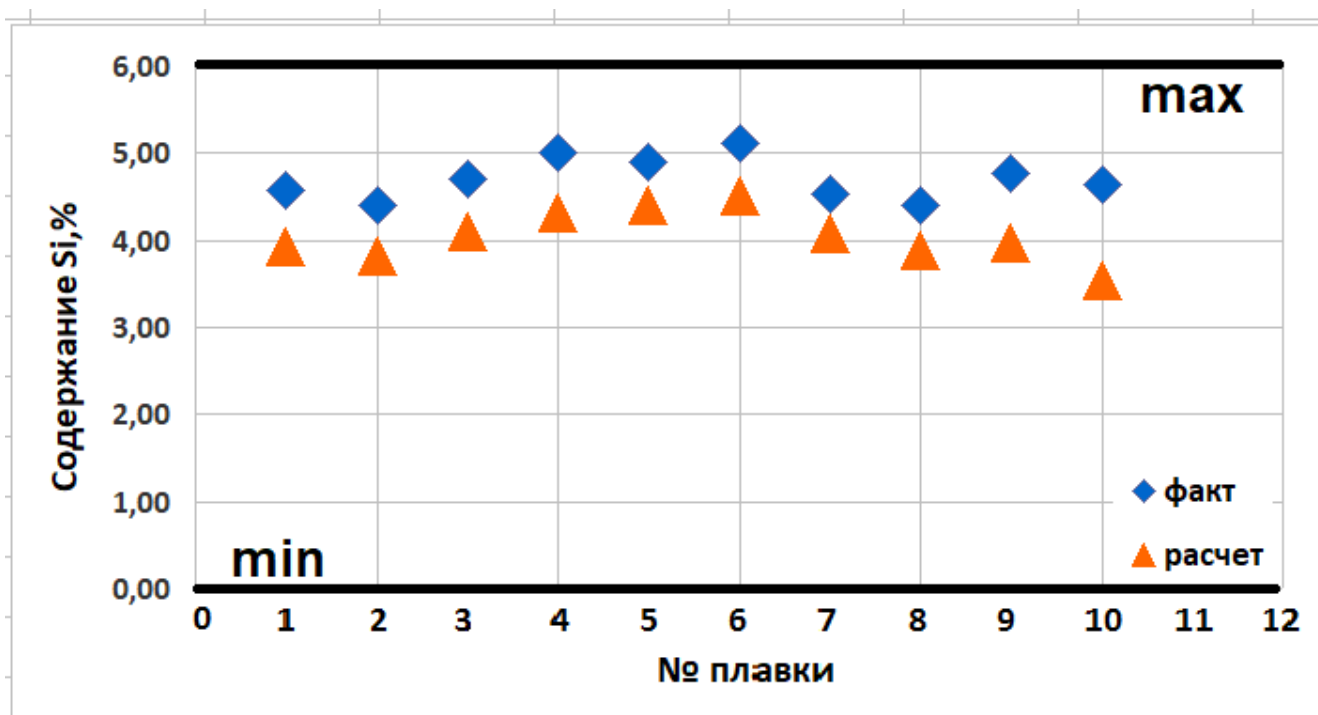


Рисунок 4.11 – Корреляционное поле фактических и расчетных значений содержания  $Si$  в расплаве марки АЛ6

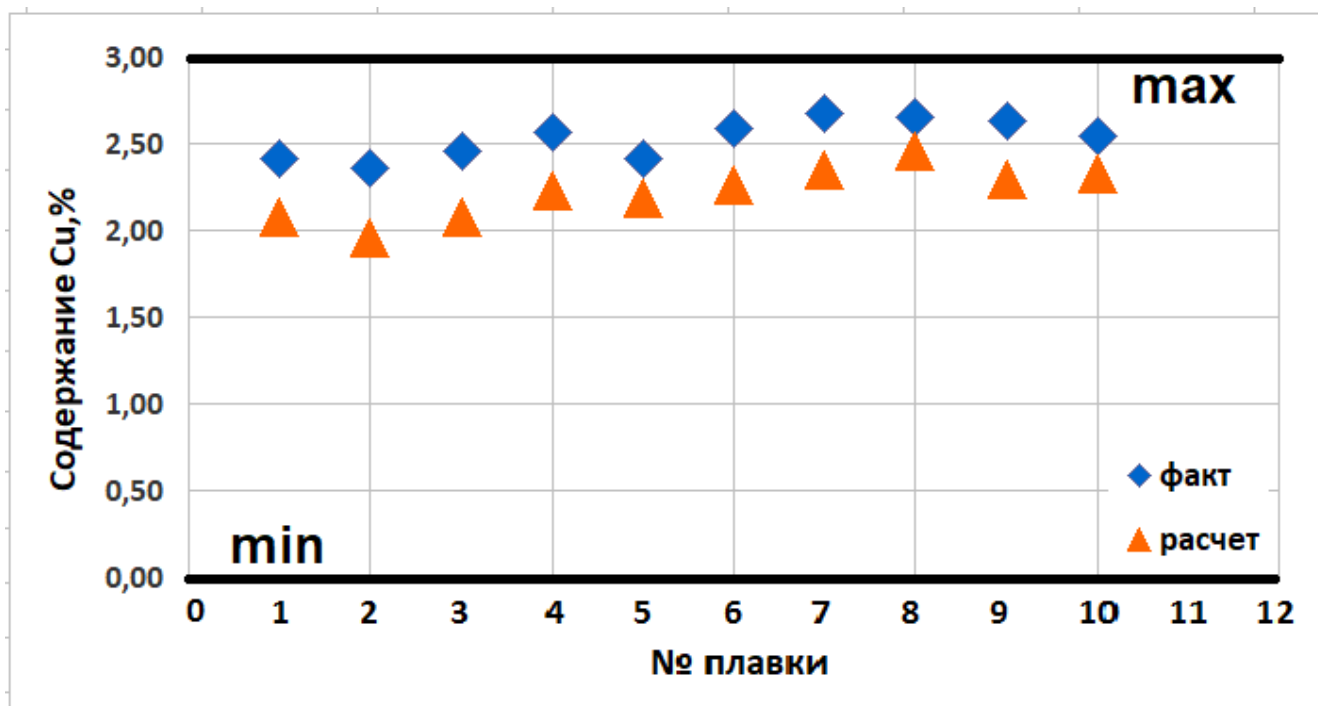


Рисунок 4.12 – Корреляционное поле фактических и расчетных значений содержания  $Cu$  в расплаве марки АЛ6

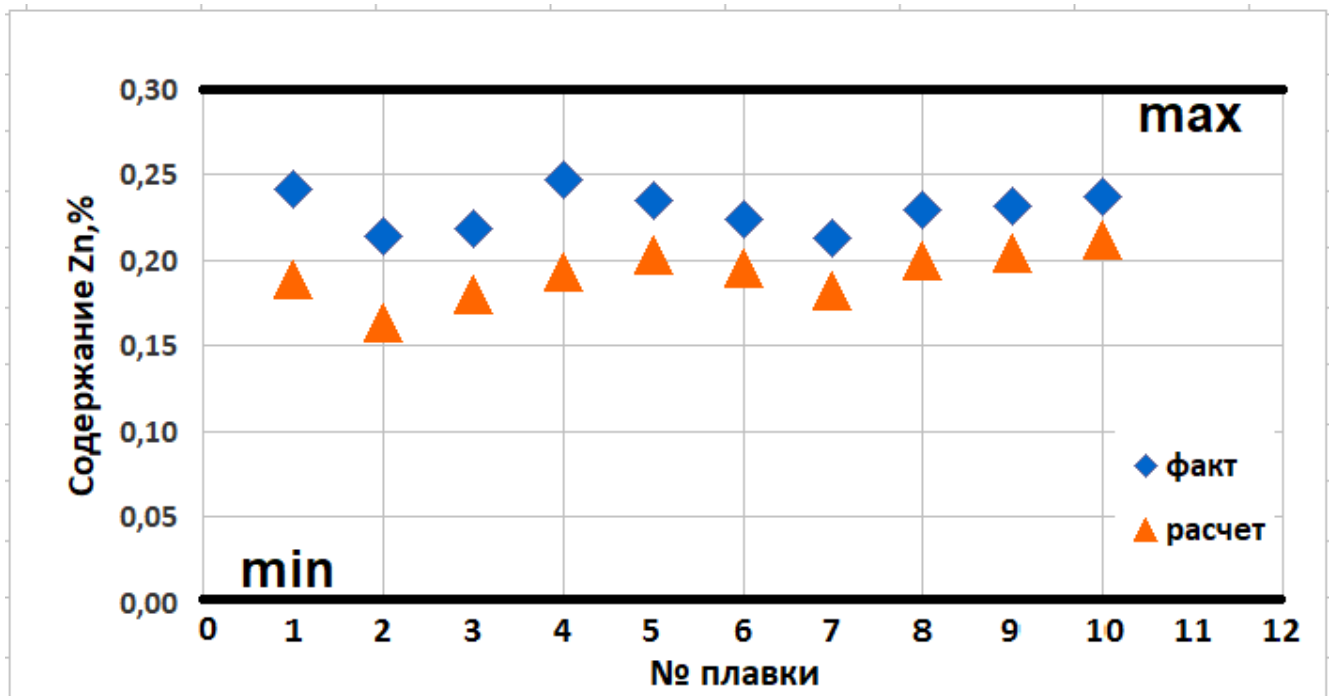


Рисунок 4.13 – Корреляционное поле фактических и расчетных значений содержания Zn в расплаве марки АЛ6

