

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

На правах рукописи



Мартусевич Ефим Александрович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
ФОРМИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

Специальность

1.2.2. – «Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н., доцент

Калашников Сергей Николаевич

Новокузнецк – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Анализ проблемы и предпосылки создания программного комплекса для исследования процесса формирования алюминиевого расплава в миксере.....	9
1.1 Характеристика технологических этапов производства алюминия	9
1.2 Особенности математического моделирования основных технологических этапов производства алюминия	18
1.3 Анализ существующих программно-вычислительных комплексов для моделирования процесса получения алюминия	21
1.4 Принципы построения современных программных комплексов	31
1.5 Содержательная постановка задачи	39
2 Разработка математической модели и численного метода расчета параметров процесса формирования алюминиевого расплава в миксере	40
2.1 Общая характеристика технологического объекта	40
2.2 Разработка математической модели технологического процесса формирования алюминиевого расплава	42
2.3 Разработка численного метода решения уравнения диффузии в рамках поставленной краевой задачи математической физики	51
2.4 Выводы к главе 2	54
3 Разработка программного комплекса «Алюминщик» для исследования процесса формирования алюминиевого расплава с возможностью обучения технологического персонала.....	55
3.1 Принципы разработки программного комплекса «Алюминщик»	55
3.2 Реализация программного комплекса «Алюминщик» на основе высокоуровневого объектно-ориентированного языка программирования.....	59
3.3 Рекомендации по использованию возможностей информационно-обучающей системы «Алюминщик».....	65
3.4 Выводы к главе 3	90
4 Применение программного комплекса «Алюминщик» для исследования процесса формирования алюминиевого сплава.....	91
4.1 Тестирование программного комплекса «Алюминщик» на основе технологических данных	91
4.2 Расчеты процесса формирования алюминиевого расплава в миксере с использованием математической модели	92
4.3 Расчеты технологических режимов процесса формирования алюминиевого расплава в миксере с использованием программного комплекса «Алюминщик»	95
4.4 Выводы к главе 4	100

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	101
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	103
ПРИЛОЖЕНИЕ А	114
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	117
ПРИЛОЖЕНИЕ В	120
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	121
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	122
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	123

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

В настоящее время одной из ресурсоемких и стратегически важных отраслей промышленности является цветная металлургия, в частности, производство алюминиевых сплавов. Решение задач по совершенствованию технологического процесса получения алюминиевых сплавов связано со сложностью проведения экспериментальных исследований, которые, как правило, являются дорогостоящими, а зачастую неосуществимыми.

В связи с этим, большое значение приобретает вычислительный эксперимент, который позволит проанализировать поведение объекта на основе модельных представлений. Поэтому возникает необходимость создания новых математических моделей и соответствующих программных комплексов на основе использования современных IT-инструментов. Для эффективной разработки многофункциональных программных комплексов целесообразно применение высокоуровневых объектно-ориентированных языков программирования, обеспечивающих программную реализацию сложных математических моделей технологического процесса с учетом его особенностей.

Таким образом, необходимость создания математической модели и реализация программного комплекса для исследования технологического процесса формирования алюминиевого расплава в миксере является актуальной задачей. Проведение вычислительных экспериментов с использованием математической модели позволит проводить исследования и предоставит возможность осуществления безопасного обучения и повышения квалификации технологического персонала.

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).

Степень разработанности темы исследования

Вопросы математического моделирования технологических процессов получения алюминиевых сплавов отражены в работах Н. Н. Бекетова, П. П. Федотьева,

Б. М. Горенского, В. Ф. Павлова, Ю. В. Борисоглебского. В настоящее время единственным программным продуктом, моделирующим один из этапов производства алюминия, является «Автоматизированная обучающая система основам управления электролиза алюминия» для АО «КрАЗ», г. Красноярск.

Цель работы

Разработка математической модели и реализация комплекса программ для проведения вычислительных экспериментов и исследования технологического процесса формирования алюминиевых сплавов в миксере.

Задачи исследования

1. Разработка математической модели технологического процесса формирования алюминиевого расплава в миксере.
2. Модификация численного метода решения уравнения диффузии компонентов формируемого расплава с учетом распределения значений коэффициента диффузии по объему миксера.
3. Разработка комплекса программ для реализации математической модели и численного метода решения уравнения диффузии компонентов формируемого расплава в миксере.
4. Исследование технологического процесса формирования алюминиевого расплава в миксере путем проведения вычислительных экспериментов с использованием разработанного комплекса программ.
5. Применение комплекса программ для расчета параметров формирования алюминиевых сплавов в миксере и обучения технологического персонала.

Научная новизна

1. Математическая модель технологического процесса формирования алюминиевого расплава, отличающаяся учетом пространственного распределения коэффициента диффузии компонентов формируемого расплава и позволяющая представить изменение характера течения расплава по объему миксера на основе решения краевой задачи математической физики.
2. 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 перемешивания различной степени интенсивности, что позволяет наиболее точно оценить время усреднения концентраций компонентов алюминиевого расплава.

3. Комплекс программ для проведения вычислительных экспериментов и исследования технологического процесса формирования алюминиевого расплава в миксере, отличающийся возможностью непрерывного мониторинга действий пользователя при взаимодействии с интерактивным интерфейсом и наличием динамической библиотеки редактируемых исходных данных.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты работы являются основой для разработки программных комплексов, предназначенных для моделирования и исследования технологических процессов в металлургии с целью улучшения технико-экономических показателей, безопасного обучения и повышения уровня квалификации технологического персонала промышленных предприятий.

Методология и методы исследования

Для достижения цели и решения поставленных задач использовались методы математического моделирования, численные методы решения дифференциальных уравнений, методы объектно-ориентированного программирования.

Положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель процесса формирования алюминиевого расплава, описывающая процесс смешивания и диффузии компонентов расплава при добавлении алюминия-сырца из литейных ковшей в миксер.

2. Численный метод решения уравнения диффузии с учетом распределения коэффициента диффузии компонентов формируемого расплава по объему миксера в диапазоне изменения значений при молекулярной и турбулентной диффузии.

3. Комплекс программ в виде информационно-обучающей системы «Алюминщик» на основе объектно-ориентированного подхода, предназначенный для проведения вычислительных экспериментов и исследования процесса формирования алюминиевого расплава в миксере.

Степень достоверности результатов подтверждается корректным применением методов математического моделирования, использованием современных средств разработки программного обеспечения и соответствием теоретических результатов расчетов фактическим данным 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).

Соответствие паспорту специальности

Диссертация соответствует паспорту специальности 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»:

- п. 4 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента»;

- п. 5 «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента»;

- п. 8 «Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования».

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 20 печатных работ, в том числе: 3 – в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК; 5 – в изданиях, индексируемых базами Scopus и Web of Science; 12 – в сборниках всероссийских и международных конференций. Кроме этого, получен акт о внедрении результатов НИР в учебный процесс (Приложение В), а также 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ (Приложения Г, Д, Е).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений. Изложена на 123 страницах, содержит 60 рисунков, 3 таблицы, список литературы из 123 наименований и 6 приложений.

1 Анализ проблемы и предпосылки создания программного комплекса для исследования процесса формирования алюминиевого расплава в миксере

В настоящее время одним из самых востребованных материалов является алюминий и его сплавы. Такие свойства как легкость, прочность, функциональность, экологичность, стойкость к образованию коррозии позволяют считать алюминий основным конструкционным металлом в промышленности. Постоянными потребителями алюминиевой продукции являются авиационная, автомобильная, электротехническая, строительная и другие индустриальные сферы разных развивающихся стран мира.

Технология получения алюминиевых сплавов связана с наличием избыточного количества циклов модификации расплава в результате неточных расчетов значений параметров смешивания или корректирующих воздействий. Это приводит к повышению себестоимости готовой продукции, быстрому износу оборудования, потере производственных мощностей и сдвигу плановых сроков сдачи товара заказчиком. Поэтому, совершенствование технологии производства алюминия в настоящее время является актуальной задачей.

1.1 Характеристика технологических этапов производства алюминия

Алюминиевое производство включает в себя 5 основных этапов [1 – 8]:

- добыча бокситов;
- переработка бокситов в сухой глинозем;
- электролиз оксида алюминия Al_2O_3 ;
- формирование алюминиевого сплава заданного химического состава;
- разливка сформированного расплава алюминия в формы.

На рисунке 1.1 представлена общая технологическая схема, описывающая основные этапы производства алюминия.

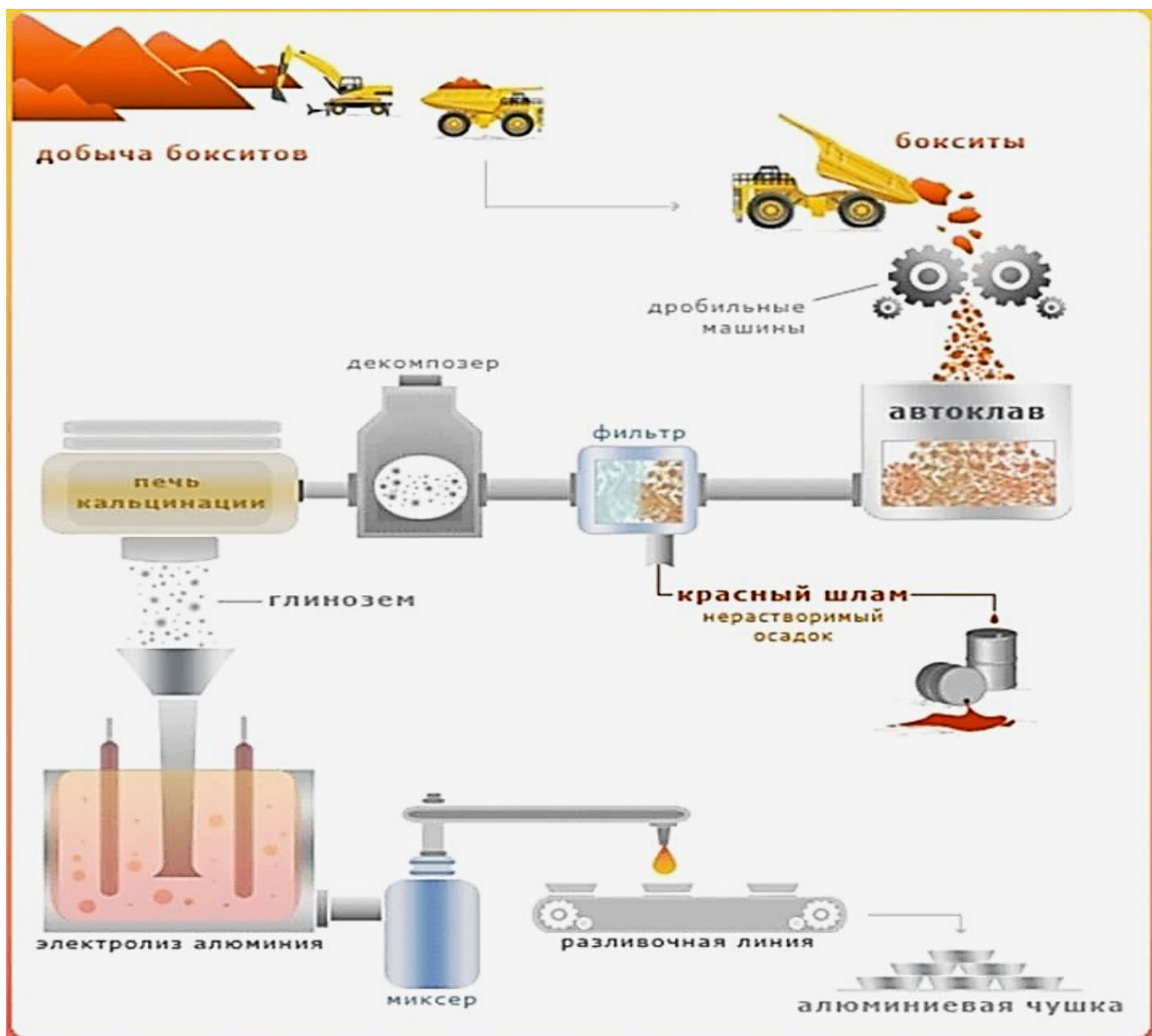
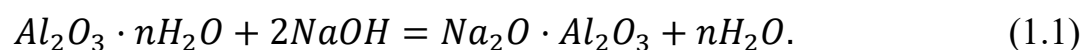


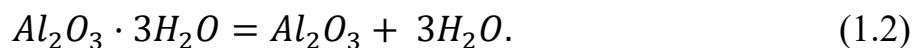
Рисунок 1.1 – Общая технологическая схема этапов производства алюминия

Процесс переработки бокситов в глинозем основан на методе Байера [9] путем выщелачивания оксида алюминия Al_2O_3 из боксита, исключая остальные составляющие боксита (SiO_2 , Fe_2O_3) в результате обратимой химической реакции:



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 [10 – 11]. Данный способ является наиболее распространенным и применяется в случае использования высококачественных бокситов, обладающих низкими значениями вредных примесей [12].

Установлено, что в состав бокситов входит кристаллическая гидроокись алюминия. Данное соединение беспрепятственным образом растворяется в гидроксиде едкого натрия ($NaOH$) высокой концентрации при нагревании до 850 – 900 °С, что в конечном итоге позволяет извлечь около 87 % полезной массы глинозема:



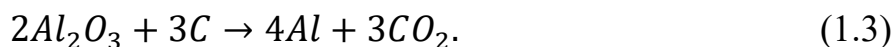
Продуктом реакции является глинозем Al_2O_3 , порошок белого цвета, пригодный для дальнейшего использования в электролизных ваннах. При такой реакции посторонние примеси, содержащиеся в исходном сырье, не преобразуются в растворимую форму и выпадают в твердый осадок. Нерастворимый осадок имеет название «красный шлам» и может быть удален из соответствующих емкостей с целью наиболее качественного очищения гидроокиси алюминия [13].

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 перерабатывается для получения редкоземельных металлов или используется для обогащения территорий сельского хозяйства [14].

С этого момента, полученный в результате реакции жидкий гидроксид алюминия проходит стадию фильтрации. Крупные частицы оседают на фильтрах, подвергаются промывке и дроблению до фракций размером 0,05 ÷ 0,15 мм с последующей кальцинацией.

Под кальцинацией понимается процесс нагревания частиц гидроксида алюминия с целью удаления воды и получения очищенного глинозема. В частности, на производство 1 тонны 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 [15].

Процесс электролиза алюминия протекает в электролизном цехе алюминиевого завода [16 – 21]. В процессе электролитического получения жидкого алюминия в электролизере происходит основная химическая реакция:



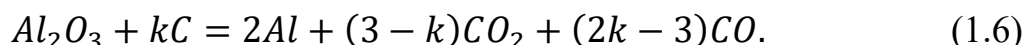
В это же время на аноде происходит окисление ионов кислорода:



А уже 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* и т.д.

Глинозем Al_2O_3 не только служит основным источником получения алюминия, но и выполняет функции теплоизоляции расплава, а также применяется в системе сухой газоочистки. Глинозем имеет специальные маркировки, например ГОО, ГО, Г1, Г2, которые непосредственно отражают порядок ухудшения исходного качества. Оптимальный набор значений примесей для качественного глинозема составляет: $SiO_2 + Fe_2O_3 < 0,03 \%$, $Na_2O < 0,38 \%$, $P_2O_5 < 0,002 \%$, $H_2O < 0,5 \%$.

В процессе электролиза применяются различные химические добавки, снижающие электропроводность электролита, например *NaCl, NaF, CaF₂, MgF₂* [22]. Заполненная расплавленным криолитом ванна при температуре около 900 °С создает токопроводящую среду, где катодом считается дно ванны, а анодом, загружаемые в криолит прессованные обожженные угольные блоки [23]. При этом образуется элементарная 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 [24].

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 [25].

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 [26].

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 [27]. В результате, точно настроенная и правильно функционирующая электролизная ванна производит около 2000 кг жидкого алюминия в сутки.

В конечном итоге, 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.

На рисунке 1.2 представлена технологическая схема литейного производства, отражающая основные стадии формирования алюминиевых сплавов в миксере. Доставленные из электролизного цеха литейные ковши, содержащие расплавленный алюминий-сырец, предварительно взвешиваются и перемещаются в специальную зону для отстаивания перед предстоящей разливкой в миксер.

В это же время определяется химический состав исходного алюминия-сырца в имеющихся литейных ковшах путем взятия пробы. Образец пробы алюминия-сырца остужают и с помощью пневматической почты доставляют в специальную лабораторию для проведения химического анализа с помощью спектрометра. Результаты анализа отправляются сотруднику литейного отделения в виде шаблона на экран рабочего компьютера [28].