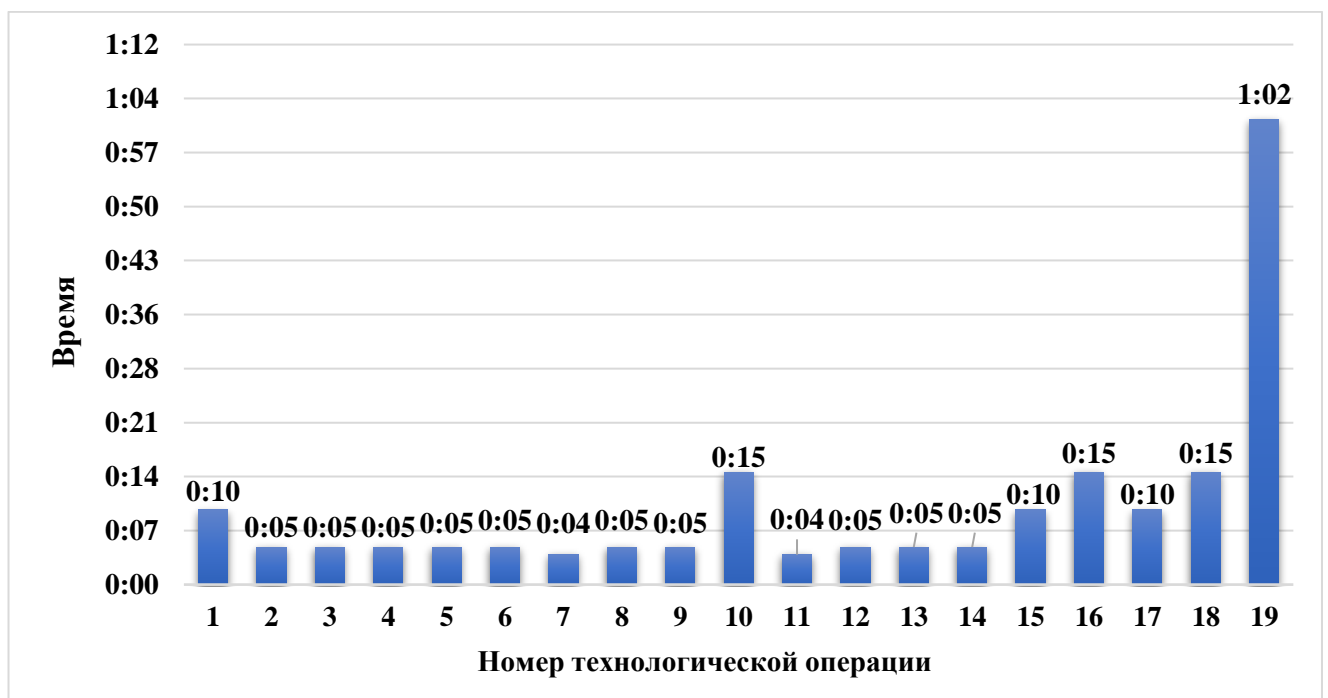


Рисунок 4.14 – Циклограмма производства марки сплава АД31 (факт)

Общее время приготовления расплава составило 3 часа 55 минут. Формирование сплава производилось с применением 19 технологических операций:

- подготовка миксера (10 мин);

- заливка 1-го литейного ковша (5 мин);
- загрузка лигатур Si или Mn (5 мин);
- заливка 2-го литейного ковша (5 мин);
- заливка 3-го литейного ковша (5 мин);
- заливка 4-го литейного ковша (5 мин);
- загрузка лигатуры Mg (4 мин);
- заливка 5-го литейного ковша (5 мин);
- заливка 6-го литейного ковша (5 мин);
- отбор пробы на химический анализ (15 мин);
- загрузка лигатуры Mg (4 мин);
- заливка 7-го литейного ковша (5 мин);
- заливка 8-го литейного ковша (5 мин);
- МГД-перемешивание расплава (5 мин);
- флюсование (10 мин);
- отбор пробы на химический анализ (15 мин);
- отстой расплава (10 мин);
- снятие шлака с поверхности расплава (15 мин);
- литье расплава в слитки (62 мин).

С использованием программного комплекса «Алюминщик» при расчете оптимальных параметров формирования алюминиевого расплава количество технологических операций сократилось до 16, а время приготовления расплава с заданным химическим составом сократилось на 24 минуты. Общее время приготовления расплава составило 3 часа 31 минута (рисунок 4.15). После реализации расчета определен следующий оптимальный режим процесса формирования алюминиевого сплава в миксере:

- подготовка миксера (10 мин);
- заливка 1-го литейного ковша (5 мин);
- заливка 2-го литейного ковша (5 мин);
- заливка 3-го литейного ковша (5 мин);

- заливка 4-го литейного ковша (5 мин);
- заливка 5-го литейного ковша (5 мин);
- заливка 6-го литейного ковша (5 мин);
- заливка 7-го литейного ковша (5 мин);
- заливка 8-го литейного ковша (5 мин);
- загрузка лигатуры Mg (4 мин);
- МГД-перемешивание расплава (5 мин);
- флюсование (10 мин);
- отбор пробы на химический анализ (15 мин);
- отстой расплава (10 мин);
- снятие шлака с поверхности расплава (15 мин).
- литье расплава в слитки (62 мин).

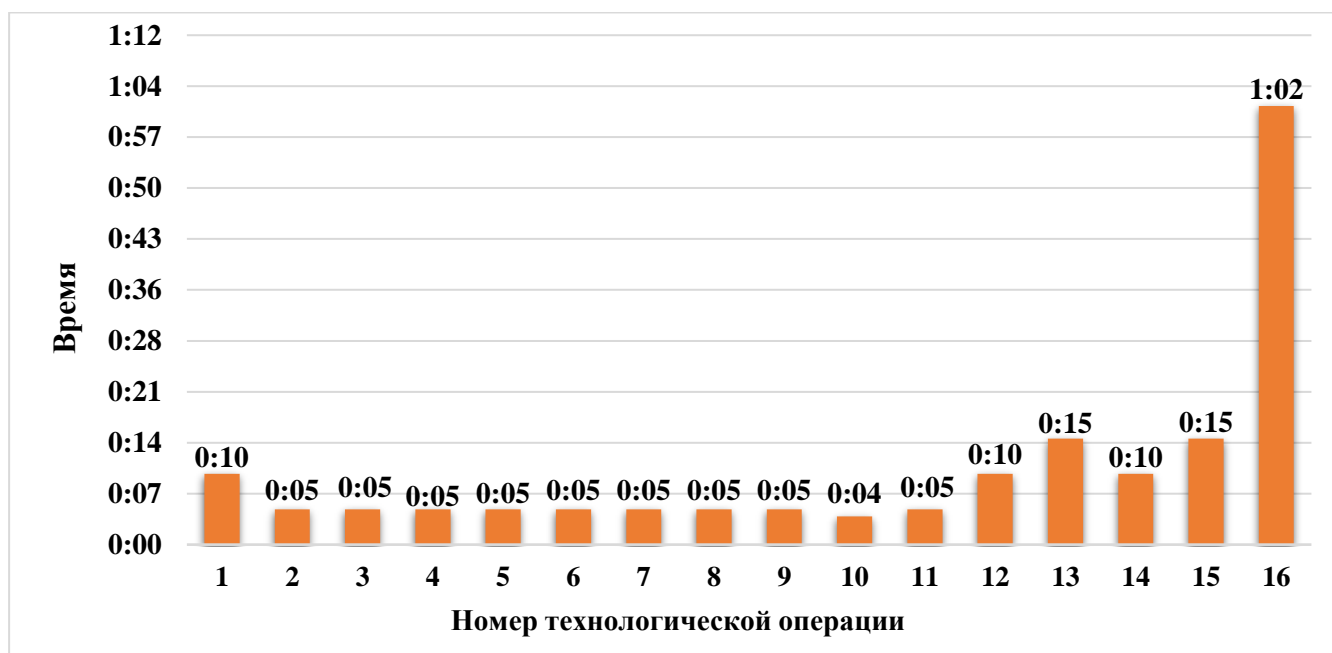


Рисунок 4.15 – Циклограмма оптимального режима приготовления сплава марки АД31 (расчет)