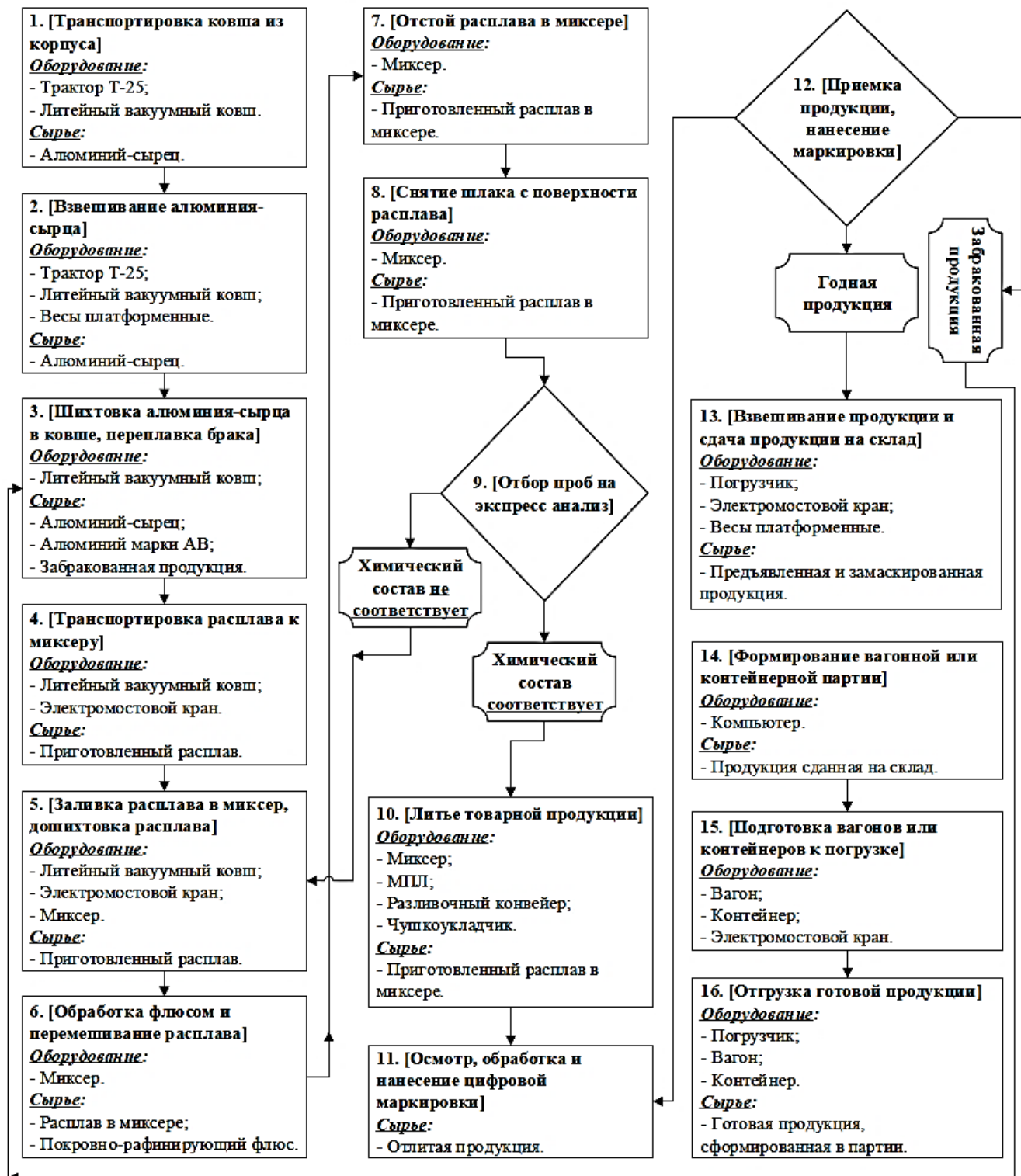


Рисунок 1.2 – Технологическая схема литейного производства

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 других тяжелых металлов [29].

Приготовление металла происходит в поворотных миксерах. Миксера бывают разных типов и размеров, а также отличаются мощностью нагревательных элементов, которые предназначены для поддержания корректной температуры расплава. Конструктивная емкость миксеров обычно варьируется от 25 до 60 т и напрямую зависит от габаритных размеров или предназначения агрегатов [30, 31].

На основе полученных данных о химическом составе алюминия-сырца из привезенных литейных ковшей, осуществляется шихтовка расплава в миксере, то есть выполняется расчет расходов алюминия-сырца из литейных ковшей с целью формирования алюминиевого расплава в соответствии с заданной маркой сплава согласно установленным требованиям действующего портфеля заказов.

Шихтовщик производит слив алюминия-сырца из литейных ковшей в миксер до полной емкости в нужных, по его мнению, пропорциях. Полученный расплав в миксере анализируется с помощью отбора проб через некоторые промежутки времени, так как необходимо учитывать усреднение значений концентрации химических элементов алюминиевого расплава. В зависимости от точности полученных результатов проб, шихтовщик имеет возможность отливать из миксера до 5 т расплава в свободные литейные ковши [32].

Также для обогащения расплава необходимыми химическими элементами или для придания особых свойств выплавляемому сплаву алюминия обычно применяются легирующие добавки. Согласно данным из литературных источников, в качестве легирующих добавок часто используются сплавы металлов: бора, железа, кремния, магния, меди, никеля, свинца, титана [33, 34].

Все применяемые в промышленности легирующие добавки определяют общие физические и типовые физико-химические характеристики формируемых сплавов алюминия. Так, вводимые в жидкий расплав легирующие металлы определяют дополнительные свойства будущего металла, но не изменяют исходные свойства сырья. Поэтому необходимо тщательно оценивать целесообразность использования модифицирующих материалов при изготовлении требуемых марок алюминиевого сплава в миксере, опираясь на требования ГОСТ 4784-97 «Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые» и ГОСТ 1583-93 «Сплавы алюминиевые

литейные». С учетом этого, шихтовщик должен обеспечить высокое качество конечной готовой продукции, поэтому в его распоряжении имеются средства, позволяющие обеднять или очищать расплав от вредных газовых включений и примесей. К этим средствам относятся покровно-рафинирующие флюсовые добавки [35, 36].

В общем случае, флюсами являются сухие порошковые смеси, добавляемые в расплав миксера и состоящие из галогенных соединений фторидов или хлоридов с различными свойствами. Покровные флюсы служат для защиты расплава от окисления и являются необходимым компонентом при изготовлении выбранной марки алюминиевого сплава. Рафинирующие флюсы предназначены для модификации химического состава расплава, а в их основе лежат хлориды щелочноземельных металлов. 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 одновременному удалению включений водорода из алюминиевого расплава путем образования комплекса компонентов $(Al_2O_3)_x - (H_2)_y$.

Расчет требуемой массы флюсовых добавок в большинстве случаев определяется непосредственно решением шихтовщика. Поэтому, качество готовой продукции и ее химический состав всецело определяются его действиями. Получается, что результат шихтовки зависит не только от трудового опыта и уровня квалификации шихтовщика, но и от его способностей спрогнозировать проводить необходимые численные расчеты значений параметров смешивания имеющихся масс алюминия-сырца и модифицирующих компонентов. Зачастую действия шихтовщика не сразу приводят к нужному результату и цикл модификации расплава повторяется до тех пор, пока заданный химический состав алюминиевого расплава не окажется сформирован для его разливки на конвейере [37, 38].

Кроме того, шихтовщику необходимо контролировать качество подготовки миксеров при переходе от одного сплава к производству другого [39]. Для равномерного распределения компонентов алюминиевого расплава применяется либо механическое или магнитно-гидродинамическое перемешивание, что определяет движение расплава в одну или другую противоположную сторону.

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:

$$\varepsilon_{\text{усадки}} = \alpha_{\text{коэф}} \frac{l_n - l_x}{l_n} \cdot 100 \%, \quad (1.10)$$

где l_n – исходный размер сформированной отливки, мм;

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

Малоразмерные слитки алюминия называются чушками и весят 6 – 25 кг. Самыми габаритными слитками считаются 35-тонные параллелепипеды длиной более 10 м. Готовые алюминиевые чушки транспортируются на выделенный склад и ожидают своей отправки. Отлитые заготовки алюминия подвергаются различным процедурам обработки согласно потребностям заказчиков [40].

Таким образом, детальное изучение основных этапов производства алюминия позволило рассмотреть важные особенности формирования требуемого химического состава алюминиевого расплава в миксере, определить принципиально значимые технологические закономерности, в том числе структурировать наиболее актуальные трудности производства, которые возможно разрешить с использованием современных IT-технологий, средств математического моделирования, а также соответствующих инструментов высокоуровневой программной разработки. Все это необходимо для осуществления информационно-событийной поддержки технологического персонала и снижения экономических затрат при производстве.

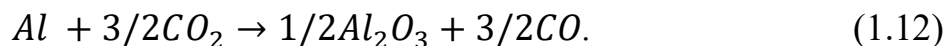
1.2 Особенности математического моделирования основных технологических этапов производства алюминия

Анализ литературных данных показал, что в настоящее время разработана математическая модель только для одного из этапов производства алюминиевых расплавов [41, 42], а именно для электролиза. Рассмотрим основные этапы построения математической модели процесса электролиза.

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:

$$\eta_m = \frac{P_{\phi}}{P_T} \cdot 100\%. \quad (1.11)$$

Показатель η_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.

В результате, рабочее напряжение определяется следующим выражением:

$$U_{\text{раб}} = U_{\text{разлож}} + \Delta U_{\text{анод}} + \Delta U_{\text{катод}} + \Delta U_{\text{электролит}}, \quad (1.13)$$

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:

$$U_{\text{сред}} = U_{\text{раб}} + \Delta U_{\text{ошин}} + \Delta U_{\text{ан.эф}}, \quad (1.14)$$

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

$\Delta U_{\text{ошин}}$ – падение напряжения в ошиновке главного трансформатора;

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

Напряжение при анодном эффекте вычисляется по формуле:

$$\Delta U_{ан.эф} = \frac{nt(U_{ан.эф} - U_{раб})}{1440}, \quad (1.15)$$

где n – число анодных эффектов;

t – продолжительность анодных эффектов;

$U_{ан.эф}$ – 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:

$$W_{уд.расх} = \frac{U_{ср}}{K_{эл} \cdot \eta_m} \cdot 10^3, \quad (1.16)$$

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

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 изложенной информации, производительность электролизера $P_{эл}$ (тонн) определяется выражением:

$$P_{эл} = K_{эл.эк} \cdot I \cdot t \cdot \eta_T \cdot 10^{-6}, \quad (1.17)$$

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

I – сила тока, А;

t – длительность процесса электролиза, ч;

η_T – выход по току, %.

В результате, 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, а также иметь необходимый набор функциональных возможностей, предназначенных для обучения и повышения уровня квалификации технологического персонала.

1.3 Анализ существующих программно-вычислительных комплексов для моделирования процесса получения алюминия

Детальный анализ рынка программных продуктов показал, что единственным программным комплексом, моделирующим один из рассмотренных выше этапов производства алюминия, является «Автоматизированная обучающая система основам управления электролиза алюминия», разработанная для АО «КрАЗ» в г. Красноярске. Основное предназначение этой системы заключается в том, чтобы предоставить пользователю возможность ознакомиться с технологией электролиза алюминия-сырца [43].

Программный продукт позволяет изучать степень влияния различных управляющих воздействий на технико-экономические показатели процесса электролиза. При реализации программного комплекса используются соответствующие математические модели и физико-химические закономерности, характеризующие особенности протекания электролиза алюминия.

Представленный программный комплекс дает возможность приобретать опыт управления процессом электролиза алюминия с позиции системного подхода, благодаря наличию различных режимов функционирования и настроек работы интерфейса пользователя. Основным режим отображения пользовательского интерфейса «Автоматизированной обучающей системы основам управления процессом электролиза алюминия» представлен на рисунке 1.3.

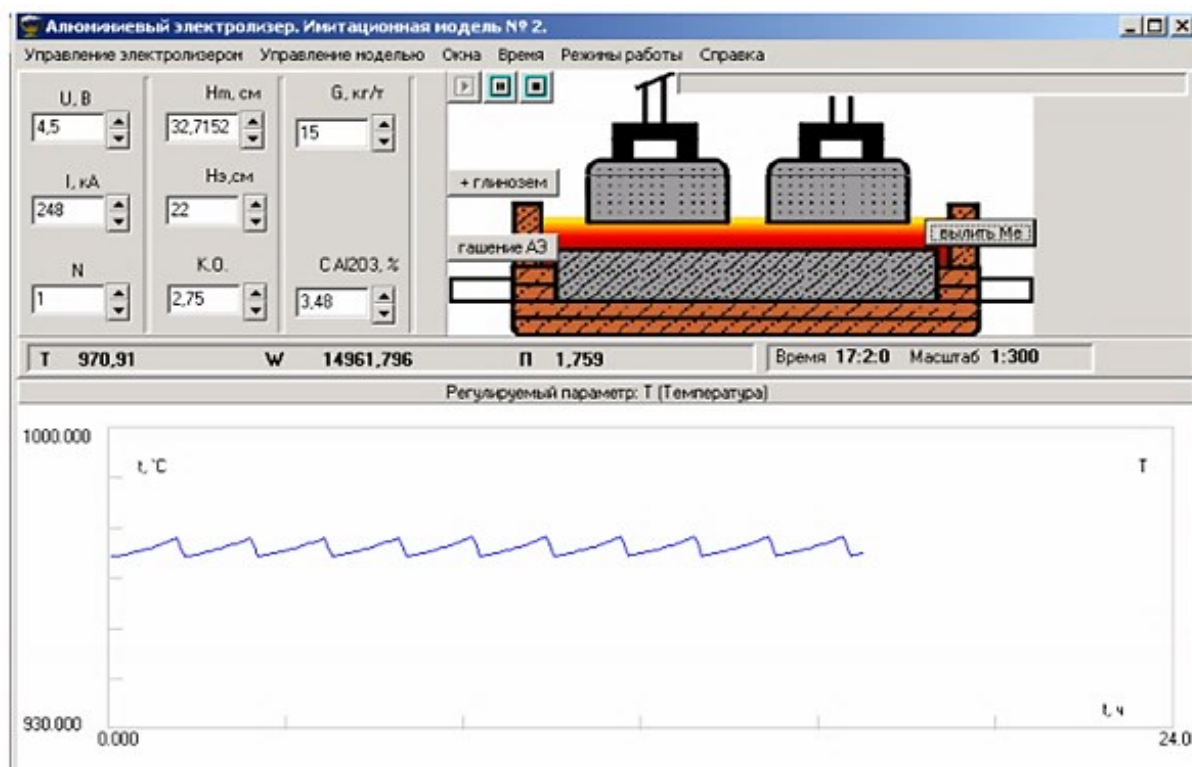


Рисунок 1.3 – «Автоматизированная обучающая система
основам управления электролиза алюминия»

В комплект «Автоматизированной обучающей системы основам управления электролиза алюминия» входят:

- стандартный режим работы автоматизированной обучающей системы;
- режим индивидуальной настройки, определяющий альтернативный ход протекания процесса электролиза алюминия;
- отображение промежуточных результатов работы электролизера;
- дополнительный режим работы, фиксирующий изменения значений параметров процесса электролиза алюминия с использованием инфографики;
- библиотека сохраненных шаблонов настроек работы электролизеров;
- теоретическое описание процесса электролиза алюминия;
- справка по использованию программного комплекса.

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 специальных инструментов. На схеме присутствуют кнопки, позволяющие регулировать управляющие воздействия на объект, а также осуществлять выполнение сопутствующих технологических операций, а именно: гашение анодного эффекта, добавление глинозема в электролизер и разливка металла 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. 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.

В результате, 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 комплексов в области цветной металлургии. Помимо представленной программной реализации, существует еще несколько других специализированных программных комплексов, позволяющих моделировать процесс изготовления различных форм деталей на стадии разливки уже приготовленного алюминиевого расплава в миксере.

К таким программам относятся: немецкие программы Magma [44] и WinCast [45], американские программы SolidCast [46] и ProCast [47], а также российская LVMFlow [48]. Далее, на рисунках 1.4 – 1.8 представлен пользовательский интерфейс каждой из представленных программ.