При воспроизведении фактических данных 250 плавов с использованием инструментов оптимизации разработанного программного комплекса «Алюминщик» построена гистограмма распределения по времени фактических и полученных оптимальных вариантов плавов (рисунок 4.16).

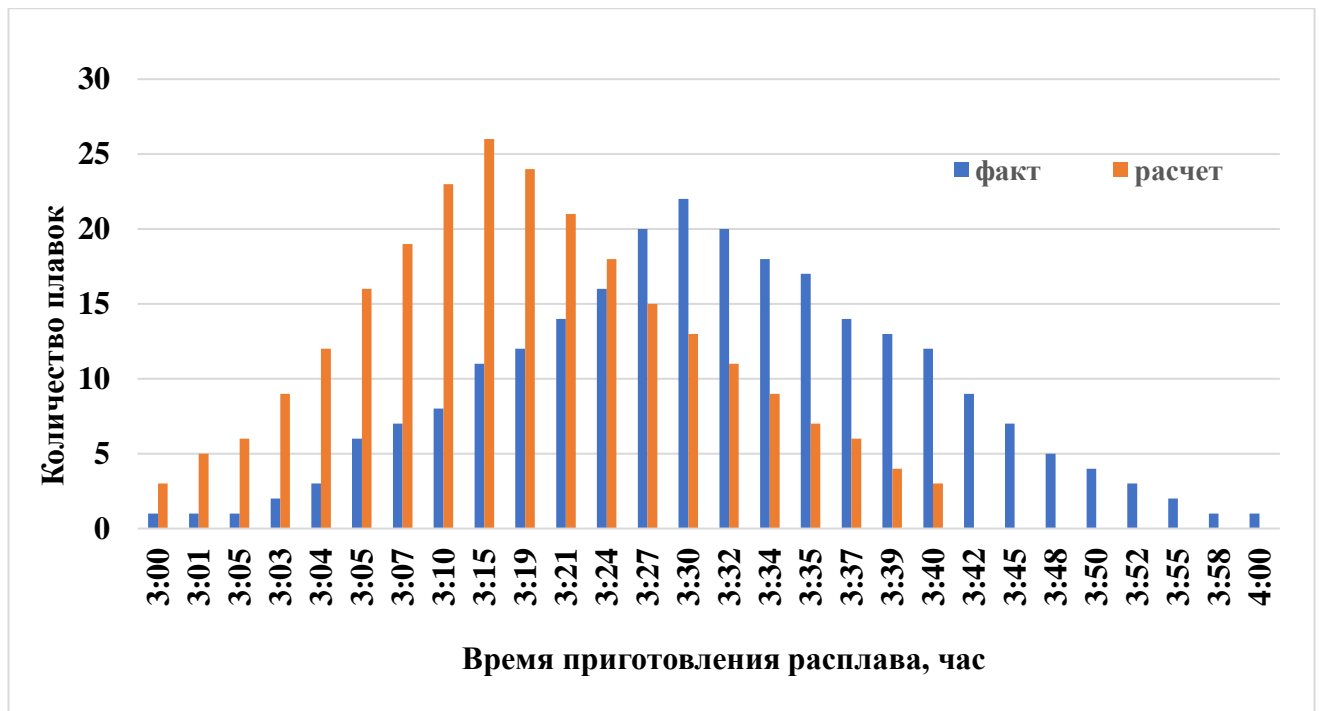


Рисунок 4.16 – Гистограмма распределения 250 фактических и расчетных данных плавов по времени

Гистограмма наглядно отображает уменьшение времени приготовления расплава примерно на 15 – 20 мин, что обеспечивает повышение производительности электрического миксера и получение положительного экономического эффекта.

Для оценки полученного экономического эффекта были рассчитаны следующие технические показатели работы электрического миксера при формировании сплава марки АД31 [148].

Фактическое время работы миксера литейного отделения можно оценить следующим образом:

$$\Phi B_{\text{общее}} = KB - (KP + TP + ППР + НВ), \quad (4.1)$$

где  $\Phi B_{\text{общее}}$  – общее фактическое время работы оборудования, сут.;

$KB$  – календарное время, сут.;

$KP$  – капитальный ремонт, сут.;

$TP$  – технологические простои, сут.;

$ППР$  – время планово-производственного ремонта, сут.;

$НП$  – непредвиденные простои, сут.

Календарное время работы миксера составляет  $365 \text{ сут.} \times 24 \text{ ч} = 8760 \text{ ч}$ , за исключением времени капитального ремонта  $30 \text{ сут.} \times 24 \text{ ч} = 720 \text{ ч}$ , а также с учетом планово-предупредительного ремонта в размере 24 ч, технологического простоя и непредвиденного простоя 24 и 120 ч соответственно. В результате общее фактическое время работы миксера составляет 7872 ч/год.

Тогда производительность миксера можно оценить по следующей формуле:

$$P_{\text{сп}} = \Phi B \cdot V_{\text{пригот.распл}}, \quad (4.2)$$

где  $P_{\text{сп}}$  – количество произведенного расплава в сутки, т;

$\Phi B$  – фактическое время работы оборудования, сутки;

$V_{\text{пригот. распл}}$  – объем приготовленного расплава за одну миксер-плавку.

Установлено, что в среднем за одну миксер-плавку за вычетом «болота» получается примерно 20 т расплава. Также если учесть, что циклограмма прогнозирует время приготовления расплава за 3 ч 55 мин, то суточную производительность миксера емкостью 25 т следует оценить как 120 т/сут:

$$P_{\text{сп}} = \frac{24}{4} * 20 = 120 \frac{\text{т}}{\text{сутки}}. \quad (4.3)$$

В таком случае годовая производительность электрического миксера сопротивления за 328 рабочих дней составит 39360 т/год.

При уменьшении времени приготовления расплава в среднем на 15 мин, производительность миксера повышается примерно до 137 т/сут:

$$P_{\text{сп}} = \frac{24}{3,5} * 15 = 137 \frac{\text{т}}{\text{сутки}}. \quad (4.4)$$

Повышенная производительность миксера позволит осуществлять приготовление сплавов в объеме 44936 т/год вместо 39360 т/год. Получается, что разница с неоптимальным вариантом плавки составляет дополнительно 5576 т для одного электрического миксера в год.

Так, за 2021 год средняя маржинальная стоимость 1 т алюминиевого сплава

составляла 100 \$. С учетом принятия курса доллара ~73 руб, можно рассчитывать на дополнительную прибыль предприятия в размере  $5576 \text{ т} \times 100 \$ = 557600 \$$  или 40,7 млн. руб для одного миксера в год.

Вместе с тем, 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 %.

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

#### **4.4 Выводы к главе 4**

1. Представлены результаты проверки адекватности разработанной математической модели на основе сравнительного анализа фактических данных, взятых на предприятии АО «РУСАЛ Новокузнецк» и модельных данных, полученных с использованием программного комплекса «Алюминщик».

2. С использованием программного комплекса «Алюминщик» проведены исследования динамики изменения концентраций компонентов формируемого сплава при последовательном добавлении алюминия-сырца из литейных ковшей с учетом присадок лигатур и флюсов.

3. Приведен пример решения технологической задачи с использованием функциональных возможностей разработанной системы «Алюминщик».

4. Проведен сравнительный анализ фактических и расчетных данных, который показал возможность оптимального выбора масс алюминия-сырца из литейных ковшей и снижения расходов шихтовых материалов при попадании в границы задания по химическому составу для различных алюминиевых сплавов. Полученный экономический эффект оценивается в 40,7 млн. руб в год.



## 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 Metallургия 09.03.01 Информатика и вычислительная техника; 09.03.03 Прикладная информатика.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щелканова, Е. Элемент №13 / Е. Щелканова, Н. Еремина, В. Кузьминых. – Красноярск: Изд-во «Поликор». – 2015. – 144 с.
2. Арановский, И. М. Как создавалась алюминиевая промышленность СССР / И. М. Арановский. – М.: Изд-во «Национальное обозрение». – 2010. – 240 с.
3. Равдель, А. А. Краткий справочник физико-химических величин / А. А. Равдель, А. М. Пономарева. – СПб.: Изд-во «Специальная литература». – 1983. – 232 с.
4. Хетч, Дж. Е. Алюминий. Свойства и физическое металловедение / Дж. Е. Хетч. – М.: Изд-во «Металлургия». – 1989. – 421 с.
5. История алюминиевой отрасли [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://aluminiumleader.ru/history/industry\\_history](https://aluminiumleader.ru/history/industry_history), свободный (дата обращения 01.05.2022).
6. Юсфин, Ю. С. Новые процессы получения металла / Ю. С. Юсфин, А. А. Гиммельфарб, Н. Ф. Пашков. – М.: Изд-во «Металлургия». – 1994. – 320 с.
7. Ахметов, Н. С. Общая и неорганическая химия / Н. С. Ахметов. – М.: Изд-во «Высшая школа». – 2001. – 743 с.
8. Чукин, Г. Д. Строение оксида алюминия и катализаторов гидрообессеривания. Механизмы реакций / Г. Д. Чукин. – М.: Изд-во «Принта». – 2010. – 288 с.
9. Колачев, Б. Д. Основы физики металлов / Б. Д. Колачев. – М.: Изд-во «Машиностроение». – 1974». – 153 с.
10. Шанко, Ф. А. Структуры двойных сплавов / Ф. А. Шанко. – М.: Изд-во «Металлургия». – 1973. – 760 с.
11. Корнеев, В. И. Красные шламы / В. И. Корнеев, А. Г. Сусс, А. И. Цехова. – М.: Изд-во «Металлургия», 1991. – 144 с.
12. Зиновеев, Д. В. Обзор мировой практики переработки красных шламов. Пирометаллургические способы / Д. В. Зиновеев, П. И. Грудинский, В. Г. Дюбанов, Л. В. Коваленко, Л. И. Леонтьев // Известия высших учебных заведений. Черная

металлургия, 2018. – С. 843 – 858.

13. Пурденко, Ю. А. Алюминиевая промышленность России: состояние, проблемы и перспективы развития / Ю. А. Пурденко. – Иркутск: Изд-во «Вост. - Сиб. кн.». – 1997. – 136 с.

14. Шибистов, Б. В. Бокситы и железоалюминиевые руды / Б. В. Шибистов. – Красноярск: Изд-во «СФУ». – 2013. – С. 995 – 1002.

15. Кушнарев, Г. М. Минералы и горные породы / Г. М. Кушнарев. – Челябинск: Изд-во «ЮУрГУ». – 2007. – 70 с.

16. Рахманов, М. Л. Добыча алюминиевого сырья / М. Л. Рахманов, О. С. Ежова // Развитие технологий добычи полезных ископаемых. – М.: Изд-во «ЦЭПП». – 2019. – С. 129 – 162.

17. Галевский, Г. В. Технологические и конструктивные измерения и расчеты в производстве алюминия / Г. В. Галевский, М. Я. Минцис, В. В. Руднева. – М.: Изд-во «ФЛИНТА». – 2017. – 218 с.

18. Тихонов, Н. Н. Перспективы развития технологических процессов глиноземного производства / Н. Н. Тихонов. – СПб.: Изд-во «ВАМИ». – 1992. – 144 с.

19. Логинова, И. В. Технология производства глинозема / И. В. Логинова, А. В. Кырчиков, Н. П. Пенюгалова. – Екатеринбург: Изд-во «Уральского университета». – 2015. – 336 с.

20. Галевский, Г. В. Metallургия алюминия. Мировое и отечественное производство: оценка, тенденции, прогнозы / Г. В. Галевский, Н. М. Кулагин, М. Я. Минцис. – М.: Изд-во «Флинта». – 2004. – 278 с.

21. Янко, Э. А. Производство алюминия / Э. А. Янко. – СПб.: Изд-во «СпбГУ». – 2007. – 305 с.

22. Б. М. Горенский. Информационные технологии в управлении технологическими процессами цветной металлургии / Б. М. Горенский, О. В. Кирякова, Л. А. Лапина. – Красноярск: Изд-во «Сиб. Фед. ун-т». – 2012. – 148 с.

23. Степанов, В. С. Термодинамические исследования металлургических процессов: энергетические балансы, эксергетический анализ. – Иркутск: Изд-во

«ИрГТУ». – 2006. – 380 с.

24. Тихонов, В. Н. Аналитическая химия алюминия / В. Н. Тихонов. – М.: Изд-во «Наука». – 1971. – 266 с.

25. Сраго, И. А. Основы электрохимии / И. А. Сраго, Г. С. Зенин. – Спб.: Изд-во «СЗТУ». – 2005. – 45 с.

26. Истомина, Н. В. Оборудование электрохимических производств / Н. В. Истомина, Н. Г. Сосновская, Е. Н. Ковалюк. – Ангарск: Изд-во «АГТА». – 2010. – 100 с.

27. Сосновский, Г. Н. Электролитическое получение металлических порошков и электролиз расплавленных сред / Г. Н. Сосновский, Н. Г. Сосновская. – Ангарск: Изд-во «АГТА». – 2006. – 91 с.

28. Крюковский, В. А. Перспективы производства алюминия - переход на обожженные аноды / В. А. Крюковский // Цветные металлы. – 2008. – №4. – С. 49 – 51.

29. Вольфсон, Г. Е. Производство алюминия в электролизерах с обожженными анодами / Г. Е. Вольфсон, В. П. Ланкин. – М.: Metallurgy. – 1974. – 136 с.

30. Галевский, Г. В. Metallurgy алюминия. Влияние электролитического производства алюминия на окружающую среду / Г. В. Галевский, М. Я. Минцис, Г. А. Сиразутдинов. – Новокузнецк: Изд-во «СибГИУ». – 2011. – 231 с.

31. Бузунов, В. Ю. Технические аспекты экологической безопасности алюминиевого производства / В. Ю. Бузунов, Б. П. Куликов // Техничко-экономический вестник RUSAL. – 2005. – №11. – С. 5 – 14.

32. Бегунов, А. И. Проблемы модернизации алюминиевых электролизеров / А. И. Бегунов. – Иркутск: Изд-во «ИрГТУ». – 2000. – 105 с.

33. Галевский, Г. В. Экология и утилизация отходов в производстве алюминия / Г. В. Галевский, Н. М. Кулагин, М. Я. Минцис. – Новосибирск: Изд-во «Наука». – 1997. – 159 с.

34. Гринберг, И. С. Экология и безопасность в производстве алюминия / И. С. Гринберг – СПб.: Изд-во «МАНЭБ». – 2006. – 312 с.

35. Золоторевский, В. С. Metallоведение цветных металлов. Алюминиевые

сплавы / В. С. Золоторевский, Н. А. Белов. – М.: Изд-во «МИСиС». – 2000. – 147 с.

36. Белецкий, В. М. Алюминиевые сплавы. Состав, свойства, технология, применение / В. М. Белецкий, Г. А. Кривов. – К.: Изд-во «КОМИНТЕХ». – 2005. – 365 с.

37. Ри, Х. Современные технологии производства алюминиевых сплавов / Х. Ри, Э. Х. Ри, С. Н. Химухин, В. И. Якимов. – Хабаровск: Изд-во «ТОГУ». – 2015. – 131 с.

38. Беляев, А. И. Metalловедение алюминия и его сплавов / А. И. Беляев, О. С. Бочвар, Н. Н. Буйнов. – М.: Изд-во «Металлургия». – 1995. – 335 с.

39. Колобов, Г. А. Metalлургия цветных металлов / Г. А. Колобов, В. Н. Бредихин, Н. Л. Маняк, А. И. Шевелев. – Донецк: Изд-во «Кальмиус». – 2007. – 462 с.