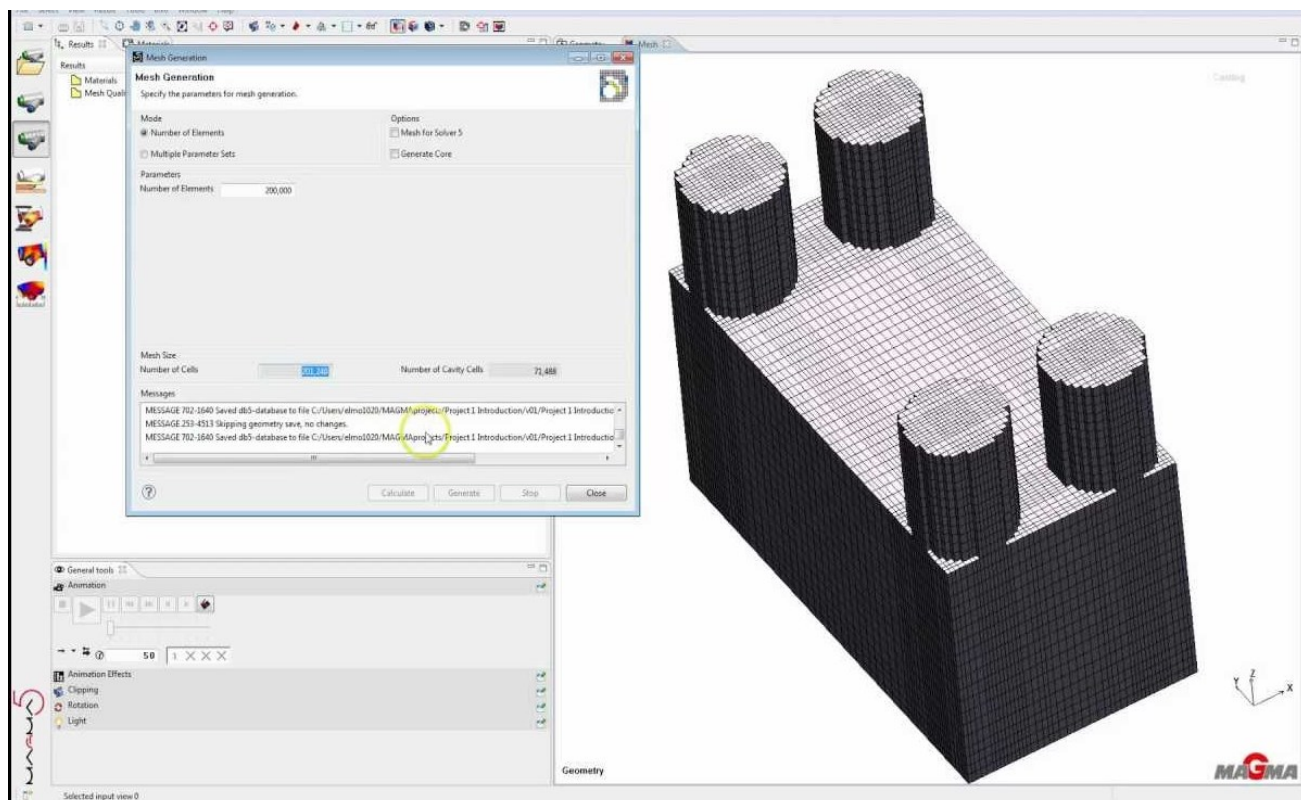


Рисунок 1.4 – Пользовательский интерфейс программы Magma

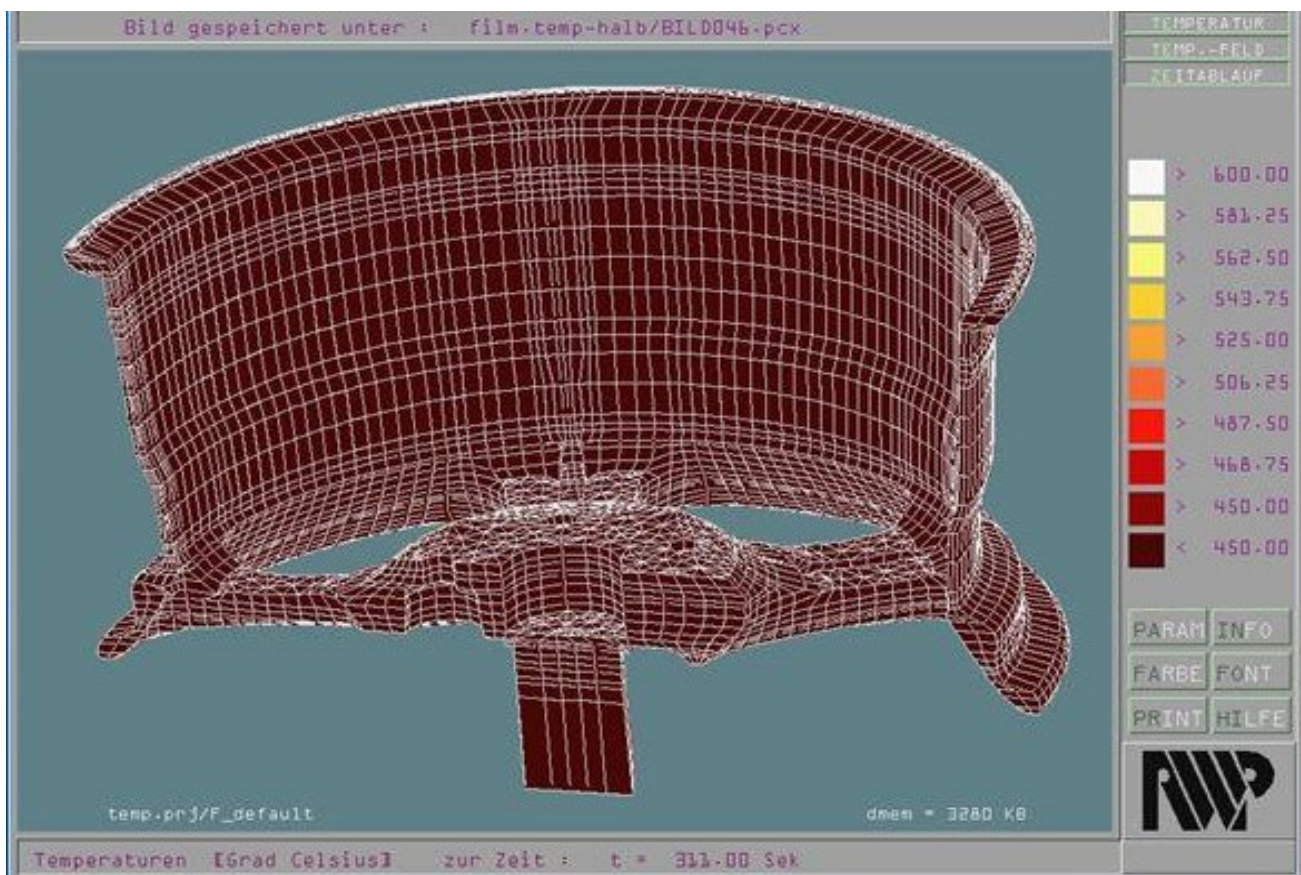


Рисунок 1.5 – Пользовательский интерфейс программы WinCast

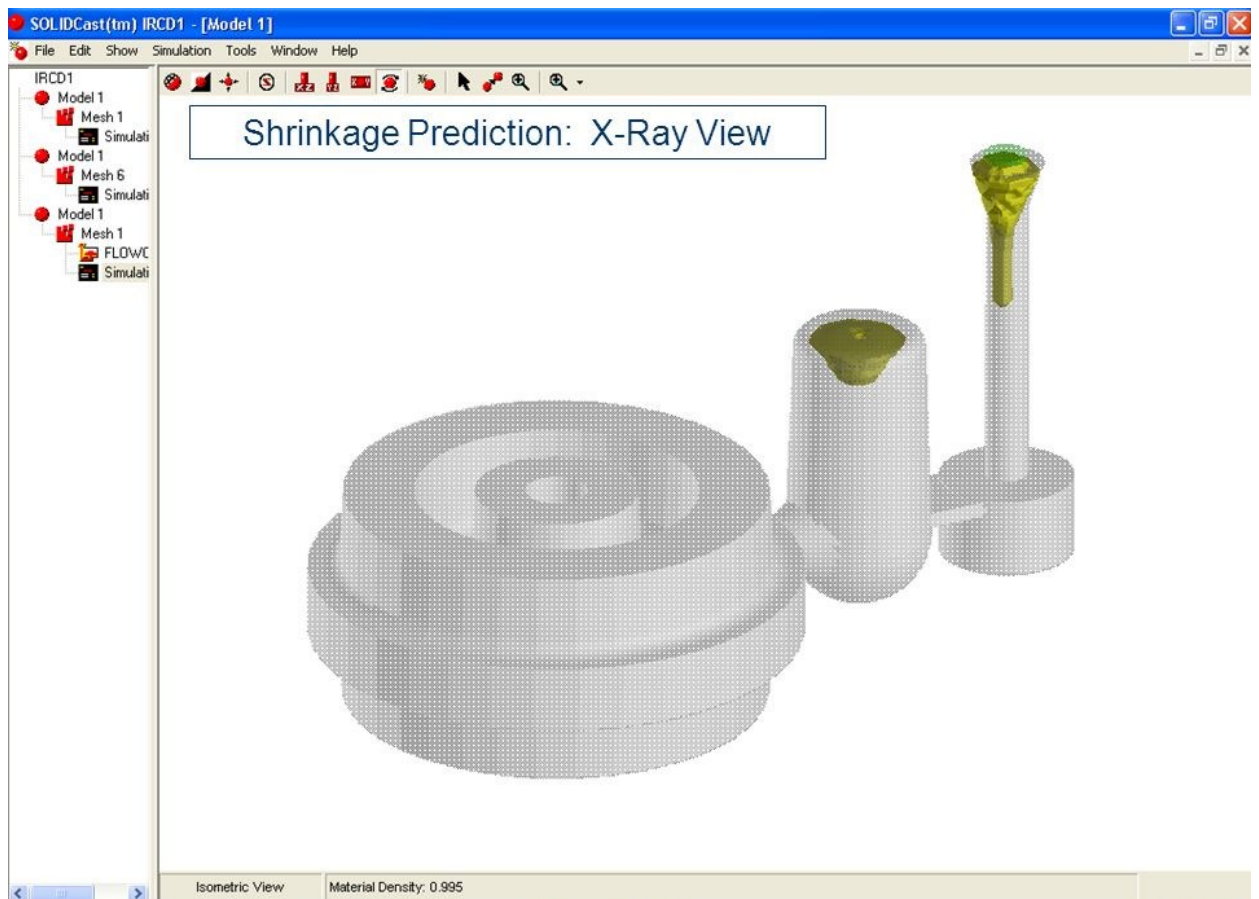


Рисунок 1.6 – Пользовательский интерфейс программы SolidCast

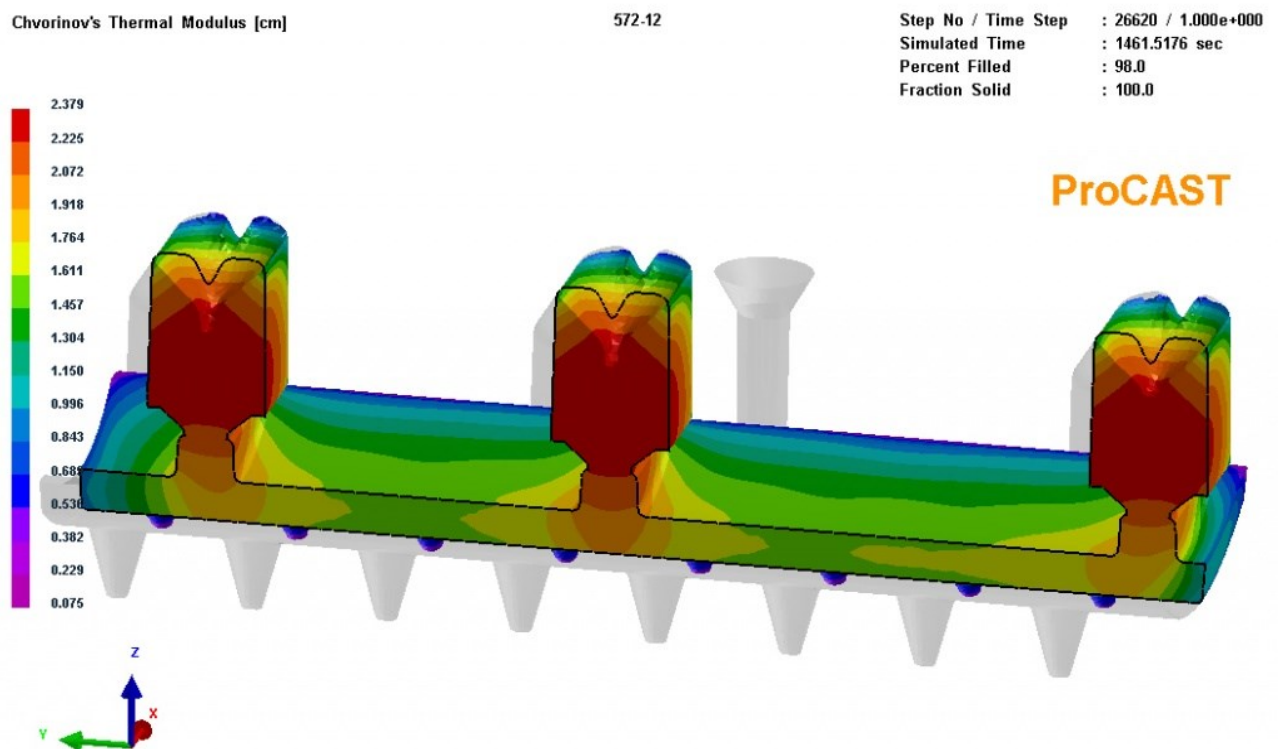


Рисунок 1.7 – Пользовательский интерфейс программы ProCast

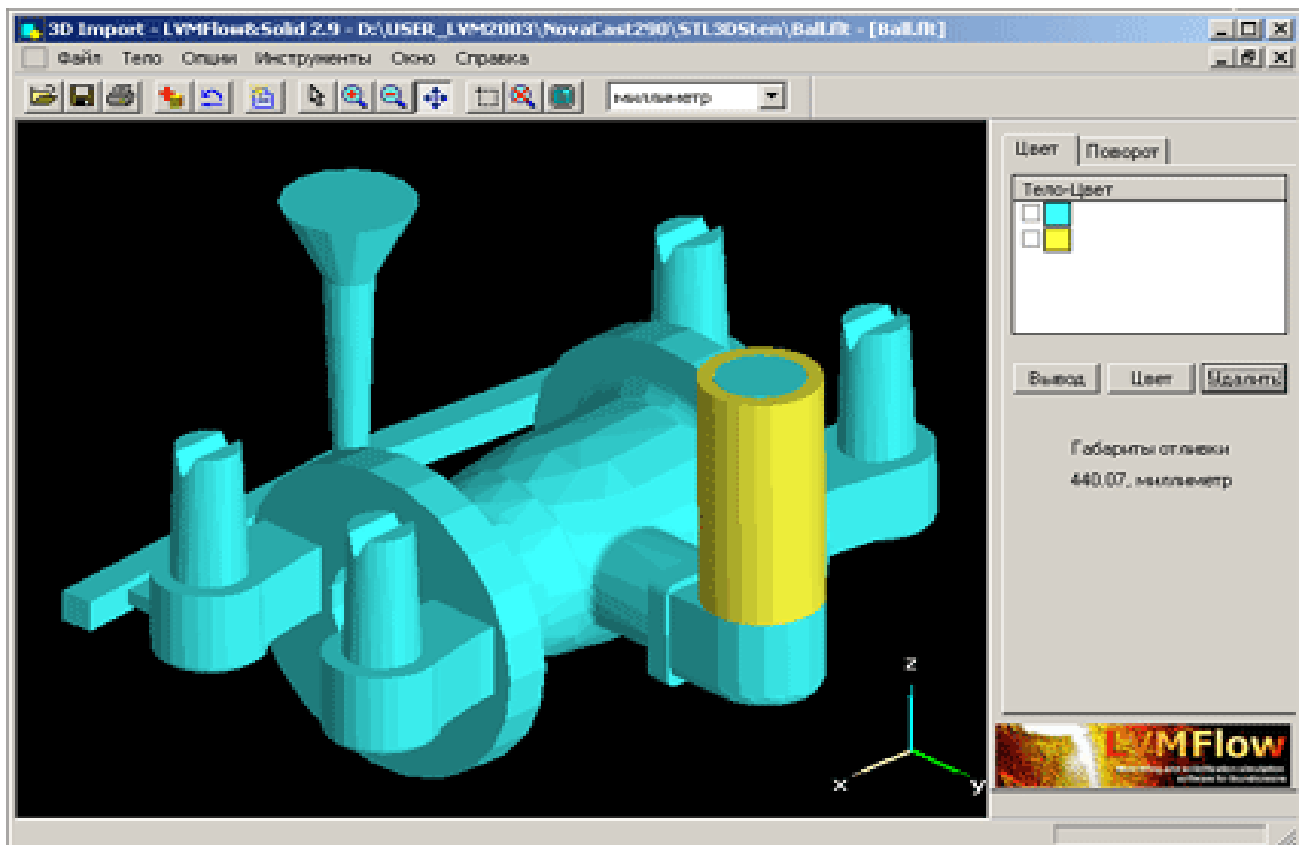


Рисунок 1.8 – Пользовательский интерфейс российской программы LVMFlow

Данные программные продукты представляют собой профессиональные системы компьютерного моделирования литейных процессов с использованием метода конечных элементов [49]:

$$\phi = \sum_{i=1}^n N_i \cdot \phi_i, \quad (1.18)$$

где N_i – аппроксимирующая функция для i -ой подобласти (узла);

ϕ_i – значение переменной в i -ой подобласти (узле);

n – количество подобластей (узлов).

В частности, метод конечных элементов представляет собой численный метод решения дифференциально-алгебраических уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, определяющих выбранный физический процесс по заранее заложенному алгоритму с соответствующим набором универсальных математических моделей.

В основу метода заложен алгоритм поиска необходимой области, где решение исходных дифференциальных уравнений является верным. Для этого исходная область разбивается на конечное множество единообразных подобластей и определяется вид аппроксимирующей (приближающей) функции, например в самом простом случае, это может быть полином первой степени.

Далее, в полученном множестве областей определяются соответствующие значения аппроксимирующей функции с использованием математического аппарата, который обеспечивает решение составляемых систем линейных алгебраических уравнений с учетом граничных условий в рамках поставленной расчетно-технологической задачи для выбранного металлургического процесса.

В результате, такие программные комплексы непосредственно предназначены для моделирования и анализа процесса литья сформированного жидкого металла в необходимые детали заданной формы. Стоит отметить, что данные 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. Обычно, промышленным предприятиям предлагается выбрать соответствующий программный продукт с учетом локальных особенностей производства цветных металлов. В целом, для проведения расчетов в память программы необходимо загрузить геометрическую модель полости литейной формы и указать координаты границ области отливаемой детали. При этом геометрическая модель необходимой области может быть подготовлена в любой современной CAD-системе (AutoCAD, FreeCAD, Kompas-3D).

На геометрической модели формы отливки выстраивается однородная сетка с заданным размером ячеек, а затем из базы данных подгружаются данные об используемых при литье материалах с учетом их физико-химических свойств и температурных зависимостей. После этого задаются граничные условия, важные технологические параметры протекания процесса литья, а также устанавливается точность расчетов и качество графической визуализации.

После выполнения основных этапов расчетов пользователю предоставляется возможность проанализировать полученные результаты и выполнить коррекцию 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 конкретным литейным технологиям, а общим физическим процессам в различных технологических сочетаниях. Вот список некоторых из них: MeshCast – модуль генерации 2D и 3D конечно-элементной сетки; PreCast – модуль, предназначенный для настройки исходных свойств материалов, а также определения граничных и начальных условий моделирования; DataCast – модуль, обеспечивающий компиляцию необходимых для расчета данных и файлов; ViewCast – модуль визуализации промежуточных результатов расчета в реальном времени; Status – модуль для отслеживания и управления выполняемых расчетных операций; ThermalSolver – расчетный модуль для моделирования теплового процесса с учетом возможности затвердевания и формирования потенциальных дефектов усадки; FlowSolver – модуль для моделирования течения потоков жидкого расплава и анализа заполнения формы; GrainStructureModule – модуль стохастического прогнозирования качества кристаллизации отливки, а также моделирования эволюции пористой структуры жидкого расплава при затвердевании; RadiationModule – модуль расчета теплоизлучения в процессе кристаллизации жидкого расплава. Расчетные алгоритмы программ выполнены с учетом обширной базы данных физико-химических характеристик известных материалов, которые содержатся в модуле TermoTech для сплавов на базе алюминия (*Al*), железа (*Fe*), магния (*Mg*), никеля (*Ni*) и титана (*Ti*).

Вместе с тем, с помощью модульного разделения происходит моделирование реальной физики соответствующих процессов теплопроводности, движения потоков жидкого расплава и характера изменения напряжения. Следовательно, один и тот же модуль может применяться для любого технологического процесса литья,

будь то чугун, алюминий или сталь. При этом алгоритмы системы учитывают специфику проведения расчетов для конкретного материала.

Как следствие, 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;
- исключительно 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.

Вместе с тем, отдельное внимание стоит уделить отечественной программе LVMFlow от команды разработчиков АО НПО «МКМ» г. Ижевск. Данная программа определенно 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. В том числе, функционально-технические возможности LVMFlow позволяют учитывать применение противопопригарных покрытий, а также рассчитывать износ формы при ее многократном использовании.

Тогда, 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). В следующих версиях разработчики заявили о намерении осуществить распараллеливание и переход на 64-разрядную технологию взаимодействия компонентов программы с операционной системой Windows, что позволит ускорить работу программы, а также сгладить визуализацию технологического процесса отливки форм деталей в результате использования большего объема оперативной памяти и увеличения пропускной способности обмена данными с центральным процессором на 10 – 20 %.