40. Борисоглебский, Ю. В. Metalлургия алюминия / Г. В. Галевский, Н. М. Кулагин, М. Я. Минцис, Г. А. Сиразутдинов. – Новосибирск: Изд-во «Наука». – 2000. – 438 с.

41. Меркулова, Г. А. Metalловедение и термическая обработка цветных сплавов / Г. А. Меркулова. – Красноярск: Изд-во «СФУ». – 2008. – 320 с.

42. Беляев, А. И. Metalловедение алюминия и его сплавов / А. И. Беляев, О. С. Бочвар, Н. Н. Буйнов. – М.: Изд-во «Металлургия». – 1995. – 335 с.

43. Шеметев, Г. Ф. Алюминиевые сплавы: составы, свойства, применение / Г. Ф. Шеметев. – Спб.: Изд-во «СПбПУ». – 2012. – 155 с.

44. Макаров, Г. С. Рафинирование алюминиевых сплавов газами / Г. С. Макаров. – М.: Изд-во «Металлургия». – 1983. – 120 с.

45. Добаткин, В. И. Газы и окислы в алюминиевых деформируемых сплавах / В. И. Добаткин, Р. М. Габидулин, Б. А. Колачев, Г. С. Макаров. – М.: Изд-во «Металлургия». – 1976. – 264 с.

46. Беляев, А. И. Metalловедение алюминия и его сплавов / А. И. Беляев, О. С. Бочвар, Н. Н. Буйнов [и др.]. – М.: Изд-во «Металлургия». – 1983. – 280 с.

47. Воронцова, Л. А. Алюминий и алюминиевые сплавы в электротехнических изделиях / Л. А. Воронцова, В. В. Маслов, И. Б. Пешков. – М.: Изд-во «Энергия». –

1971. – 224 с.

48. Шкляр, М. С. Печи вторичной цветной металлургии / М. С. Шкляр. – М.: Изд-во «Металлургия». – 1987. – 217 с.

49. Ветюков, М. М. Электрометаллургия алюминия и магния / М. М. Ветюков, А. М. Цыплакова, С. Н. Школьников. – М.: Изд-во «Металлургия». – 1987. – 320 с.

50. Курдюмов, А. В. Флюсовая обработка и фильтрование алюминиевых расплавов / А. В. Курдюмов, С. В. Инкин, В. С. Чулков, Н. И. Графас. – М.: Изд-во «Металлургия». – 1980. – 196 с.

51. Дегтярь, В. А. Ковшовая обработка электролитического алюминия / В. А. Дегтярь, В. М. Федотов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2000. – №2. – С. 35 – 36.

52. Альтман, М. Б. Вакуумирование алюминиевых сплавов / М. Б. Альтман. – М.: Изд-во «Металлургия». – 1977. – 120 с.

53. Пихутин, И. А. Опыт применения огнеупорных бетонов для изготовления футеровки вакуумных и разливочных ковшей / И. А. Пихутин, А. Н. Захаров // Технико-экономический вестник «Русского Алюминия». – 2001. – №1. – С. 24 – 27.

54. Пивинский, Ю. Е. Керамические вяжущие и керамобетоны / Ю. Е. Пивинский. – М.: «Металлургия». – 1990. – 262 с.

55. Гришенков, Е. Е. Футеровка отражательных печей и миксеров для плавки и выдержки алюминиевых сплавов / Е. Е. Гришенков, В. М. Баранчиков, Г. А. Копытов [и др.] // Цветные металлы. – 1977. – № 6. – С. 76 – 78.

56. Мальков, М. А. Огнеупоры для алюминиевого производства / М. А. Мальков, И. Г. Дмитриев // Огнеупоры и техническая керамика. – 2000. – №6. – С. 35 – 41.

57. Панов, Е. Н. Тепловые процессы в электролизерах и миксерах алюминиевого производства / Е. Н. Панов, Г. Н. Васильченко, С. В. Даниленко [и др.]. – М.: Изд-во «Руда и металлы». – 1998. – 256 с.

58. Аксельрод, Л. М. Служба огнеупоров / Л. М. Аксельрод [и др.] – М.: Изд-во «Интермет Инжиниринг». – 2002. – 656 с.

59. Тереньтев, В. Г. Производство алюминия / В. Г. Тереньтев, Р. М. Школьников, И. С. Гринберг, А. Е. Черных, Б. И. Зельберг, В. И. Чалых. – Иркутск.: Изд-во «Папирус-АРТ». – 1998. – 350 с.
60. Купряков, Ю. П. Производство тяжелых цветных металлов из лома и отходов / Ю. П. Купряков. – Харьков: Изд-во «Основа». – 1992. – 399 с.
61. Александрова, Э. А. Аналитическая химия / Э. А. Александрова, Н. Г. Гайдукова. – М.: Изд-во «Юрайт». – 2019. – 533 с.
62. Гопиенко, В. Г. Металлические порошки алюминия, магния, титана и кремния / В. Г. Гопиенко, С. Ю. Петрович, В. П. Черепанов, А. К. Ярмолович [и др.]. – СПб.: Изд-во «Политехнический университет». – 2012. – 356 с.
63. Шмитц, К. Рециклинг алюминия / К. Шмитц. – М.: Изд-во «АЛЮСИЛ МВиТ». – 2008. – 509 с.
64. Шеметев, Г. Ф. Алюминиевые сплавы: составы, свойства, применение / Г. Ф. Шеметев. – СПб.: Изд-во «СПбПУ». – 2012. – 155 с.
65. Напалков, В. И. Легирование и модифицирование алюминия и магния / В. И. Напалков. – М.: Изд-во «МИСиС». – 2002. – 376 с.
66. Курдюмов, А. В. Производство отливок из сплавов цветных металлов / А. В. Курдюмов. – М.: Изд-во «МИСиС». – 2011. – 615 с.
67. Остерманн, Ф. Технология применения алюминия / Ф. Остерманн. – М.: Изд-во «НП АПРАЛ». – 2019. – 872 с.
68. Степанова, Т. Н. Основы получения отливок из сплавов цветных металлов / Т. Н. Степанова, Т. Р. Гильманшина, В. А. Падалка. – Красноярск: Изд-во «СФУ». – 2016. – 80 с.
69. Тихонов, В. Н. Аналитическая химия алюминия / В. Н. Тихонов. – М.: Изд-во «Наука». – 1971. – 266 с.
70. Троицкий, И. А. Металлургия алюминия / И. А. Троицкий, В. А. Железнов. – М.: Изд-во «Металлургия». – 1984. – 400 с.
71. Савицкий, Е. М. Металловедение редкоземельных металлов / Е. М.



Савицкий, В. Ф. Терехова. – М.: Изд-во «Наука». – 1975. – 271 с.

72. Гини, Э. Ч. Технология литейного производства. Специальные виды литья / Э. Ч. Гини, А. М. Зарубин, В. А. Рыбкин. – М.: Изд-во «Академия». – 2005. – 352 с.

73. Елагин, В. И. Проблемы металлургии легких и специальных сплавов / В. И. Елагин, В. В. Захаров, Т. Д. Ростова. – М.: Изд-во «ВИЛС». – 1991. – 376 с.

74. Напалков, В. И. Плавление и литье алюминиевых сплавов / В. И. Напалков, В. Ф. Фролов, В. Н. Баранов [и др.]. – Красноярск: Изд-во «Сиб. федер. ун-т». – 2020. – 716 с.

75. Спирин, Н. А. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП / Н. А. Спирин, В. В. Лавров, В. Ю. Рыболовлев [и др.]. – Екатеринбург: Изд-во «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина». – 2014. – 462 с.

76. Элементы теории систем и численные методы моделирования процессов тепломассопереноса. Учебник для студентов металлургических и политехнических специальностей вузов / В. С. Швыдкий, Н. А. Спирин, М. Г. Ладыгичев [и др.]. – М.: Изд-во «Интермет Инжиниринг». – 1999. – 520 с.

77. Осипова, В. А. Повышение эффективности обучения операторов технологических процессов на базе компьютерных тренажеров / Системы. Методы. Технологии // В. А. Осипова, Г. Б. Даныкина. – 2011. – №3. – С. 106 – 114.

78. Горенский, Б. М. Информационные технологии в металлургии / Б. М. Горенский, О. В. Кирякова, Г. Б. Даныкина. – Красноярск: Изд-во «ИЦМиЗ СФУ». – 2007. – 118 с.

79. Горенский, Б. М. Информационные технологии в управлении технологическими процессами цветной металлургии / Б. М. Горенский, О. В. Кирякова, С. В. Ченцов, Л. А. Лапина. – Красноярск: Изд-во «СФУ». – 2012. – 148 с.

80. Громов, Б. С. Электрометаллургия кремния и алюминия / Б. С. Громов, Р. В. Пак, В. И. Скорняков, А. Р. Школьников [и др.] – СПб.: Изд-во «МАНЭБ». – 2000. – 513 с.

81. Дембовский, В. В. Компьютерные технологии в металлургии и литейном

производстве / В. В. Дембовский. – СПб.: Изд-во «СЗТУ». – 2003. – 145 с.

82. Обзор литейных программ [Электронный ресурс]: MagmaSoft – Режим доступа: <http://lvmflow.ru/liteinie-programmi/obzor-liteynyih-programm/magmasoft/>, свободный (дата обращения: 05.05.2022).

83. Обзор литейных программ [Электронный ресурс]: WinCast SimTec – Режим доступа: <http://lvmflow.ru/liteinie-programmi/obzor-liteynyih-programm/wincast/>, свободный (дата обращения: 05.05.2022).

84. Обзор литейных программ [Электронный ресурс]: SolidCast Finite Solutions Inc – Режим доступа: <http://lvmflow.ru/liteinie-programmi/obzor-liteynyih-programm/solidcast/>, свободный (дата обращения: 05.05.2022).

85. Все о моделировании литейных процессов [Электронный ресурс]: ProCast – Режим доступа: <https://castsoft.ru/programs/procast/>, свободный (дата обращения: 05.05.2022).

86. Обзор литейных программ [Электронный ресурс]: LVMFlow – Режим доступа: <http://lvmflow.ru/lvmflow/>, свободный (дата обращения: 05.05.2022).

87. Вороненко, Б. А. Введение в математическое моделирование / Б. А. Вороненко, А. Г. Крысин, В. В. Пеленко, О. А. Цуранов. – СПб.: Изд-во «НИУ ИТМО». – 2014. – 44 с.

88. Агеев, Н. Г. Моделирование процессов и объектов в металлургии / Н. Г. Агеев. – Екатеринбург.: Изд-во «УрФУ». – 2016. – 108 с.

89. Лаврентьев, Г. В. Инновационные обучающие технологии в профессиональной подготовке специалистов / Г. В. Лаврентьев, Н. Б. Лаврентьева, Н. А. Неудачина. – Барнаул: Изд-во «АГТУ». – 2009. – 203 с.

90. Семакин, И. Г. Программирование, численные методы и математическое моделирование / И. Г. Семакин, О. Л. Русакова, Е. Л. Тарунин, А. П. Шкарапута. – М.: Изд-во «КноРус». – 2017. – 298 с.

91. Рейзлин, В. И. Математическое моделирование / В. И. Рейзлин. – М.: Изд-во «Юрайт». – 2016. – 128 с.

92. Федоткин, И. М. Математическое моделирование технологических про-

цессов / И. М. Федоткин. – М.: Изд-во «Ленанд». – 2015. – 416 с.

93. Юдович, В. И. Математические модели естественных наук / В. И. Юдович. – М.: Изд-во «Лань». – 2011. – 336 с.

94. Мугинова, Г. Р. Сборник технологических задач и методика их решения / Г. Р. Мугинова, Л. В. Рыжова. – Екатеринбург: Изд-во «РГППУ». – 2009. – 117 с.

95. Юмагулов, М. Г. Введение в теорию динамических систем / М. Г. Юмагулов. – М.: Изд-во «Лань». – 2015. – 272 с.

96. Павловский, Ю. Н. Компьютерное моделирование / Ю. Н. Павловский, Н. В. Белотелов, Ю. И. Бродский. – М.: Изд-во «Физматкнига». – 2014. – 304 с.

97. 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.

98. Вержбицкий, В. М. Основы численных методов / В. М. Вержбицкий. – М.: Изд-во «Высшая школа». – 2002. – 840 с.

99. Глазырина, Л. Л. Введение в численные методы / Л. Л. Глазырина, М. М. Карчевский. – Казань: Изд-во «КУ». – 2017. – 122 с.

100. Бахвалов, Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – М.: Изд-во «БИНОМ». – 2008. – 636 с.

101. Колдаев, В. Д. Численные методы и программирование / В. Д. Колдаев. – М.: Изд-во «Форум». – 2009. – 336 с.

102. Дегтярев, А. А. Метод конечных разностей / А. А. Дегтярев. – Самара: Изд-во «СГАУ». – 2011. – 83 с.

103. Меркулова, Н. Н. Разностные схемы для обыкновенных дифференциальных уравнений / Н. Н. Меркулова, М. Д. Михайлов. – Томск: Изд-во «ТГУ». – 2014. – 122 с.

104. Ребро, И. В. Дифференциальные уравнения / И. В. Ребро, С. Ю. Кузьмин,

- Н. Н. Короткова, Д. А. Мустафина. – Волгоград: Изд-во «ВолгГТУ». – 2006. – 64 с.
105. Емельянов, С. В. Информационные технологии и вычислительные системы / С. В. Емельянов. – М.: Изд-во «Ленанд». – 2015. – 96 с.
106. Митришкин, Ю. В. Линейные математические модели динамических систем с управлением / Ю. В. Митришкин. – М.: Изд-во «Ленанд». – 2019. – 464 с.
107. Кулаичев, А. П. Методы и средства комплексного анализа данных / А. П. Кулаичев. – М.: Изд-во «ИНФРА-М». – 2017. – 512 с.
108. Петрунин, Ю. Ю. Информационные технологии анализа данных / Ю. Ю. Петрунин. – М.: Изд-во «КДУ». – 2010. – 292 с.
109. Спирин, Н. А. Оптимизация и идентификация технологических процессов в металлургии / Н. А. Спирин, В. В. Лавров, С. И. Паршаков, С. Г. Денисенко. – Екатеринбург: Изд-во «ГОУ ВПО УГТУ-УПИ». – 2006. – 307 с.
110. Витязь, П. А. Пути повышения эффективности литейных производств Республики Беларусь / П. А. Витязь, А. В. Толстой // Литье и металлургия. – 2019. – №4. – С. 81 – 89.
111. Дембовский, В. В. Компьютерные технологии в металлургии и литейном производстве / В. В. Дембовский. – СПб: Изд-во «СЗТУ». – 2003. – 145 с.
112. Коган, Д. И. Динамическое программирование и дискретная многокритериальная оптимизация / Д. И. Коган. – Н. Новгород: Изд-во «Нижегородский университет». – 2004. – 150 с.
113. Уткин, Н. И. Производство цветных металлов / Н. И. Уткин. – М.: Изд-во «Интермет инжиниринг». – 2004. – 442 с.
114. Глазырина, Л. Л. Введение в численные методы / Л. Л. Глазырина, М. М. Карчевский. – Казань: Изд-во «Казан. ун-т». – 2017. – 122 с.
115. Бахвалов, Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – М.: Изд-во «БИНОМ». – 2008. – 636 с.
116. Колдаев, В. Д. Численные методы и программирование / В. Д. Колдаев. – М.: Изд-во «ФОРУМ». – 2009. – 336 с.
117. Болотникова, О. В. Линейное программирование: симплекс метод и двой-

ственность / О. В. Болотникова, Д. В. Тарасов, Р. В. Тарасов. – Пенза: Изд-во «ПГУ». – 2015. – 84 с.

118. Вержбицкий, В. М. Основы численных методов / В. М. Вержбицкий. – М.: Изд-во «Высшая школа». – 2002. – 840 с.

119. 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.

120. 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 Российской Федерации Ю. Г. Ярошенко. – 2017. – С. 224 – 229.

121. Спирин, Н. А. Информационные технологии в металлургии / Н. А. Спирин, В. В. Лавров. – Екатеринбург.: Изд-во «УГТУ». – 2004. – 495 с.

122. Троелсен, Э. Библиотека программиста: C# и платформа .NET / Э. Троелсен. – СПб.: Изд-во «Питер». – 2017. – 800 с.

123. Албахари, Д. Полное описание языка C#: справочник по руководству пользования / Д. Албахари, Б. Албахари. – М.: Изд-во «Вильямс». – 2017. – 1040 с.