Получается, что применение данных программных продуктов способствует повышению качества выполненных отливок с помощью проведения предварительных численных расчетов на соответствующей модели объекта, что позволит снизить процент брака до 85 %, сэкономить до 15 – 20 % электрической энергии, в том числе уменьшить вес отливок до 10 %, а также повысить производительность и общий уровень квалификации имеющихся сотрудников предприятия.

Стоит отметить, что в программную разработку подобных систем моделирования вложено много сил и инвестиций, в связи с чем стоимость внедрения такого рода программных решений на реальные производственные объекты составляет более 100 тыс. долларов. Как уже отмечалось, 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 металлургии. Однозначно, функциональность представленных программных решений не приспособлена для начального обучения и получения первичных навыков при работе пользователя с элементами интерфейса, в том числе отсутствует интеллектуальная система сопровождения взаимодействия пользователя с моделью объекта.

Таким образом, имеющиеся на мировом IT-рынке программные продукты не позволяют осуществлять повышение квалификации технологического персонала, а также не дают возможности получать оптимальные результаты смешивания литейных ковшей за наименьшее количество технологических операций. В том числе, такие программные решения не могут быть полноценно адаптированы в структуру металлургических предприятий РФ, особенно с учетом непростых межгосударственных взаимоотношений за последний период времени.

1.4 Принципы построения современных программных комплексов

В разделе представлен анализ основных принципов построения программных комплексов в виде информационно-обучающих систем с учетом современных тенденций программной разработки. При создании программных комплексов или других систем должен быть заложен принцип формирования полного ориентирования пользователя в целях технологического задания [50 – 52].

Принципы взаимодействия системы с пользователем могут быть представлены в виде двухуровневого управления действующим процессом. На нижнем уровне контура управления моделью технологического объекта обычно решается

задача передачи практических приемов и теоретических знаний обучаемому. Выработка необходимых знаний и умений возможна за счет многократных тренировок на математической модели объекта. В данном контуре, в качестве управляющего устройства выступает обучающийся, а математическая модель представленного процесса принимает роль изучаемого объекта [53].

Критерием оценки работы обучающегося является достижение требуемого качества регулирования технологическим процессом. Критерии качества управления совместно с другими сведениями устанавливаются верхним уровнем программного комплекса. При изучении методик управления различными технологическими процессами требуется выработка комплексных интеллектуальных навыков. Поэтому в большинстве случаев моделируемый процесс представляется в виде совокупности моделей технологического производства, системы отображения информации, а также в виде органов управления технологией производства, связанных с другими моделями внешних возмущений или ограничений [54].

На верхнем уровне контура, обеспечивающего управление обучением, решается задача управления подготовки обучающегося. Этот уровень, главным образом определяет отличительные особенности системы обучения от реальной системы управления технологическим объектом. Взаимодействие с моделью технологического процесса может осуществляться посредством обучающегося, управляющей программной средой или центральным процессором ЭВМ. Выявление целей и информационное содержание программы обучения является важнейшим этапом, определяющим основные особенности системы обучения.

Основные цели программной разработки должны быть иерархически организованы и сформулированы в терминах теоретических знаний, а также иметь способность учитывать реальный уровень подготовки обучаемого.

Содержательная часть комплекса программ должна учитывать основные принципы производственной деятельности предприятий. Для этого, необходимо сформулировать общий механизм решения технологических задач, заключающийся в следующих этапах:

- восприятию и анализе полученной информации;

- оценке состояния исследуемого объекта и предсказании его дальнейшего поведения при различных манипуляциях;
- принятии решений о расчете управляющих воздействий на процесс;
- реализации рассчитанного решения с учетом имеющихся ограничений.

При использовании комплекса программ в виде информационно-обучающей системы требуется выработка практических навыков и умений, которая должна увязываться с накоплением теоретических знаний, позволяя пользователю более осознанно подходить к управлению объектом. Формирование собственных алгоритмов контроля дает возможность своевременно адаптироваться к возникновению незнакомых или опасных ситуаций. Для металлургических процессов такой подход остается наиболее важным, так как управление технологическими процессами характеризуется существенной неопределенностью и не является достаточно формализованным явлением.

При разработке функциональной структуры системы моделирования формируется абстрактное представление о системе в целом, решаются вопросы информационного наполнения, определяются предназначения отдельных компонентов, а также устанавливаются тесные связи между ними. При этом необходимо исходить из общих кибернетических и образовательных требований к таким системам, так как важно осуществлять учет частных требований конкретных режимов управления. Наложение требований на разрабатываемую систему обусловлено заранее сформулированными технологическими целями и четкой содержательной постановкой задачи производства [55].

Дальнейший этап синтеза структуры модели объекта устанавливает новые требования к информационным характеристикам системы, определяя состав и предназначение основных компонентов модели. Синтез осуществляется исходя из анализа целей и содержания реальной технологической задачи. Набор данных, полученных при разработке функциональной структуры программы, основывается на общих положениях теории моделирования и управления.

С учетом этого, эффективность подсистемы управления обучением связана с решением следующих основных подзадач:

- информационное наполнение и выбор методики взаимодействия;
- поиск инструментов контроля и взаимодействия пользователя с системой;
- определение основного источника информации об объекте.

При разработке программы формируется алгоритм подготовки, устанавливающий порядок усвоения учебного материала и определяющий возможности функционирования всех режимов работы системы: обучения, тренировки и контроля знаний. Указанная программа разбивается на несколько частей в соответствии с информационными блоками данных и реализуется с учетом определенных методических, а также психологических требований. Переход от одного этапа обучения к другому, а также выбор соответствующей ветви программы осуществляется на основе показателей выполнения поставленных ранее подзадач [56].

Контроль процесса взаимодействия осуществляется путем анализа производственных целей и содержания результирующих данных, отражающих качество работы реальной системы. Опыт создания достаточно сложных систем обучения показывает, что имеются принципиальные трудности построения единственно верного критерия оценки работы всего программного комплекса.

Поэтому при планировании процесса подготовки персонала металлургических производств с использованием компьютера, возникает необходимость построения критерия или системы критериев, относительно которых должен строиться процесс оценки работы пользователя. Кроме того, для оперативного контроля и корректировки правильности приобретаемых навыков необходимо иметь в наличии варианты эталонных алгоритмов, которые должны быть основой для оценки результатов обучающегося. Система наставничества может строиться на различных методах обучения, например, «по образцу», то есть окончательная оценка итогового решения определяется уровнем приближения полученных результатов относительно имеющихся эталонных значений, предопределенных с помощью специальных алгоритмов [57].

Выбор источника информации осуществляется на основе требований, выработанных на этапе синтеза структуры подсистемы управления программного комплекса. При формировании собственного источника учебной информации в его

состав должны быть включены теоретические сведения о технологии процесса, о моделируемой системе управления, о программном алгоритме обучения и необходимых критериях оценки. Стоит отметить, что для производственного класса задач наиболее важными составными элементами интерфейса являются настроечные параметры внешних возмущений окружающей среды и модуль отображения информации, характеризующий ход протекания процесса.

Завершающим этапом синтеза образовательной системы является ее техническая реализация, осуществляемая на основе эталонных алгоритмов и общих требований, предъявляемых к каждому компоненту разработки. Зарождение идеи использования компьютерных технологий для изучения различных технологических процессов связано с достижениями научно-технического прогресса в областях теоретической и практической деятельности человека [58].

Затрагивая теорию построения игровых систем, стоит отметить, что игра - это тоже программа, однако ее особенность состоит в том, что она преподносит пользователю нужную информацию в игровой, то есть доступной форме, вызывая интерес к изучению материала [59, 60]. Основное преимущество игр заключается в том, что человек принимает непосредственное участие в процессе игры, например, управляет персонажем виртуального мира, переживает вместе с ним происходящие в игровом мире события или становится участником какого-либо производственного процесса. Прежде всего, благодаря обдуманым действиям пользователя имеется возможность получить продвижение в игровом режиме. Все это прямым образом оказывает существенное влияние на подсознание человека [61, 62].

Образовательной игровой системой считается такая система, которая включает в себя элементы обучающих программ, взаимодействующих с пользователем через игровой интерфейс на мониторе вычислительного устройства с целью повышения интереса человека к работе посредством ярких и запоминающихся образов [63]. Так, игровой режим работы полезен тем, что создает правдивый эффект симуляции различных виртуальных действий, но при этом не несет в себе никакой реальной опасности для сознания человека и его окружающего пространства [64].

Перед взаимодействием с неизвестным объектом требуется теоретическая

осведомленность человека о наличии внешних воздействий на изучаемый объект, так как не все объекты изучения являются стабильными и безопасными для рассмотрения. Поднимая игровой уровень умений, человек повышает и свой настоящий уровень знаний. Система, позиционирующаяся как игровая, позволяет реализовать развлекательную мотивацию для достижения образовательных целей. Поэтому довольно часто взаимодействие пользователя с вычислительной техникой создает парасоциальные отношения между ними.

В целом, актуальность создания программных комплексов обусловлена трендовыми тенденциями настоящего времени. Во-первых, постоянное усложнение технологических процессов и появление новых информационных систем диктует потребность в повышении уровня квалификации технологического персонала промышленных предприятий. Во-вторых, развитие информационных технологий и средств разработки предоставляет широкие возможности по созданию новых многофункциональных программных продуктов, предназначенных для исследования различных процессов. Такой подход превосходит по своей действенности другие методы и формы обучения, включая потенциально опасные тренировки на функционирующих объектах [65].

Построение математической модели технологического объекта является одной из ключевых задач разработки компьютерных систем [66]. Модель технологического объекта управления должна обеспечивать выполнение важных аспектов в виде достижения технологических целей обучения, а также соблюдения образовательных принципов. Поэтому, наиболее общим требованием к модели объекта является ее максимально близкое подобие к реальному объекту или агрегату.

Для соблюдения информационного подобия модели необходимо:

- определить совокупность воспроизводимых параметров;
- обосновать и обеспечить точность их моделирования;
- обеспечить адекватность отображения информации об этих параметрах.

Отбор параметров необходим для упрощения реализации модели за счет исключения избыточной информации о производственной технологии с учетом важности и оценки ее информативности. При формировании практических навыков

ведения технологического процесса в качестве критерия точности модели может быть взята точность опытного «эталонного» оператора, характеризующаяся ошибкой прогноза. Это условие позволяет обеспечить практическую подготовку обучаемого до уровня, взятого за эталон квалифицированного оператора [67, 68].

Имитация помех и возмущений в системе служит для организации приближенных производственных условий и создания соответствующего эмоционального фона работы. При этом усиливается адекватность формируемых навыков обучаемого и повышается эффективность взаимодействия пользователя с программным комплексом. Важно обеспечить адекватный режим восприятия отображаемой информации пользователем, исключить ее искажение, приблизить к реальным условиям, учесть крайние варианты исхода событий [69]. В ходе управления технологическими процессами должна быть реализована связь взаимозависящих процессов, в рамках имеющихся ограничений, накладываемых друг на друга. Идентификация результатов работы обычно осуществляется на основе преобразований входных потоков информации в соответствии с известными методами поиска экстремума целевой функции для выбранного критерия расчета, зависящего от искоемых коэффициентов модели. В качестве критерия оценивания результатов управления может использоваться критерий среднеквадратической ошибки, так как он быстро вычисляется и приводит к наиболее быстрой сходимости.

Используемая в процессе обучения система наставничества обычно обладает наибольшей эффективностью, если позволяет сформировать комплексный набор навыков принятия решений, основывающийся на возможности моделирования динамического отклика исследуемого объекта управления на произвольные воздействия пользователя системы [70].

В результате сформулированы следующие основополагающие требования к построению современных программных комплексов:

- моделирование технологического процесса должно производиться в масштабе реального времени, позволяя более осмысленно осуществлять управление выбранным объектом;
- информационная модель технологического процесса должна содержать

некоторое количество точек (моментов времени) съема информации о результатах работы пользователя;

- средства отображения информации о ходе производственного процесса должны обеспечивать пользователя актуальной информацией без искажения фактов работы;

- основные органы управления технологическим объектом необходимо максимально приблизить к реальным во всех их проявлениях;

- система обучения должна обеспечивать пользователя набором стандартных или настраиваемых задач;

- все процессы в системе должны быть взаимосвязаны, чтобы любые изменения параметров объекта оказывали свое влияние на ход моделирования;

- моделирование производственных технологий должно основываться на реальных научных знаниях физики, химии, математики;

- интерфейс системы должен обеспечивать постоянный контроль наиболее важных параметров протекания технологического процесса;

- интерфейс системы должен создавать атмосферу реального рабочего места сотрудника предприятия, влиять на сознание пользователя;

- время работы модели технологического объекта должно масштабироваться;

- применение звуковых эффектов усиливает эффект присутствия в среде;

- использование рекомендаций системы обучения должно быть не только простым и удобным, но и интуитивно понятным пользователю;

- повышение интереса к системе обучения также достигается наличием информационной базы, описывающей основные этапы производства;

- наличие инструкции по использованию системы обучения имеет положительное значение к ее внедрению;

- визуальный интерфейс должен располагать пользователя к использованию программного комплекса, вызывать положительные эмоции;

- наиболее важной составляющей системы обучения является выработка критериев и методов оценивания результатов работы пользователя.

Если соблюдать данные предписания, то компьютерная система позволит реализовать свойство амбивалентности, которое позволяет осуществлять одновременное использование реального и условного поведения человека [71 – 75]. Новая условность человеко-машинных отношений открывает важную суть личности и создает благоприятный личностный настрой, позволяя без пагубных последствий реализовывать собственный потенциал взаимодействия с объектом.

1.5 Содержательная постановка задачи

Как уже было отмечено, процесс шихтовки алюминиевого расплава в наибольшей степени зависит от навыков и трудового опыта шихтовщика. На сегодняшний день процесс модификации расплава происходит эмпирическим путем, то есть методом «проб и ошибок» на основе использования примитивных средств расчета, предназначенных для вычисления количества массовых добавок имеющихся компонентов, что зачастую приводит к ошибкам шихтовки и увеличению себестоимости готовой продукции.

В связи с этим, актуальна разработка специального комплекса программ в виде автоматизированной информационно-обучающей системы «Алюминщик» для визуального моделирования технологического процесса формирования алюминиевых сплавов с учетом различных требований и ограничений, а также с целью проведения вычислительных экспериментов для поиска эффективного решения задач шихтовки. Также, необходимо, чтобы информационно-обучающая система могла быть использована для обучения и повышения квалификации технологического персонала. Разработанное программное решение главным образом планируется ввести в эксплуатацию на предприятие АО «НКАЗ», а позже и на другие аналогичные предприятия компании «РУСАЛ» с учетом сроков согласования.

Таким образом, для реализации поставленных задач требуется разработать математическую модель процесса, решить задачу выбора исходных компонентов, определить набор требований к программной разработке, выбрать среду разработки, а также провести эффективное тестирование разработанного программного продукта с использованием технологических данных.

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

2.1 Общая характеристика технологического объекта

Объектом исследования является технологический процесс формирования алюминиевого расплава в миксере литейного отделения. Схема миксера и общий вид литейных ковшей приведен на рисунке 2.1.

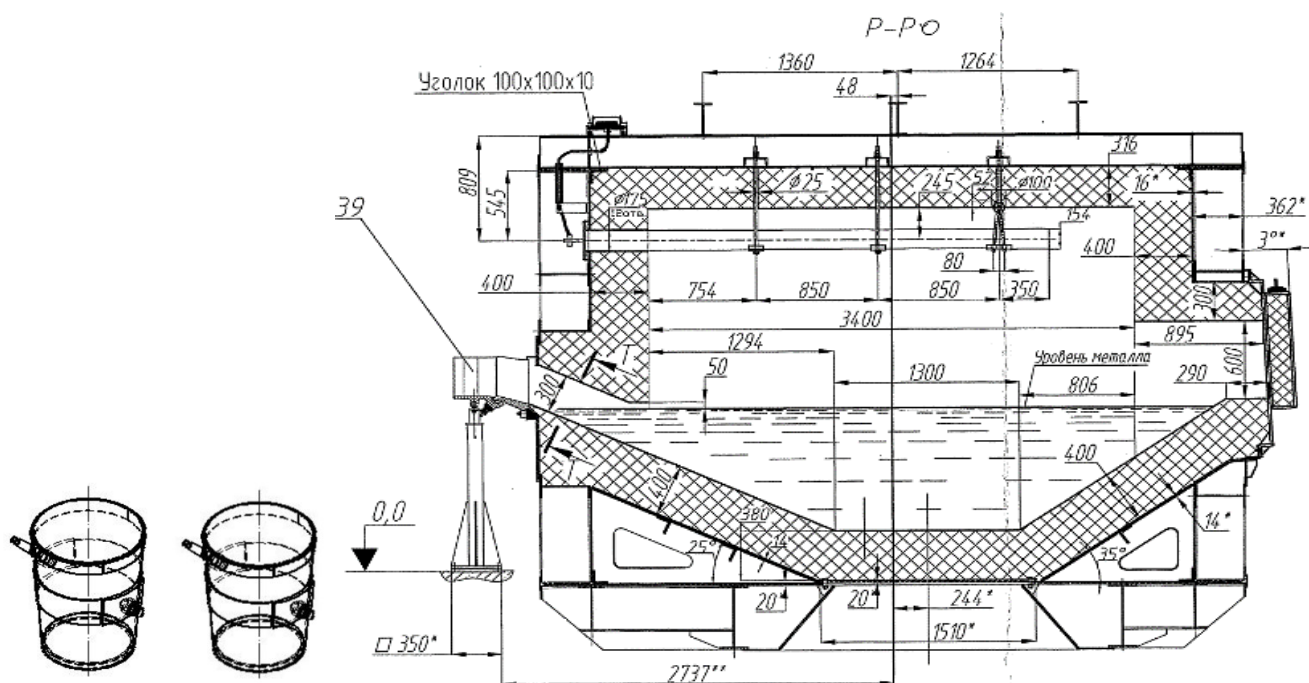


Рисунок 2.1 – Схема миксера и общий вид литейных ковшей

Технологический процесс формирования алюминиевого расплава в миксере относится к сложным многопараметрическим объектам [76 – 81]. Поэтому при выделении объекта исследования предложены следующие параметры: параметры входных потоков, параметры выходных потоков, технологические параметры и технико-экономические показатели (рисунок 2.2) [82].

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 расплава алюминия-сырца в k -ом литейном ковше, °C.