124. Касперски, К. Техника отладки программ без исходных текстов / К. Касперски. – СПб.: Изд-во «БХВ-Петербург». – 2005. – 832 с.

125. Виссер, Дж. Разработка обслуживаемых программ на языке C# / Дж. Виссер. – М.: Изд-во «Пресс». – 2017. – 192 с.

126. Гостев, И. М. Операционные системы / И. М. Гостев. – М.: Изд-во «Юрайт». – 2020. – 164 с.

127. Вайсфельд, М. Объектно-ориентированное мышление / М. Вайсфельд. – СПб.: Изд-во «Питер». – 2014. – 304 с.

128. Блюмин, А. М. Мировые информационные ресурсы / А. М. Блюмин, Н. А. Феоктистов. – М.: Изд-во «Дашков и К». – 2015. – 680 с.
129. 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, И. А. Рыбенко, В. Н. Буинцев // Вестник томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2021. – №57. – С. 1 – 9.
130. Ясницкий, Л. Н. Интеллектуальные системы / Л. Н. Ясницкий. – М.: Изд-во «Лаборатория знаний». – 2016. – 224 с.
131. Купер, А. Об интерфейсе профессионально / А. Купер, Р. Рейман, Д. Кронин. – СПб.: Изд-во «Питер». – 2017. – 720 с.
132. Фофанов, О. Б. Алгоритмы и структуры данных / О. Б. Фофанов. – Томск: Изд-во «ТПУ». – 2014. – 123 с.
133. Миллер, Р. Последовательные и параллельные алгоритмы: Общий подход / Р. Миллер, Л. Боксер. – М.: Изд-во «Бином». – 2006. – 406 с.
134. Скиена, С. Руководство по разработке / С. Скиена. – СПб.: Изд-во «БХВ-Петербург». – 2011. – 720 с.
135. Кормен, Т. Алгоритмы. Построение и анализ / Т. Кормен, Ч. Лейзерон, Р. Ривест, К. Штайн. – М.: Изд-во «Вильямс». – 2013. – 1296 с.
136. Радченко, Г. И. Объектно-ориентированное программирование / Г. И. Радченко, Е. А. Захаров. – Челябинск: Изд-во «ЮУрГУ». – 2013. – 167 с.
137. Фаулер, М. Основы UML / М. Фаулер. – СПб.: Изд-во «Символ-Плюс». – 2005. – 192 с.
138. Розенберг, Д. Применение объектного моделирования с использованием UML и анализа прецедентов / Д. Розенберг. – М.: Изд-во «ДМК Пресс». – 2002. – 158 с.
139. Смит, Д. Элементарные шаблоны проектирования / Д. Смит. – М.: Изд-во «Вильямс». – 2013. – 304 с.

140. Гамма, Э. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования / Э. Гамма, Р. Хелм, Р. Джонсон, Д. Влиссидес. – СПб.: Изд-во «Питер». – 2009. – 366 с.
141. Тепляков, С. В. Паттерны проектирования на платформе .NET / С. В. Тепляков. – СПб.: Изд-во «Питер». – 2015. – 320 с.
142. Орлов, С. А. Теория и практика языков программирования / С. А. Орлов. – СПб.: Изд-во «Питер». – 2017. – 688 с.
143. Александрова, И. Л. Программирование на языке C# / И. Л. Александрова, Д. Н. Тумаков. – Казань: Изд-во «КГУ». – 2017. – 112 с.
144. Магда, Ю. С. Программирование последовательных интерфейсов / Ю. С. Магда. – СПб.: Изд-во «БХВ-Петербург». – 2009. – 304 с.
145. Фаронов, В. В. Создание приложений с помощью C#: Руководство программиста / В. В. Фаронов. – М.: Изд-во «Эксмо». – 2008. – 576 с.
146. Скит, Д. C# для профессионалов. Тонкости программирования / Д. Скит. – М.: Изд-во «Вильямс». – 2014. – 608 с.
147. Мартин, Р. Принципы, паттерны и методики гибкой разработки на языке C# / Р. Мартин, М. Мартин. – М.: Изд-во «Символ-Плюс». – 2011. – 768 с.
148. Складенко, В. К. Экономика предприятия / В. К. Складенко, В. М. Прудников. – М.: Изд-во «ИНФРА-М». – 2007. – 528 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

*Класс Mixer служит для обработки и хранения информации о технических характеристиках миксера*

```
[Serializable]
public List<Mixer> Mixer_M = new List<Mixer>();
public class Mixer
{
    private string Mixer_Name;
    private double Mixer_Capacity;
    private double Time_Work;
    private double Mixer_Temperature;
    private double Less_Mix_Capacity;
    private double Additional_Stock;
    private double Flux_Count;
    public double[] Chemical_Array=new double[31];

    public Mixer
    (
        string Mixer_NameP, double Mixer_CapacityP,
        double Time_WorkP, double Mixer_TemperatureP,
        double Less_Mix_CapacityP, double Additional_stockP,
        double Flux_CountP
    )
    {
        Mixer_Name = Mixer_NameP!= null &&
        Mixer_NameP.Trim()!= "" ? Mixer_NameP: "Миксер";

        Mixer_Capacity = Mixer_CapacityP>= 0? Mixer_CapacityP: 0;

        Time_Work = Time_WorkP >= 0? Time_WorkP: 0;

        Mixer_Temperature=Mixer_TemperatureP >= 0?
        Mixer_TemperatureP: 0;

        Less_Mix_Capacity = Less_Mix_CapacityP >= 0?
        Less_Mix_CapacityP: 0;

        Additional_Stock = Additional_stockP >= 0?
        Additional_stockP: 0;

        Flux_Count = Flux_CountP >= 0? Flux_CountP: 0;
```



```

    for (int i = 0; i < Chemical_Array.Length; i++)
        Chemical_Array[i] = 0;
}

public Mixer() : this("Миксер",0,0,0,0,0,0) { }

public override string ToString()
{
    string s = Mixer_Name+" "+Mixer_Capacity+" "+Time_Work;
    return s;
}

public string Mixer_NameProperty
{
    get
    {return Mixer_Name;}
    set
    {
        if (!String.IsNullOrEmpty(value) && value.Trim() != "")
            Mixer_Name = value.Trim();
    }
}

public double Mixer_CapacityProperty
{
    get
    {return Mixer_Capacity;}
    set
    {if (value >= 0) Mixer_Capacity = value;}
}

public double Time_WorkProperty
{
    get
    {return Time_Work;}
    set
    {if (value >= 0) Time_Work = value;}
}

public double Mixer_TemperatureProperty
{
    get
    {return Mixer_Temperature;}
    set

```

```
        {if (value >= 0) Mixer_Temperature=Math.Round(value,1);}
    }

    public double Less_Mix_CapacityProperty
    {
        get
        {return Less_Mix_Capacity;}
        set
        {if (value >= 0) Less_Mix_Capacity = value;}
    }

    public double Additional_StockProperty
    {
        get
        {return Additional_Stock;}
        set
        {if (value >= 0) Additional_Stock = value;}
    }

    public double Flux_CountProperty
    {
        get
        {return Flux_Count;}
        set
        {if (value >= 0) Flux_Count = value;}
    }
}
```