Параметрами выходных потоков являются: 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.

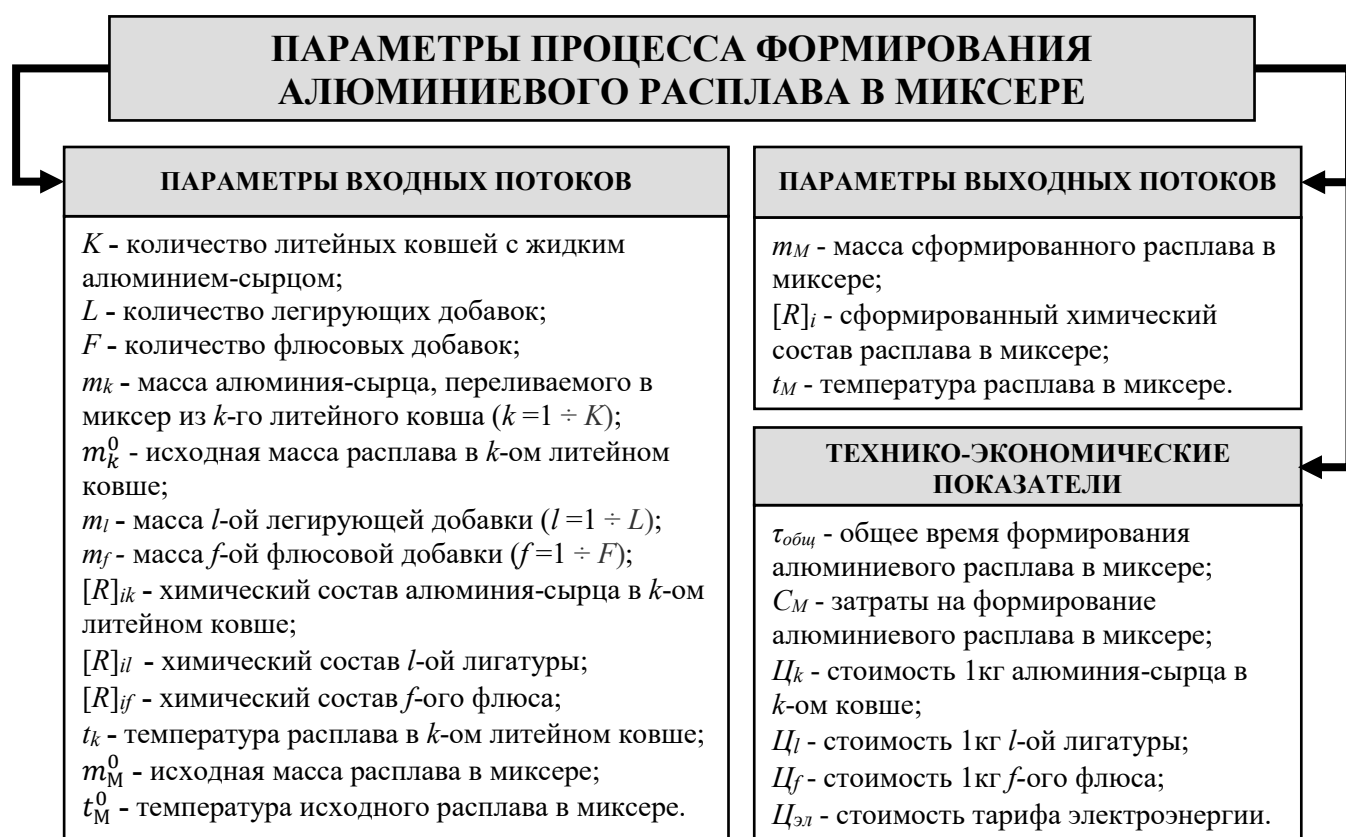


Рисунок 2.2 – Параметры технологического процесса формирования
алюминиевого расплава в миксере

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.

2.2 Разработка математической модели технологического процесса формирования алюминиевого расплава

Технологический процесс формирования алюминиевого расплава в миксере литейного отделения осуществляется путем смешивания алюминия-сырца из доступного набора литейных ковшей, а также введения в жидкий расплав легирующих и флюсовых добавок с соблюдением температурного режима с целью обеспечения получения требуемой массы, химического состава и температуры расплава. В случае, если из исходного набора литейных ковшей с алюминием-сырцом невозможно получить необходимый алюминиевый расплав с заданными технологическими свойствами, то в основу расплава повторно вводятся корректирующие добавки лигатур и флюсов.

В результате, процесс формирования алюминиевого расплава в миксере можно разделить на два последовательных этапа: формирование основы расплава путем смешивания алюминия-сырца из литейных ковшей и последующая модификация расплава легирующими добавками и флюсами.

Первый этап процесса формирования алюминиевого расплава заключается в переливе 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:

$$m_M = m_M^0 + \sum_{k=1}^K m_k, \quad (2.1)$$

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:

$$m_i = \left(\frac{m_M^0 [R]_i}{100} + \sum_{k=1}^K \frac{m_k [R]_{ik}}{100} \right) \cdot (1 - \eta_i), \quad (2.2)$$

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, %;

η_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:

$$\begin{cases} v_k = \frac{dm_k}{d\tau} = -\gamma m_k \\ v_M = \frac{dm_M}{d\tau} = \gamma(m_M^0 + m_k^0 - m_M), \\ m_k(0) = m_k^0 \\ m_M(0) = m_M^0 \end{cases} \quad (2.3)$$

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;

τ – текущее время, с;

γ – 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 [83, 84] можно представить в следующем виде:

$$\frac{dm_M^X}{d\tau} = \gamma(m_M^{X_0} + m_k^{X_0} - m_M^X); m_M^X(0) = m_M^{X_0}. \quad (2.4)$$

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

$$\frac{dm_k^X}{d\tau} = -\gamma m_k^X; m_k^X(0) = m_k^{X_0}. \quad (2.5)$$

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

$$\begin{cases} X_M = (m_M^{Fe}, m_M^{Si}, m_M^{Ti}, m_M^{Al}, m_M^{Cu}, m_M^{Zn}, m_M^{Mn}, m_M^{Mg}, m_M^{Pb}, m_M^{Sn})^T \\ X_k = (m_k^{Fe}, m_k^{Si}, m_k^{Ti}, m_k^{Al}, m_k^{Cu}, m_k^{Zn}, m_k^{Mn}, m_k^{Mg}, m_k^{Pb}, m_k^{Sn})^T \end{cases} \quad (2.6)$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{dm_M^{Fe}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Fe_0} + m_k^{Fe_0} - m_M^{Fe}); m_M^{Fe}(0) = m_M^{Fe_0} \\
\frac{dm_M^{Si}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Si_0} + m_k^{Si_0} - m_M^{Si}); m_M^{Si}(0) = m_M^{Si_0} \\
\frac{dm_M^{Ti}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Ti_0} + m_k^{Ti_0} - m_M^{Ti}); m_M^{Ti}(0) = m_M^{Ti_0} \\
\frac{dm_M^{Al}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Al_0} + m_k^{Al_0} - m_M^{Al}); m_M^{Al}(0) = m_M^{Al_0} \\
\frac{dm_M^{Cu}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Cu_0} + m_k^{Cu_0} - m_M^{Cu}); m_M^{Cu}(0) = m_M^{Cu_0} \\
\frac{dm_M^{Zn}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Zn_0} + m_k^{Zn_0} - m_M^{Zn}); m_M^{Zn}(0) = m_M^{Zn_0} \\
\frac{dm_M^{Mn}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Mn_0} + m_k^{Mn_0} - m_M^{Mn}); m_M^{Mn}(0) = m_M^{Mn_0} \\
\frac{dm_M^{Mg}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Mg} + m_k^{Mg_0} - m_M^{Mg}); m_M^{Mg}(0) = m_M^{Mg_0} \\
\frac{dm_M^{Pb}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Pb} + m_k^{Pb} - m_M^{Pb}); m_M^{Pb}(0) = m_M^{Pb} \\
\frac{dm_M^{Sn}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Sn} + m_k^{Sn} - m_M^{Sn}); m_M^{Sn}(0) = m_M^{Sn_0}
\end{array} \right. , \quad (2.7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{dm_k^{Fe}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Fe}; m_k^{Fe}(0) = m_k^{Fe_0} \\
\frac{dm_k^{Si}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Si}; m_k^{Si}(0) = m_k^{Si_0} \\
\frac{dm_k^{Ti}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Ti}; m_k^{Ti}(0) = m_k^{Ti_0} \\
\frac{dm_k^{Al}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Al}; m_k^{Al}(0) = m_k^{Al_0} \\
\frac{dm_k^{Cu}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Cu}; m_k^{Cu}(0) = m_k^{Cu_0} \\
\frac{dm_k^{Zn}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Zn}; m_k^{Zn}(0) = m_k^{Zn_0} \\
\frac{dm_k^{Mn}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Mn}; m_k^{Mn}(0) = m_k^{Mn_0} \\
\frac{dm_k^{Mg}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Mg}; m_k^{Mg}(0) = m_k^{Mg_0} \\
\frac{dm_k^{Pb}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Pb}; m_k^{Pb}(0) = m_k^{Pb_0} \\
\frac{dm_k^{Sn}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Sn}; m_k^{Sn}(0) = m_k^{Sn_0}
\end{array} \right. . \quad (2.8)$$

В результате исходная задача Коши в векторной форме имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dX_k}{d\tau} = -\gamma X_k \\ \frac{dX_M}{d\tau} = \gamma(X_M^0 + X_k^0 - X_M), \\ X_k(0) = X_k^0 \\ X_M(0) = X_M^0 \end{cases} \quad (2.9)$$

где X_M – вектор значений масс химических элементов в миксере;

X_k – вектор значений масс химических элементов в k -ом литейном ковше.

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

$$m_M = m_M^0 + \sum_{k=1}^K m_k + \sum_{l=1}^L m_l + \sum_{f=1}^F m_f, \quad (2.10)$$

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 перелитого алюминия-сырца из литейных ковшей, а также массой введенных в основу расплава лигатур и флюсов с соответствующим химическим составом:

$$m_i = \left(\frac{m_M^0[R]_i}{100} + \sum_{k=1}^K \frac{m_k[R]_{ik}}{100} + \sum_{l=1}^L \frac{m_l[R]_{il}}{100} + \sum_{f=1}^F \frac{m_f[R]_{if}}{100} \right) \cdot (1 - \eta_i), \quad (2.11)$$

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, %;

η_i – коэффициент угара i -го элемента.

Технологический процесс формирования алюминиевого расплава реализуется в установленном температурном режиме. Для расчета текущей температуры формируемого алюминиевого расплава в результате смешивания исходного алюминия-сырца с отличающимися значениями температуры предлагается использовать следующее уравнение:

$$t_M = \frac{(m_M^0 t_M^0 + \sum_{k=1}^K m_k t_k)}{m_M} + \Delta t, \quad (2.12)$$

где t_M – текущая температура алюминиевого расплава в миксере, °C;

t_M^0 – исходная температура алюминиевого расплава в миксере перед началом смешивания алюминия-сырца, °C;

t_k – температура жидкого алюминия-сырца в k -ом литейном ковше, °C;

Δt – приращение температуры в миксере за счет работы нагревательных элементов, компенсирующих тепловые потери при введении лигатур и флюсов, а также с учетом естественного охлаждения металла, °C.

Блок-схема математической модели процесса формирования алюминиевого расплава представлена на рисунке 2.3.

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

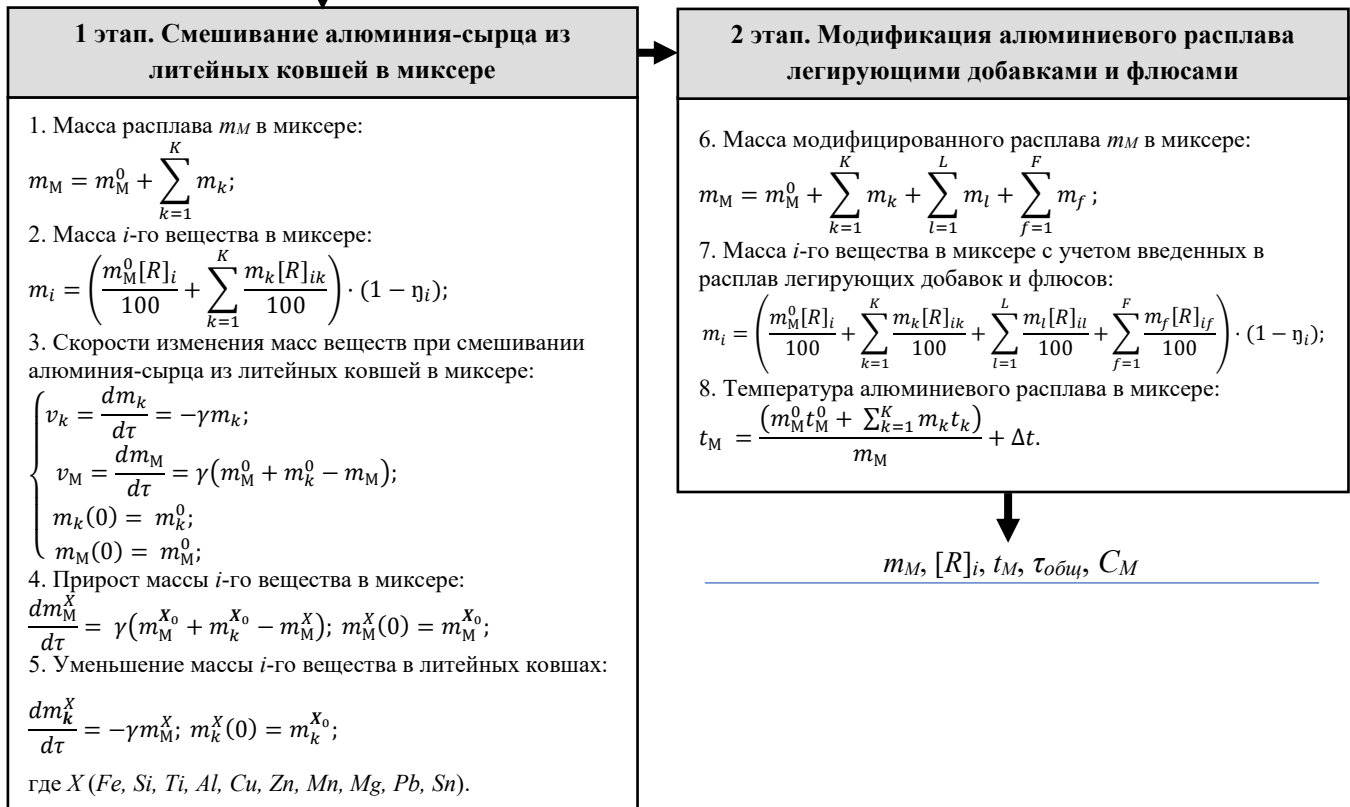


Рисунок 2.3 – Блок-схема математической модели процесса формирования алюминиевого расплава в миксере

Процесс диффузии компонентов расплава в миксере при добавлении алюминия-сырца из литейного ковша представляет собой краевую задачу математической физики с соответствующими краевыми условиями [85, 86]. При этом через C обозначена концентрация произвольного химического элемента, входящего в состав алюминиевого расплава, которая является функцией времени и пространственных координат $C = C(\tau, x, y, z)$.

Процесс диффузии рассматриваемого компонента описывается с помощью уравнения диффузии, которое в дивергентной форме имеет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = \text{div} (D \cdot \text{grad} C), \quad (2.13)$$

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;

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

Уравнение диффузии (2.13) в координатной форме имеет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = \frac{\partial D}{\partial x} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial D}{\partial y} \cdot \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial D}{\partial z} \cdot \frac{\partial C}{\partial z} + D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right). \quad (2.14)$$

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

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial \tau} = \operatorname{div} (D \cdot \operatorname{grad} C) \\ C(0, x, y, z) = C_0(x, y, z) \\ (\operatorname{grad} C, \mu)|_{\partial G_M} = \varphi(x, y, z) \end{cases}, \quad (2.15)$$

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

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

Граничное условие краевой задачи (2.15), записанное как скалярное произведение векторов $\operatorname{grad} C$ и μ в любой точке границы ∂G_M позволяет учесть наклон участков границы исследуемой области миксера и в по координатной форме записи имеет вид:

$$(\operatorname{grad} C, \mu)|_{\partial G_M} = \frac{\partial C}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial C}{\partial y} \cos \beta + \frac{\partial C}{\partial z} \cos \gamma = \varphi(x, y, z). \quad (2.16)$$

После формирования необходимой массы алюминиевого расплава в миксере необходимо учесть распределение коэффициента диффузии компонентов расплава в диапазоне изменения значений при молекулярной и турбулентной диффузии под воздействием перемешивания различной степени интенсивности. В месте заливки алюминия-сырца из литейных ковшей реализуется самое высокое значение коэффициента диффузии, соответствующее режиму турбулентной диффузии, которое

постепенно уменьшается по мере увеличения расстояния от места заливки алюминия-сырца из литейного ковша. В 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:

$$\frac{(x-x_k)^2}{a^2} + \frac{(y-y_k)^2}{b^2} = 1, \text{ где } x_k = \frac{x_{k1}+x_{k2}}{2}. \quad (2.17)$$

При этом 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, отражающего 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.

В целом, 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:

$$D = D_m + \alpha e^{-\beta s}, \quad (2.18)$$

где D_m – коэффициент молекулярной диффузии;

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

α, β – настроечные параметры, характеризующие процесс диффузии.

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 объему миксера.

2.3 Разработка численного метода решения уравнения диффузии в рамках поставленной краевой задачи математической физики

Для решения уравнения диффузии (2.13) использовался метод конечно-разностной аппроксимации дифференциальных уравнений [87 – 94].

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

$$\begin{cases} \frac{C_{ijk}^{n+1} - C_{ijk}^n}{\Delta\tau} = \Lambda_{ijk}^{n+1} \\ C_{ijk}^n|_{n=0} = C_{0ijk} \\ \frac{3C_\Gamma - 4C_{\Gamma-1} + C_{\Gamma-2}}{2\Delta\mu} = \varphi_\Gamma \end{cases}, \quad (2.19)$$

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

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

$\Gamma, \Gamma-1, \Gamma-2$ – нумерация узлов конечно-разностной сетки в произвольной точке границы ∂G_M , а также в ближайших к границе двух узлах сетки вдоль направления, противоположного направлению нормали внутри области G_M ;

$\Delta\tau$ – шаг дискретизации при аппроксимации производной $\frac{\partial C}{\partial \tau}$ по времени;

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

Для решения конечно-разностной задачи (2.19) 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:

$$\begin{aligned} C_{ijk}^{n+1} = C_{ijk}^n + \Delta\tau & \left(\frac{(D_{i+1,j,k} - D_{i-1,j,k})(C_{i+1,j,k}^{n+1} - C_{i-1,j,k}^{n+1})}{4(\Delta x)^2} + \right. \\ & + \frac{(D_{i,j+1,k} - D_{i,j-1,k})(C_{i,j+1,k}^{n+1} - C_{i,j-1,k}^{n+1})}{4(\Delta y)^2} + \frac{(D_{i,j,k+1} - D_{i,j,k-1})(C_{i,j,k+1}^{n+1} - C_{i,j,k-1}^{n+1})}{4(\Delta z)^2} + \\ & \left. + D \left(\frac{C_{i-1,j,k}^{n+1} - 2C_{ijk}^{n+1} + C_{i+1,j,k}^{n+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{C_{i,j-1,k}^{n+1} - 2C_{ijk}^{n+1} + C_{i,j+1,k}^{n+1}}{(\Delta y)^2} + \frac{C_{i,j,k-1}^{n+1} - 2C_{ijk}^{n+1} + C_{i,j,k+1}^{n+1}}{(\Delta z)^2} \right) \right). \end{aligned} \quad (2.20)$$

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

$$F(C_{ijk}^{n+1}) = 0. \quad (2.21)$$

В результате преобразований получается:

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

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

$$C_{ijk}^{n+1(s+1)} = C_{ijk}^{n+1(s)} + \lambda F(C_{ijk}^{n+1(s)}), \quad (2.23)$$

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

Значение параметра λ выбиралось достаточно малым по модулю, то есть $|\lambda| \ll 1$, с целью обеспечения сходимости итераций с дальнейшим его увеличением по модулю 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 (2.22) в (2.23) получается следующая последовательность итерационных вычислений:

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

Итерационный процесс завершается при выполнении условия:

$$\sum_{ijk} |C_{ijk}^{n+1(s+1)} - C_{ijk}^{n+1(s)}| \leq \varepsilon, \quad (2.25)$$

где ε – заданная точность вычислений.

Таким образом, при выполнении условия (2.25) в качестве значений C_{ijk}^{n+1} используются значения, достигнутые на последней выполненной итерации, то есть $C_{ijk}^{n+1} = C_{ijk}^{n+1(s+1)}$.

2.4 Выводы к главе 2

1. Выделен объект исследования применительно к математическому моделированию процесса формирования алюминиевых сплавов в миксере. Определены переменные входных-выходных потоков, технологические параметры и технико-экономические показатели.

2. Для целей исследования разработана математическая модель, описывающая взаимосвязь входных-выходных переменных и параметров технологического процесса формирования алюминиевого расплава в миксере, полученного путем последовательного смешивания алюминия-сырца из литейных ковшей, а также добавок модифицирующих материалов в виде 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 дает возможность определить необходимое количество алюминия-сырца из литейных ковшей с учетом расходов лигатур и флюсов, что непосредственно обеспечивает формирование алюминиевого 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 перемешивания различной степени интенсивности, что позволяет наиболее точно оценить время усреднения концентраций компонентов алюминиевого расплава в миксере.

3 Разработка программного комплекса «Алюминщик» для исследования процесса формирования алюминиевого расплава с возможностью обучения технологического персонала

3.1 Принципы разработки программного комплекса «Алюминщик»

Перед началом разработки программного комплекса были выполнены следующие подготовительные этапы:

- сформирован план реализации разработанной математической модели объекта и численного метода решения уравнений диффузии компонентов формируемого расплава в миксере;
- сформирован набор исходных данных технологического процесса формирования алюминиевых сплавов с учетом особенностей производства;
- рассмотрены возможности взаимодействия программного продукта с системами дистанционного обучения;
- выбран современный язык объектно-ориентированного программирования с обеспечением возможности последующего внедрения программного продукта в информационную среду промышленных предприятий;
- описана структура основополагающих классов объектов системы;
- спроектированы диалоговые окна пользовательского интерфейса системы;
- спроектирован информационный блок, содержащий сведения об основных этапах производства алюминия для самостоятельного изучения технологии;
- сформирован блок информационной поддержки пользователя при работе с интерфейсом системы;
- сформирован последовательный алгоритм оценки действий пользователя при работе с интерактивным интерфейсом системы.

Тем самым, были учтены основополагающие принципы программной разработки, а также определены наиболее важные функционально-технические возможности реализуемого программного комплекса «Алюминщик» [95].

К наиболее важным функционально-техническим возможностям относятся:

- возможность выбора соответствующей роли доступа к системе, а именно «Пользователь» или «Администратор»;
- возможность ввода данных о температуре, полезной емкости, исходном химическом составе расплава в миксере или литейных ковшах с возможностью проверки исходных значений на их правильность и логичность;
- доступ к структурированной информационной базе знаний, которая содержит сведения об основных этапах производства алюминия;
- визуализация технологического процесса шихтовки алюминиевого расплава в целях понимания и управления его составляющими операциями;
- действия по технической поддержке объектов моделирования: заливка алюминия-сырца, удаление осадка, подогрев расплава, разливка слитков и т.д.;
- возможность использования легирующих компонентов и флюсов для модификации алюминиевого расплава;
- отбор пробы изменяющегося химического состава расплава в миксере;
- имитация продувки алюминиевого расплава в миксере с использованием встроенного набора инертных газов;
- поиск решения исходной учебно-технологической задачи на любом этапе шихтовки с учетом текущих положительных или отрицательных результатов;
- интеллектуальный голосовой помощник, обеспечивающий пользователя необходимыми рекомендациями касаясь любых действий в системе;
- запись всех произведенных пользователем управляющих воздействий в отдельный файл для дальнейшего анализа и обработки.

С учетом того, что в программном комплексе «Алюминщик» имеется возможность выбора соответствующей роли пользователя, то в связи с этим открывается индивидуальный доступ к различным наборам инструментов для настройки и работы в информационно-обучающей системе. Так, администратор системы имеет возможность редактировать исходные данные и устанавливать ограничения учебно-технологической задачи, а обучающийся может беспрепятственно загружать только готовые файлы данных.

На рисунке 3.1 представлена схема взаимодействия пользователя с основными компонентами программного комплекса «Алюминщик» с учетом его функциональных возможностей и присутствием всплывающих рекомендаций [96]. При этом обучающийся обязан самостоятельно определить расходы алюминия-сырца из предложенного набора литейных ковшей и количество модифицирующих добавок для получения алюминиевого расплава с заданным химическим составом, который должен соответствовать установленной марке сплава.

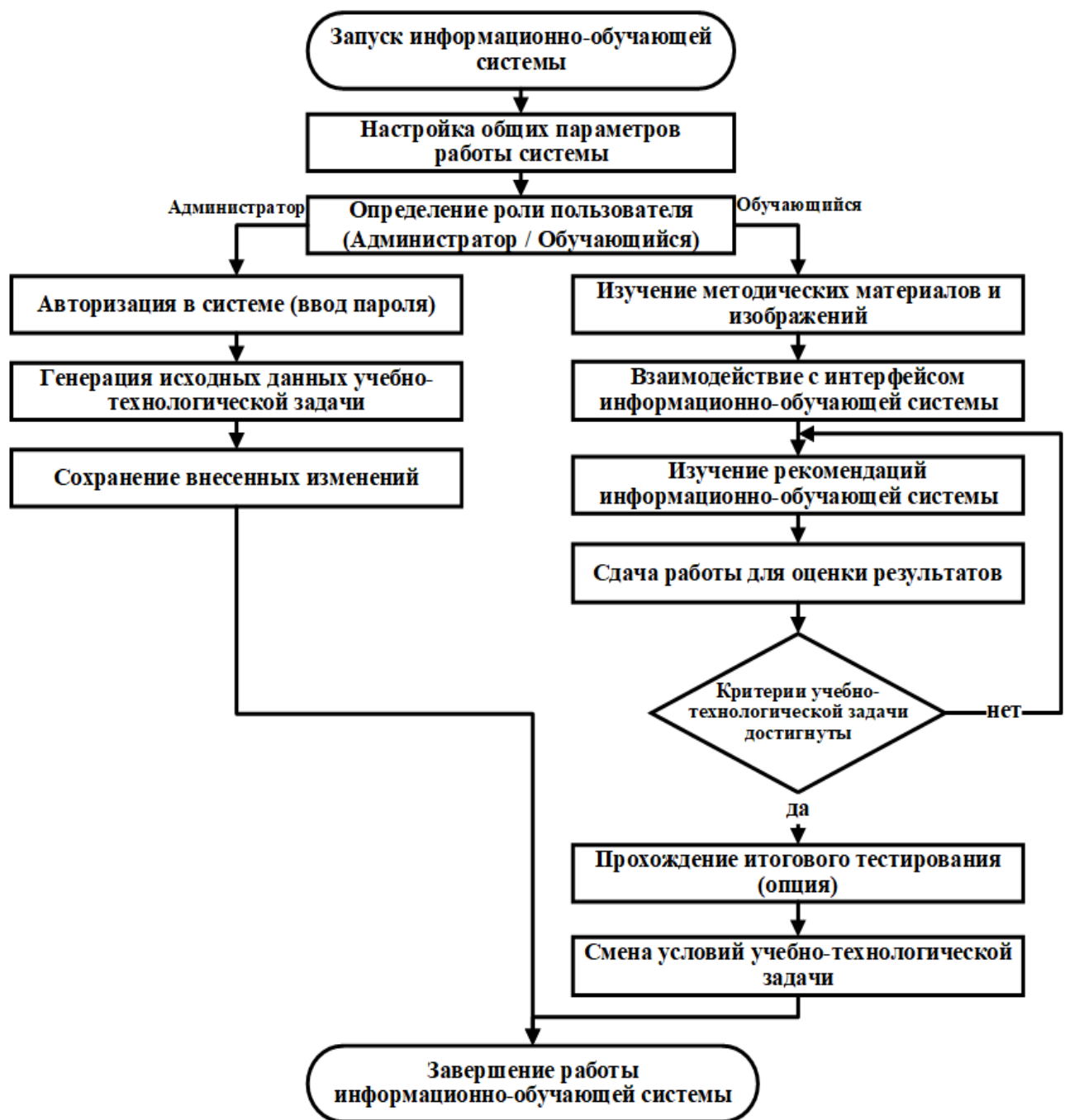


Рисунок 3.1 – Блок-схема работы программного комплекса «Алюминщик»

Также структуру программного комплекса «Алюминщик» можно упрощенно представить в виде блоков (рисунок 3.2), позволяющих в интерактивном режиме вводить исходные данные по расходам, температуре, химическому составу материалов и технологическим параметрам процесса, рассчитывать материальный и тепловой балансы, параметры диффузии и перемешивания металла в миксере, а также учитывать технико-экономические показатели протекания исследуемого технологического процесса [97].

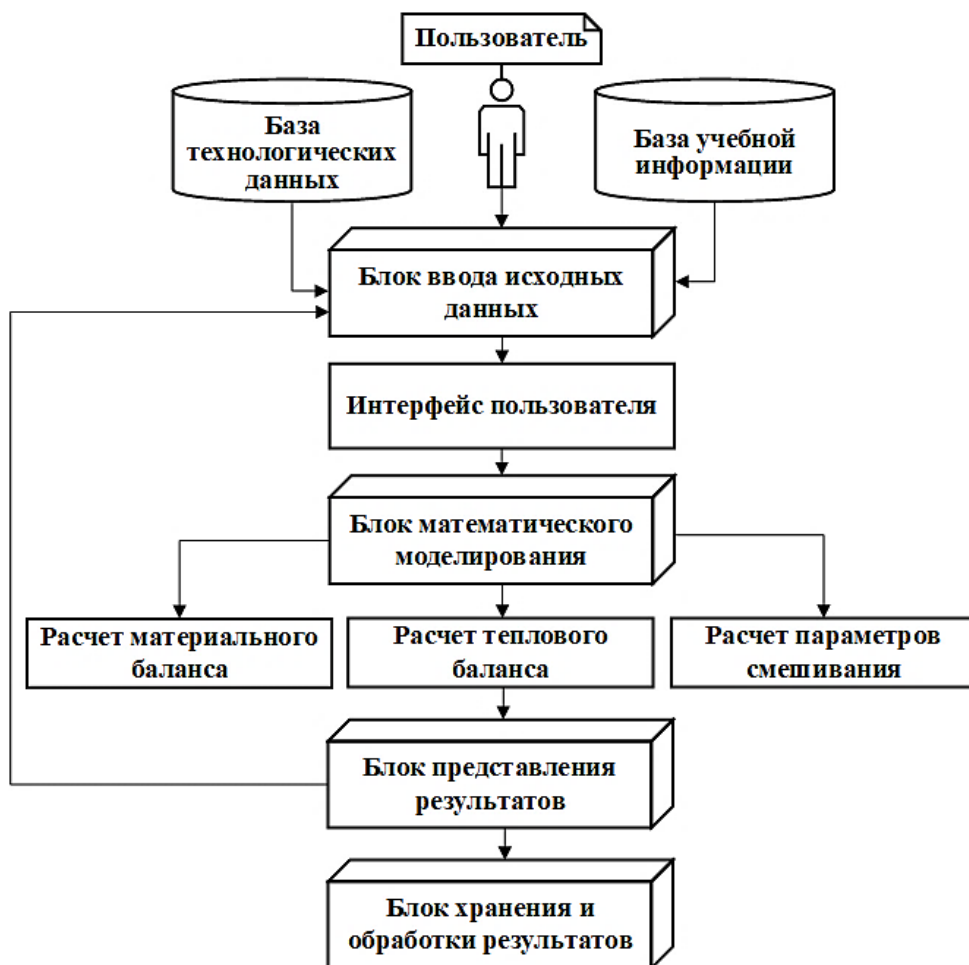


Рисунок 3.2 – Схема взаимодействия основных компонентов программного комплекса «Алюминщик»

Таким образом, с учетом представленных функционально-технических возможностей программный комплекс должен обеспечивать моделирование технологического процесса формирования требуемой марки алюминиевого сплава с заданным химическим составом в соответствии с различным набором исходных данных и действующих ограничений.

3.2 Реализация программного комплекса «Алюминщик» на основе высокоуровневого объектно-ориентированного языка программирования

Реализация программного комплекса в виде информационно-обучающей системы «Алюминщик» осуществлена на языке объектно-ориентированного программирования высокого уровня C# с использованием современной среды разработки Microsoft Visual Studio в редакции Community [98, 99].

Выбор данного языка обусловлен его лидирующими преимуществами над другими языками программирования. Так, долгое время основным языком для коммерческих и авторских разработок считался язык предшественник C++. Однако для написания крупных высоконагруженных проектов, использование предшествующих методов разработки недопустимо, так как это связано с большими трудовыми затратами на написание кода и отладку рабочего варианта программы [100]. Использование C++ и других чуть менее распространенных языков программирования (например, Java) порождает постоянные проблемы с утечкой памяти и способствует появлению прочих неявных ошибок, наличие которых можно выявить только на стадии тестирования программного продукта, в связи с этим необходимо более тщательно выбирать инструменты разработки [101].

Современный 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.

Также неотъемлемым преимуществом использования данного языка программирования является мощная среда разработки, именуемая Microsoft Visual Studio. Данная среда разработки имеет удобный функционал для разработки крупных проектов и предоставляет широкие возможности по взаимодействию с сервисными службами операционной системы Windows [102].

Еще одним полезным преимуществом использования среды разработки Microsoft Visual Studio остается огромный набор скомпилированных открытых

библиотек, повышающих гибкость разработки за счет их внедрения в разрабатываемое решение. Например, использование библиотек Microsoft Office позволяет устанавливать взаимосвязь программного продукта с офисным набором функций [103]. Следовательно, объектно-ориентированный подход и широкий набор средств среды разработки Microsoft Visual Studio позволяют языку C# оставаться самым быстроразвивающимся, многофункциональным и актуальным инструментом в отрасли информационных технологий [104].

В ходе работы был 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 изменяемых данных, чтобы исключить выполнение недопустимых пользовательских действий. Работа с информационно-обучающей системой сопровождается различными всплывающими сообщениями, описывающими причины некорректных действий пользователя [105 – 108].

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 [109 – 112].

В разработанной информационно-обучающей системе «Алюминщик» используются три основных класса: Form (Форма), Mixer (Миксер) и Bucket (Ковш), которые являются основополагающими структурными единицами [113 – 117] и непосредственно взаимодействуют между собой (рисунок 3.3).

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.