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

*Класс Bucket предназначен для обработки и хранения информации о технических характеристиках доступного литейного ковша*

```
[Serializable]
public List<Bucket> Bucket_k = new List<Bucket>();
public class Bucket
{
    private string Bucket_Name;
    private double Bucket_Capacity;
    private double B_Del_Capacity;
    private double Less_Bucket_Capacity;
    private double B_Time_Work;
    private double Bucket_Temperature;
    public double[] Bucket_Chemical_Array=new double[31];
    private string time;
    private double Minus_BucketCapacity;

    public Bucket
    (
        string Bucket_NameP, double Bucket_CapacityP,
        double Less_Bucket_CapacityP, double B_Time_WorkP,
        double Bucket_TemperatureP, double B_Del_CapacityP,
        string timeP
    )
    {
        Bucket_Name = Bucket_NameP != null &&
        Bucket_NameP.Trim() != "" ? Bucket_NameP: "Ковш";

        Bucket_Capacity = Bucket_CapacityP >=0?
        Bucket_CapacityP: 0;

        Less_Bucket_Capacity = Less_Bucket_CapacityP >= 0?
        Less_Bucket_CapacityP: 0;

        B_Del_Capacity = B_Del_CapacityP >= 0?
        B_Del_CapacityP: 0;

        B_Time_Work = B_Time_WorkP >= 0?
        B_Time_WorkP: 0;

        Bucket_Temperature = Bucket_TemperatureP >= 0?
```

```

    Bucket_TemperatureP: 0;

    time = timeP != null && timeP.Trim() != "" ?
    timeP: "Не заполнено";
}

public Bucket(): this("Ковш",0,0,0,0,0,"Не заполнено") { }

public override string ToString()
{
    string s = Bucket_Name + " " + Bucket_Capacity + " "
    + Less_Bucket_Capacity + " " + B_Time_Work;
    return s;
}

public string Bucket_NameProperty
{
    get
    {return Bucket_Name;}
    set
    {if (!String.IsNullOrEmpty(value) && value.Trim() != "")
        Bucket_Name = value.Trim();}
}

public double Bucket_CapacityProperty
{
    get
    {return Bucket_Capacity;}
    set
    {if (value >= 0) Bucket_Capacity = value;}
}

public double B_Del_CapacityProperty
{
    get
    {return B_Del_Capacity;}
    set
    {if (value >= 0) B_Del_Capacity = value;}
}

public double Less_Bucket_CapacityProperty
{
    get
    {return Less_Bucket_Capacity;}
    set

```

```

        {if (value >= 0) Less_Bucket_Capacity = value;}
    }

    public double B_Time_WorkProperty
    {
        get
        {return B_Time_Work;}
        set
        {if (value >= 0) B_Time_Work = value;}
    }

    public double Bucket_TemperatureProperty
    {
        get
        {return Bucket_Temperature;}
        set
        {if (value>=0) Bucket_Temperature = Math.Round(value,
1);}
    }

    public string Bucket_timeProperty
    {
        get
        {return time;}
        set
        {if (!String.IsNullOrEmpty(value) && value.Trim() != "")
time = value.Trim();}
    }

    public double Minus_BucketCapacityProperty
    {
        get
        {return Minus_BucketCapacity;}
        set
        {Minus_BucketCapacity = value;}
    }
}

```

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный университет индустриальный университет»

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной  
и воспитательной работе  
д.т.н., профессор М.В. Темлянецв  
«14»  2021 г.

## АКТ

об использовании в учебном процессе результатов научных разработок по  
теме диссертации преподавателя кафедры прикладных информационных  
технологий и программирования Мартусевича Ефима Александровича

**Результаты:** математическая модель, метод расчета оптимальных  
режимов формирования сплавов алюминия в миксере, информационно-  
обучающая система «Алюминщик»

**внедрены** в учебный процесс на основании решения кафедры  
прикладных информационных и программирования (протокол №4 от 21  
сентября 2021 г.).

**Указанные результаты используются:**


- в дисциплине «Металлургия легких металлов» на кафедре металлургии  
цветных металлов и химических технологий (МЦМиХТ) при подготовке  
бакалавров по направлению: 22.03.02 Металлургия;
- в дисциплине «Моделирование систем» на кафедре прикладных  
информационных технологий и программирования (ПИТиП) при подготовке  
бакалавров по направлениям: 09.03.01 Информатика и вычислительная  
техника; 09.03.03 Прикладная информатика.

Директор ИТиАС, д.т.н., профессор



Л. Д. Павлова

Заведующий кафедрой металлургии цветных металлов  
и химических технологий, к.т.н., доцент



О. А. Полях

Заведующий кафедрой прикладных информационных  
технологий и программирования, д.т.н., доцент



И. А. Рыбенко

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г



УТВЕРЖДАЮ

И.О. Управляющего директора  
АО «РУСАЛ Новокузнецк»

А. В. Грибанов

2022 г.

## СПРАВКА

о промышленном внедрении результатов научно-исследовательской работы

Научно-исследовательская работа «Разработка и оптимизация технологических режимов формирования алюминиевых сплавов в миксере» выполнена в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» на кафедре прикладных информационных технологий и программирования ответственным исполнителем соискателем Мартусевичем Е.А.

Разработана информационно-обучающая система «Алюминщик», включающая в себя математическую модель процесса формирования алюминиевых сплавов в миксере при переливе алюминия-сырца из литейных ковшей с использованием присадок лигатур и флюсов, а также метод расчета оптимальных значений параметров процесса формирования алюминиевого расплава с учетом изменяющихся начальных условий и технологических ограничений.

Внедрение программного комплекса «Алюминщик» позволяет:

- уменьшить на 20% количество брака, получаемого из-за некорректно принятых решений;
- снизить затраты на производство единицы продукции на 200 – 250 руб./т за счет рационального распределения материальных ресурсов;
- уменьшить время принятия решения на управление на 5-10 минут.

Настоящая справка составлена для констатации научной и практической значимости результатов НИР и не является основанием для финансовых претензий.

Согласовано:

И.О. Директора по литейному производству  
АО «РУСАЛ Новокузнецк»

(подпись)

В.Г. Присяжнюк

Директор ДТиТРАП НкАЗ в ОП  
ООО «РУСАЛ ИТЦ» г. Новокузнецк

(подпись)

Д.Г. Большаков



## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Российская Федерация  
Общество с ограниченной ответственностью  
«ПОЛИМЕТ»  
652600, г. Белово Кемеровской области, ул. Козлова, 5  
ИНН 4202022854, КПП 420201001, ОГРН 1034202002064, ОКПО 26629250  
т/ф (3843) 53-99-16, e-mail: polimet1@yandex.ru

УТВЕРЖДАЮ:

Заместитель Генерального директора  
ООО «ПОЛИМЕТ»

Ж. В. Зырянова

«11» сентября 2017 г.

## АКТ

## о промышленном испытании научно-технических разработок

Настоящим актом подтверждается, что результаты научно-исследовательской работы аспиранта Мартусевича Ефима Александровича кафедры прикладных информационных технологий и программирования ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», представленные в виде информационно-обучающей системы «Алюминщик», опробованы на производственной базе ООО «ПОЛИМЕТ».

Информационно-обучающая система «Алюминщик» опробована при приготовлении алюминиевого сплава марки АД-31. Опыт ее применения показал высокую эффективность за счет реализации расчета оптимальных параметров шихтовки расплава с учетом изменяющихся технологических и коммерческих исходных данных.

Экономический эффект использования информационно-обучающей системы достигнут за счет снижения времени приготовления сплавов на 10% и расхода электроэнергии на поддержание температуры расплава на 4%.

Ведущий технолог

Кохан О.В.



## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017661402

Автоматизированная информационно-обучающая система  
«Алюминщик»

Правообладатели: *Мартусевич Ефим Александрович (RU), Буинцев  
Владимир Николаевич (RU)*

Авторы: *Мартусевич Ефим Александрович (RU),  
Буинцев Владимир Николаевич (RU)*



Заявка № 2017619016

Дата поступления 31 августа 2017 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 12 октября 2017 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

## ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017661403

Программа поиска оптимального решения технологических  
задач для существенно многомерных объектов

Правообладатели: *Мартусевич Ефим Александрович (RU), Буинцев  
Владимир Николаевич (RU)*

Авторы: *Мартусевич Ефим Александрович (RU),  
Буинцев Владимир Николаевич (RU)*



Заявка № 2017618980

Дата поступления 31 августа 2017 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 12 октября 2017 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

## ПРИЛОЖЕНИЕ И

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019619969

Модуль прогнозирования управляющих воздействий для  
информационно-обучающей системы «Алюминщик»

Правообладатели: *Мартусевич Ефим Александрович (RU), Буинцев  
Владимир Николаевич (RU)*

Авторы: *Мартусевич Ефим Александрович (RU),  
Буинцев Владимир Николаевич (RU)*



Заявка № 2019615015

Дата поступления 06 мая 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 29 июля 2019 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



## ПРИЛОЖЕНИЕ К

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021667406

**Роботизированная информационно-обучающая система  
для операторов технологических процессов**

Правообладатель: **Мартусевич Ефим Александрович (RU)**Автор(ы): **Мартусевич Ефим Александрович (RU)**

Заявка № 2021666824

Дата поступления **17 октября 2021 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **28 октября 2021 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат 0x02A5CFBC35B1ACF69A40A2F0B092E9A118  
Владелец **Иванов Григорий Петрович**  
Действителен с 15.01.2021 по 15.01.2035

*Г.П. Иванов*