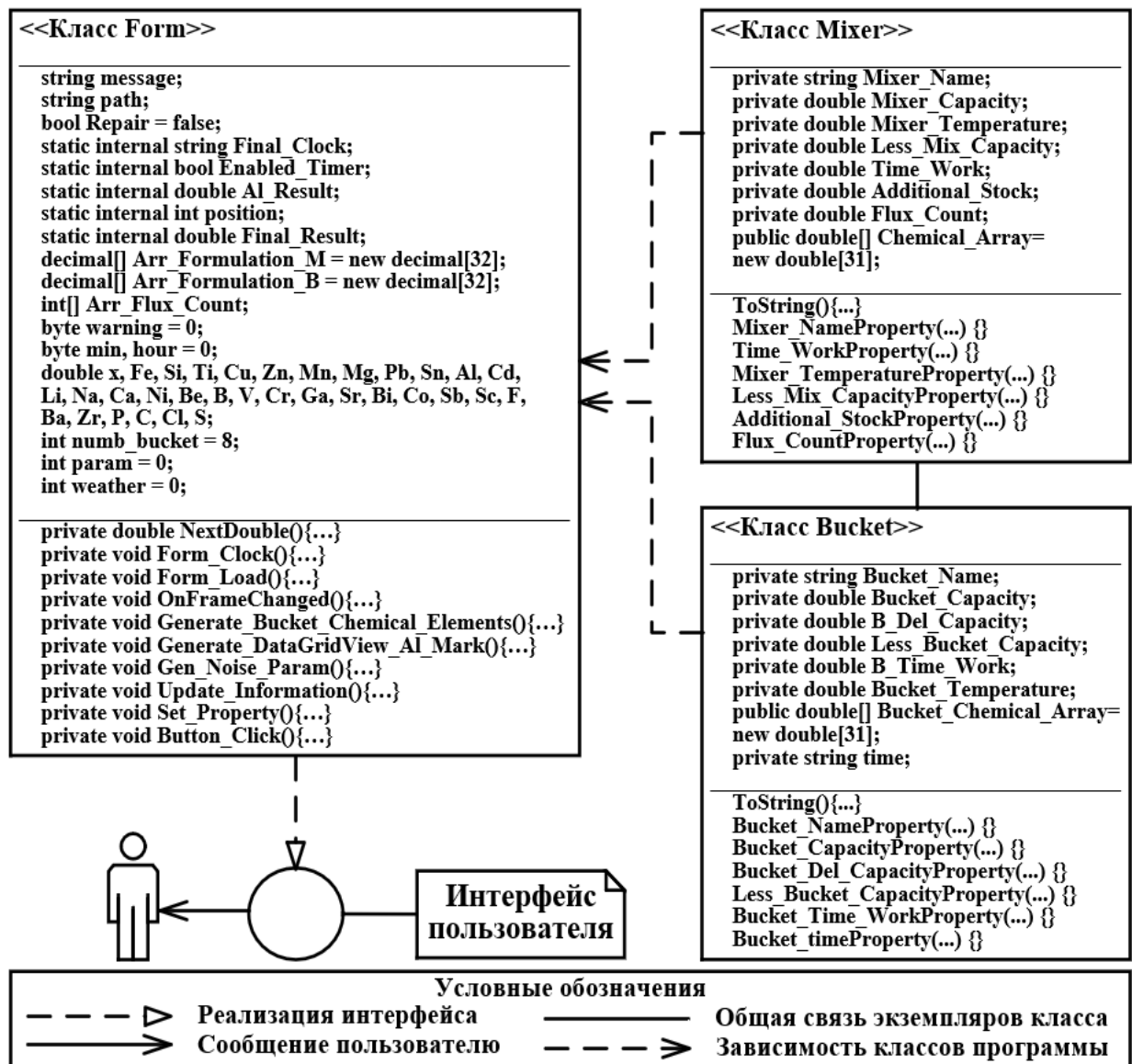


Рисунок 3.3 – Диаграмма основных классов ИОС «Алюминщик»

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;

- набор информации о взятых пробах из расплава в миксере;
- взаимодействие классов и обмен информацией между диалоговыми окнами.

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 сухих 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 детальное описание следующего набора полей (Приложение Б):

- идентификационное наименование уникального литейного ковша;
- текущий объем полезной емкости литейного ковша;
- расчетный объем удаляемой массы расплава из литейного ковша;
- объем осадка на стенках конкретного литейного ковша;
- отметка о статусе использования литейного ковша;
- температура расплава 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 правильности и логичности передаваемых на обработку параметров [118 – 120].

В том числе, 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.

Центральными структурами данных при разработке информационно-обучающей системы «Алюминщик» стали стандартные компоненты и средства разработки программной среды Microsoft Visual Studio [121 – 123].

Компонент `DataGridView` позволяет хранить первоначальные или модифицированные данные программы в табличном виде. 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 модифицирующих добавках в виде лигатур и флюсов. Сетчатая структура компонента `DataGridView` позволяет улучшить восприятие информации благодаря настройке различных полезных свойств ячеек в режиме редактирования табличных данных.

Компонент `MenuStrip` используется для организации основного меню управления программой. Меню управления содержит сгруппированный по смысловой нагрузке набор функций, который позволяет производить настройку параметров работы обучающей системы и взаимодействовать с файлами ОС 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 ввода или вывода информации на интерфейс пользователя. Компоненты типа TextBox выполняют роль контейнеров данных и определяют отображение результатов.

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 информационно-обучающей системе «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 информационно-обучающей системе «Алюминщик» компонент ProgressBar идентифицирует прогресс выполнения анимационных сцен.

Компонент ListBox реализует возможность структурированного хранения информации в виде управляемого списка. Во время взаимодействия пользователя с интерфейсом информационно-обучающей системой 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 вышеизложенного анализа компонентов разработки, имеющихся в среде Microsoft Visual Studio, был создан функциональный интерфейс информационно-обучающей системы «Алюминщик».

3.3 Рекомендации по использованию возможностей информационно-обучающей системы «Алюминщик»

Для работы с информационно-обучающей системой «Алюминщик» требуется запустить исполняемый файл программы в формате *.exe, расположение которого определяется действиями пользователя выбранной учетной записи Microsoft Windows. После запуска исполняемого файла откроется окно пользовательского интерфейса, представленное на рисунке 3.4.

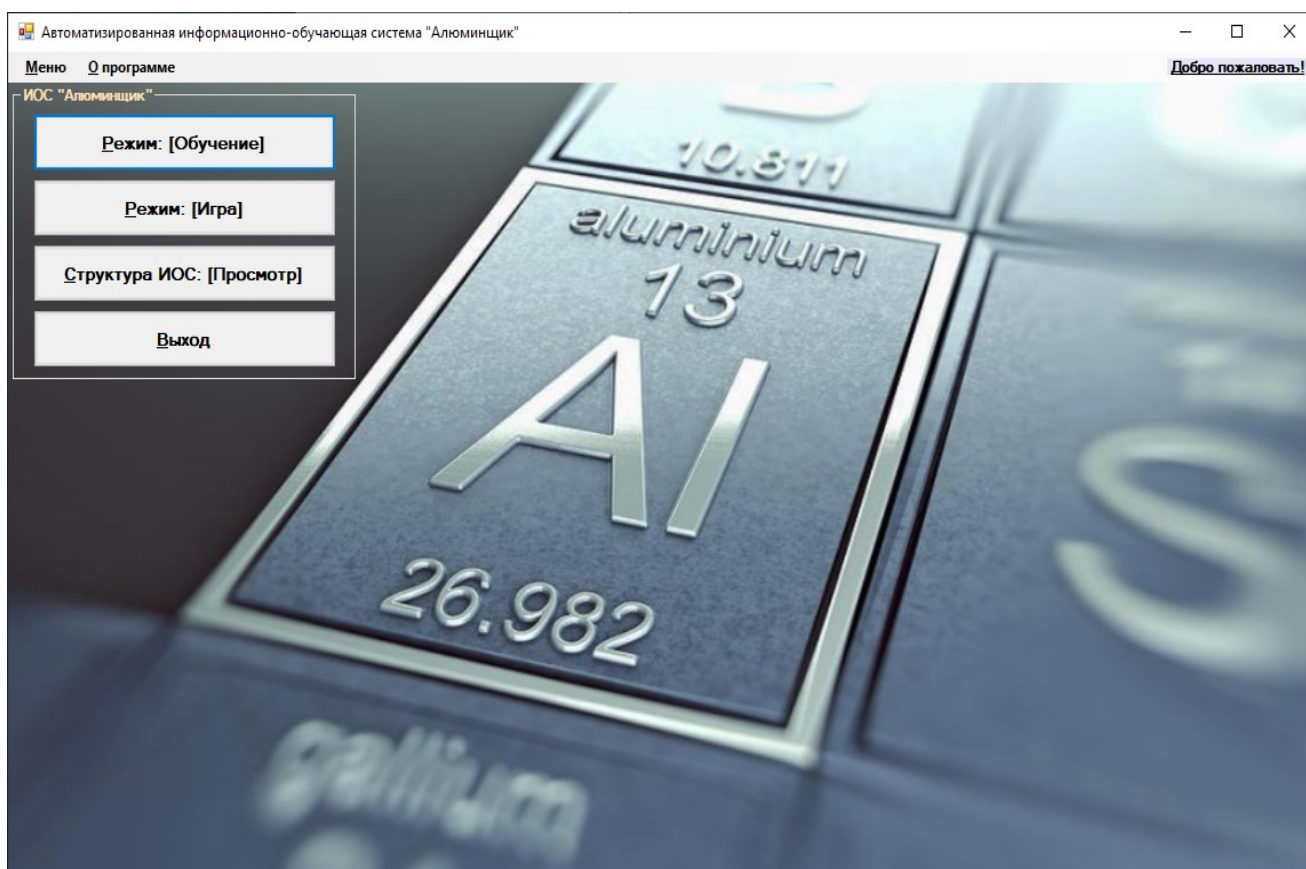


Рисунок 3.4 – Главное окно пользовательского интерфейса ИОС «Алюминщик»

Основной интерфейс системы содержит вкладку «Меню» и позволяет производить выбор необходимого режима работы: «Обучение» или «Игра». В зависимости от режима доступны различные возможности интерфейса. Режим «Обучение» предназначен для повышения квалификации технологического персонала, а режим «Игра» обеспечивает проведение профориентационных мероприятий. Развернутая вкладка «Меню» представлена на рисунке 3.5.

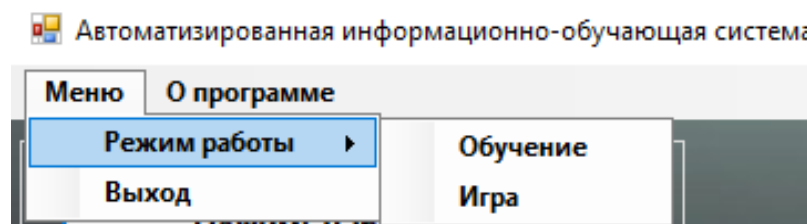


Рисунок 3.5 – Развернутая вкладка «Файл» настроечного меню

Вкладка «О программе» содержит выходную информацию о разработке и месте проектирования информационно-обучающей системы «Алюминщик». Развернутая вкладка «Разработчики» представлена на рисунке 3.6.

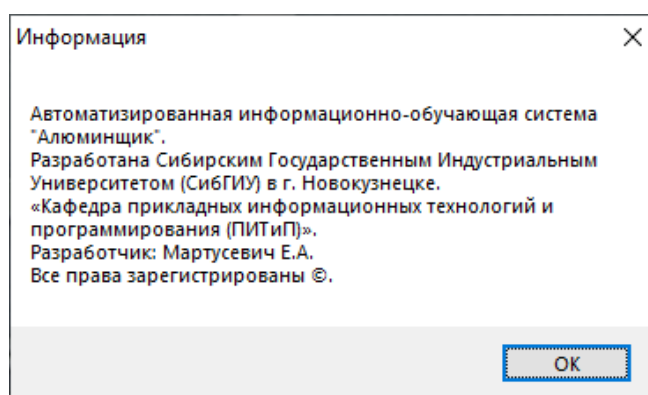


Рисунок 3.6 – Развернутая вкладка меню «Разработчики»

После выбора одного из режимов работы требуется определить необходимую роль в системе: «Администратор» или «Пользователь» (рисунок 3.7).

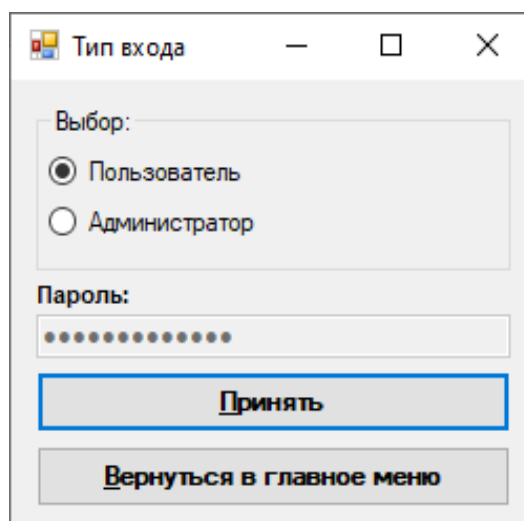


Рисунок 3.7 – Тип входа в ИОС «Алюминщик»

После выбора необходимой роли, происходит запуск настроечного окна пользовательского интерфейса (рисунок 3.8).

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 | x Удалить все имеющиеся строки | ! Генерация данных | Проверка данных

[Информация о команде или участнике]:

Пользователь №1

*Обязательно для заполнения!

Статус: данные загружены.

[← Вернуться назад](#) [Принять и проверить →](#)

[Исходные Данные]: Σ (0) строки = 0 (0) %

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	97.821	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 Пигментов](+): Σ (1) строки = 0 (0) %

Пигмент:	Цена(руб/кг)	Доступно(кг)	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd
AlB3	8500	1000	0.3	0.3	0	96.04	0	0	0	0	0.04	0.04	0
AlB4	240	1000	0.3	0.3	0	95.04	0	0	0	0	0.04	0.04	0
AlB5	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) %

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) %

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

Рисунок 3.8 – Настроечное окно пользовательского интерфейса программы

Это окно позволяет редактировать исходный химический состав расплава в миксере и алюминия-сырца в литейных ковшах, определять набор модифицирующих добавок, формировать требуемые марки алюминиевых сплавов для пользователей системы. Ввод и редактирование исходных данных сопровождается непрерывной их 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 частоту генерации помех, определять размер заказа, утверждать максимальную емкость литейных ковшей и миксера, а также назначать стоимостные характеристики технологических операций и исходного полупродукта.

Раздел «Дополнительные настройки» обеспечивает возможность использования интеллектуального помощника, позволяет выбрать набор инертных газов для продувки и определить необходимость учета энергетических затрат.

Для продолжения работы необходимо нажать кнопку «Принять и проверить». В случае, если введенные данные соответствуют всем требованиям системы, то станет доступен режим выбора соответствующей марки сплава для формирования в системе «Алюминщик» (рисунок 3.9).

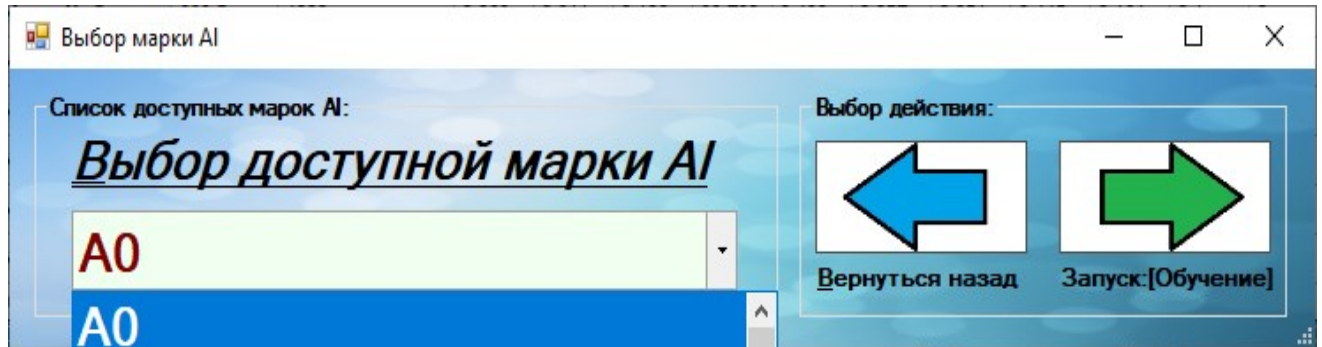


Рисунок 3.9 – Окно выбора марки алюминиевого сплава для работы в системе

Если был осуществлен выбор режима «Обучение», то на экране монитора появится диалоговое окно, содержащее описание основных этапов технологии производства алюминия (рисунок 3.10).

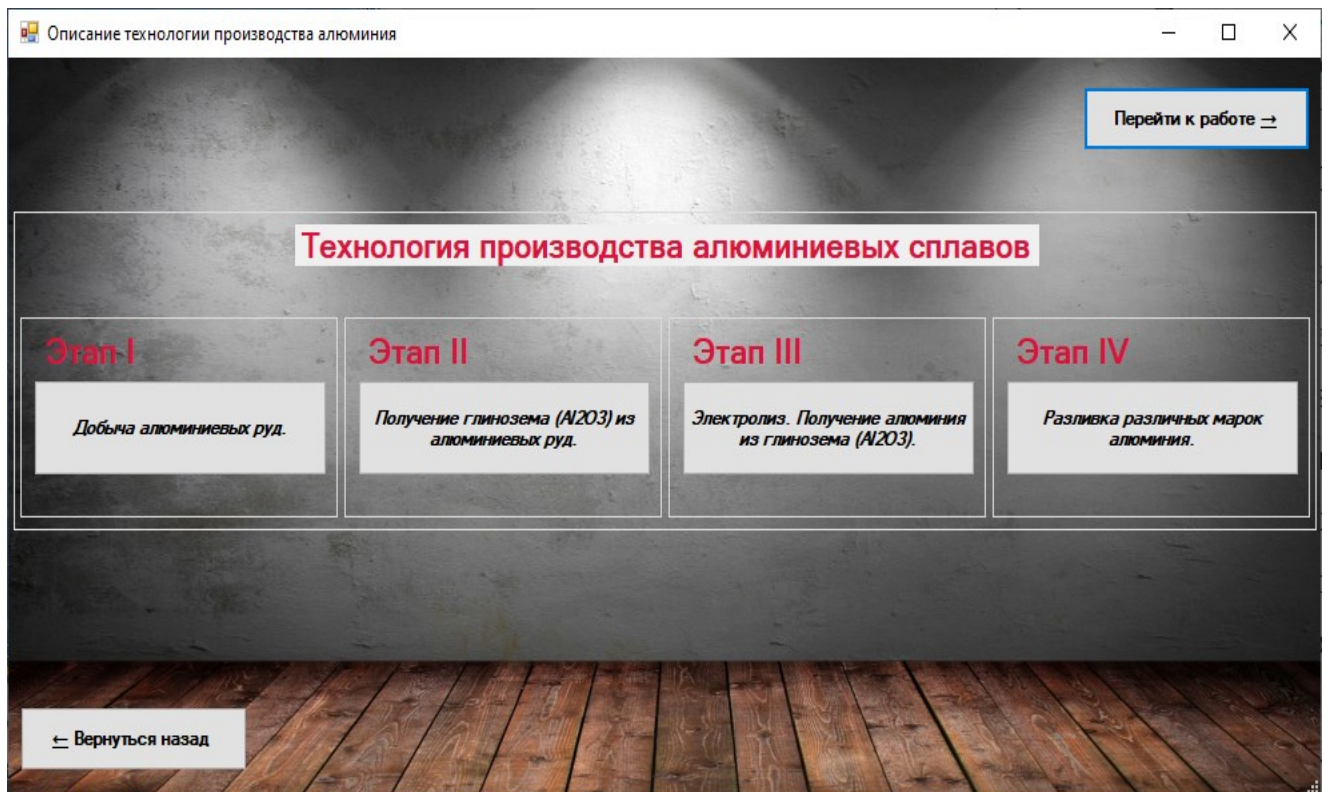


Рисунок 3.10 – Описание основных этапов производства в режиме «Обучение»

С помощью активных элементов управления можно подробно познакомиться с описанием основных технологических этапов производства алюминия. При активации любого из представленных этапов производства запустится окно с его изображением и описанием. Например, при выборе третьего этапа производства «Электролиз» будет представлена информация о получении алюминия из глинозема с помощью электролиза. Вариант описания выбранного этапа производства представлен на рисунке 3.11.



Рисунок 3.11 – Описание выбранного этапа технологического производства

Изучив информацию об основных этапах производства алюминия следует приступить к запуску модели программного комплекса в режиме «Обучение», нажав на кнопку «Перейти к работе». В случае, если необходимо вернуться к предыдущему шагу, то следует нажать кнопку «Вернуться назад». После загрузки интерфейса информационно-обучающей системы «Алюминщик» необходимо обратить внимание на верхнюю часть интерфейса программы (рисунок 3.12).

В этом окне располагаются важные инструменты системы, а именно:

- кнопка «Завершить работу с программой», позволяющая заблаговременно завершить работу с системой;

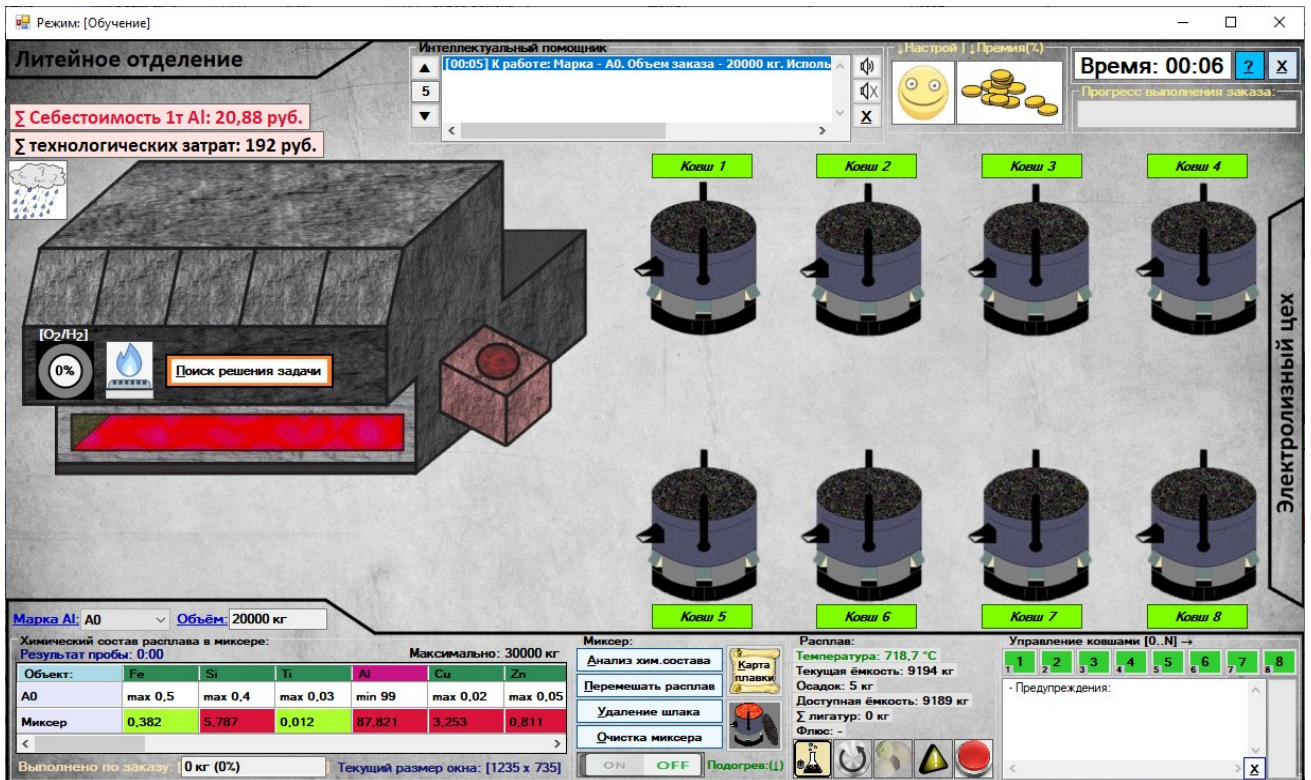


Рисунок 3.12 – Интерфейс ИОС «Алюминщик» в режиме «Обучение»

- кнопка «Описание технологической задачи», разрешающая открыть информационное окно, отображающее описание технологической задачи;
- таймер прямого отсчета, характеризующий прошедшее время;
- несколько информационных полей, отражающих текущие значения общих технологических затрат, а также себестоимость выплавки 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 учебно-технологической задачи и повышает точность попадания текущего химического состава в установленные требования выбранной марки сплава.

Кнопка заблаговременного завершения работы приводит к появлению следующего информационного окна (рисунок 3.13).

Результаты выполнения задачи

Время вышло. Марка не была разлита!

Результаты: Пользователь №1

Объект:	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd
А0	0,5	0,4	0,03	99	0,02	0,05	0	0	0	0	0
Миксер	0,143	2,831	0,128	91,385	3,026	0,066	0,023	2,244	0,079	0,075	0

Информация:

Разлито по заказу: 0%

Соответствие хим.составу (%): 84,056%

Σ Затрат: 206870 руб.

Завершить просмотр

Выгрузить результат в Excel

Рисунок 3.13 – Результат принудительного завершения работы пользователя

Нажатие на кнопку с описанием технологической задачи открывает информационное окно со специальным разделом меню «Описание задания» (рисунок 3.14) внутри которого имеется текстовая версия технологического задания, представленная на рисунке 3.15. Для закрытия информационного окна со схемой технологического задания необходимо использовать элемент верхнего меню «Действия» и кнопку «Закрыть».

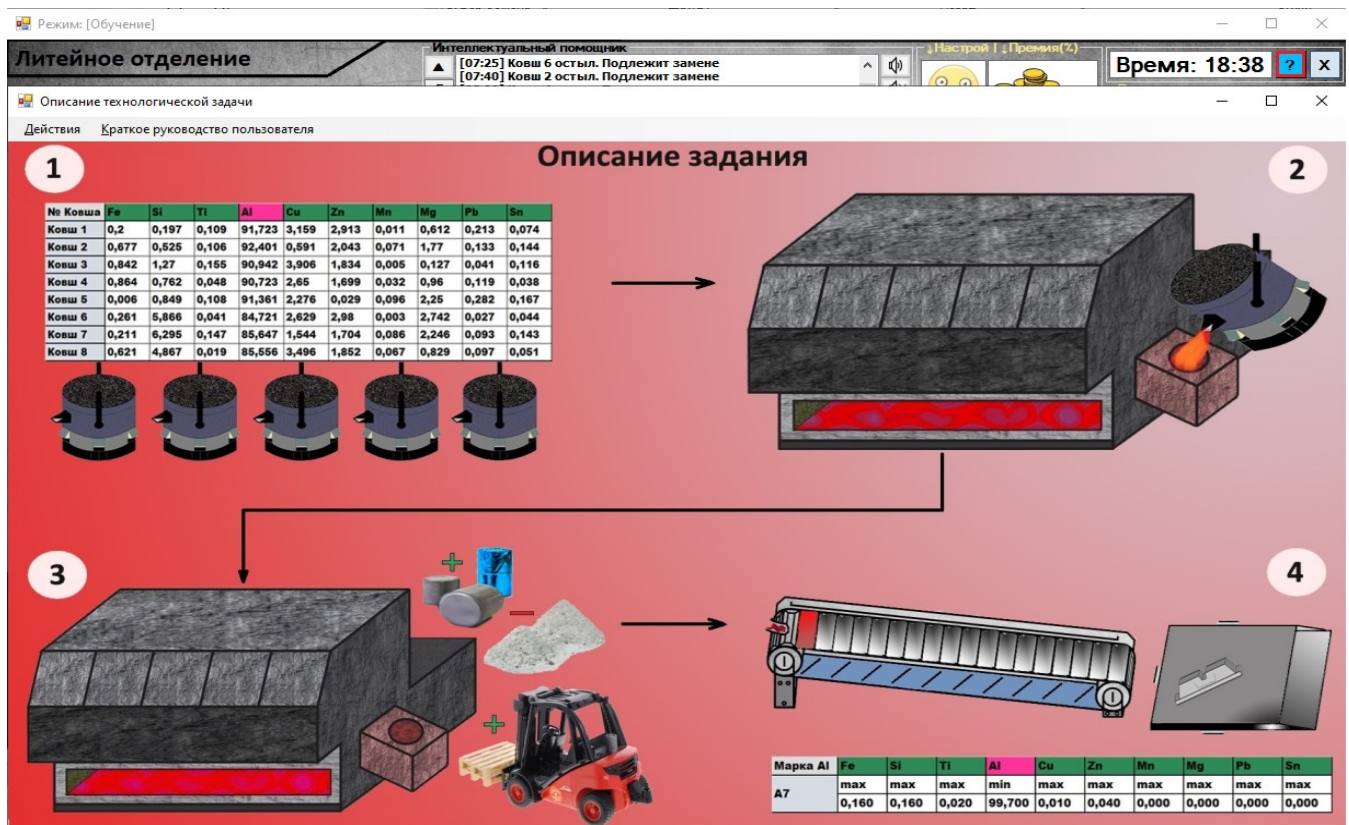


Рисунок 3.14 – Графическое описание заданного технологического задания

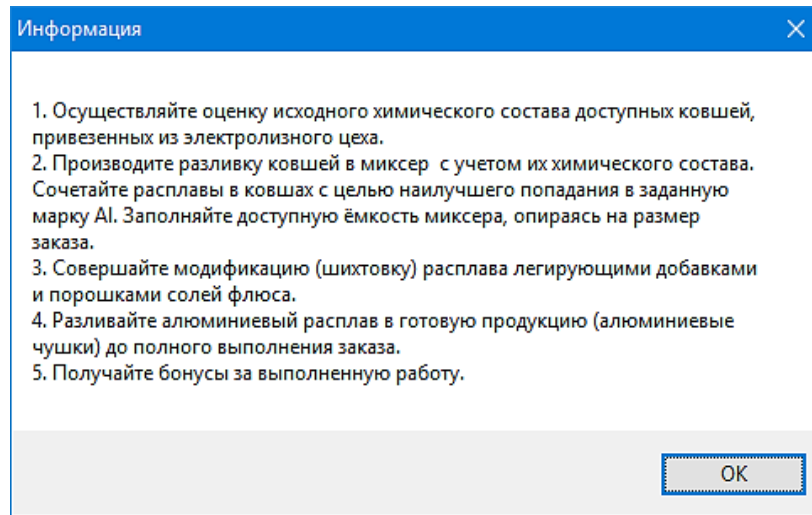


Рисунок 3.15 – Текстовое описание технологического задания

Все управляющие воздействия и возможности программного комплекса главным образом влияют на показатель себестоимости выплавки 1 т металла, поэтому настоятельно рекомендуется производить только необходимые и заранее спрогнозированные действия для уменьшения этого показателя.

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

Миксер, как и другие объекты интерфейса имеют анимированную прорисовку. Миксер имеет огнестойкую пристройку, которая позволяет производить наполнение доступной емкости миксера за счет добавления алюминия-сырца из литейных ковшей, привезенных из электролизного цеха.

В правой части интерфейса программного комплекса располагается набор литейных ковшей, доставленных из электролизного цеха. Каждый ковш имеет свой собственный уникальный химический состав расплава и различное значение использованной емкости. Литейные ковши обладают различной температурой и характеризуются разной долей осадка на стенках. В процессе работы системы, осадок расплава в литейных ковшах и миксере постепенно увеличивается. Однако наиболее быстро такой процесс происходит в литейных ковшах, так как у них отсутствуют нагревательные элементы.

Окно анимационной сцены, отражающей замену застывшего или пустого ковша в недоступном состоянии представлено на рисунке 3.16. Кнопки, расположенные над иконками ковшей, имеют два различных состояния: «доступное» (зеленый цвет) и «недоступное» (красный цвет). Изменение цветового состояния управляющих кнопок провоцирует изменение их текстового отображения.

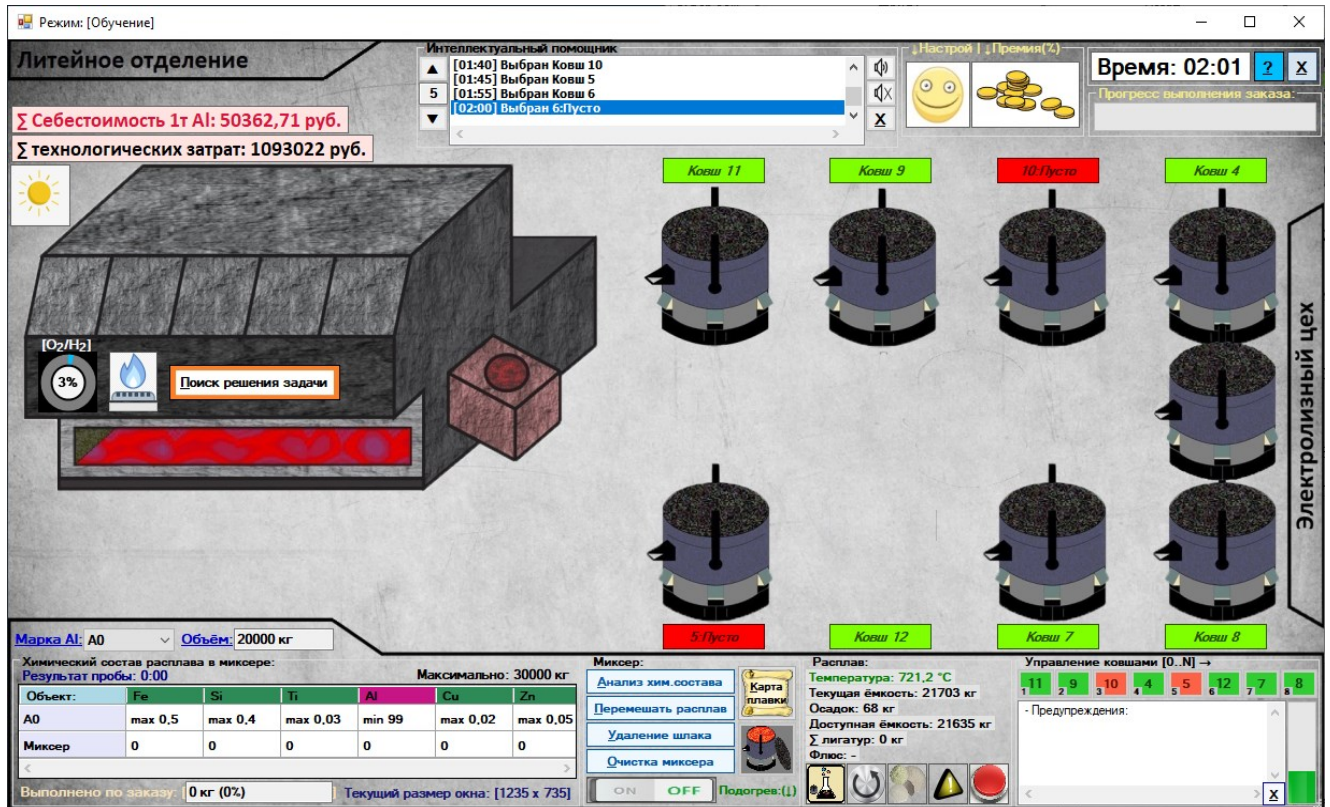


Рисунок 3.16 – Процесс замены пустого литейного ковша

Красный цвет кнопок символизирует о том, что текущие литейные ковши являются пустыми или застывшими и требуют замены на новые. В случае активации кнопки в недоступном состоянии, ковш отправится в электролизный цех и заполнится свежим расплавом с новым химическим составом. Если активация кнопки происходит в доступном состоянии, то появляется окно, позволяющее производить настраиваемую регулировку слива имеющегося алюминия-сырца в миксер.

Активация доступной кнопки выбранного ковша позволяет просматривать и регулировать параметры слива необходимой массы расплава с учетом текущей емкости в миксере и цены алюминия-сырца. В представленном окне также находится таблица химического состава выбранного литейного ковша (рисунок 3.17).

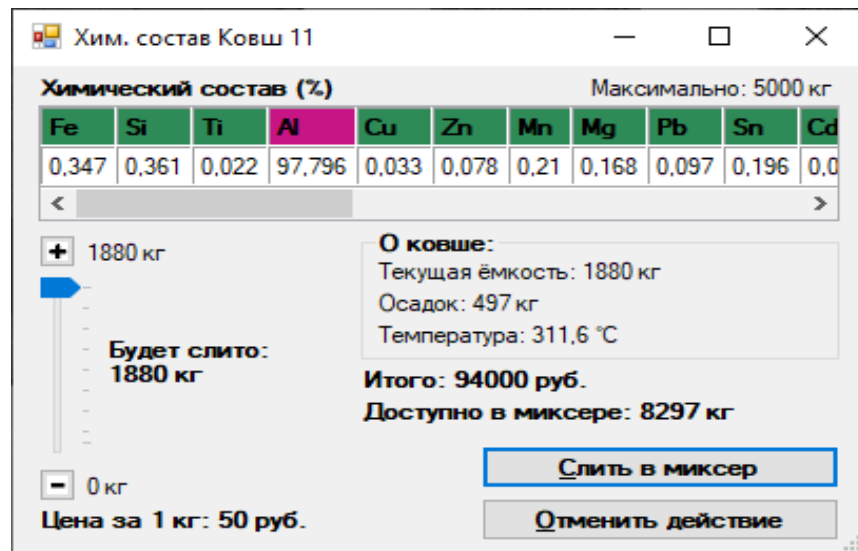


Рисунок 3.17 – Управление параметрами ковша с исходным расплавом

Определив необходимые технологические параметры слива содержимого ковша, требуется подтвердить собственные действия нажатием на кнопку «Слить в миксер». В этом случае запустится анимационная сцена слива части расплава из литейного ковша в миксер, пример работы которой представлен на рисунке 3.18.

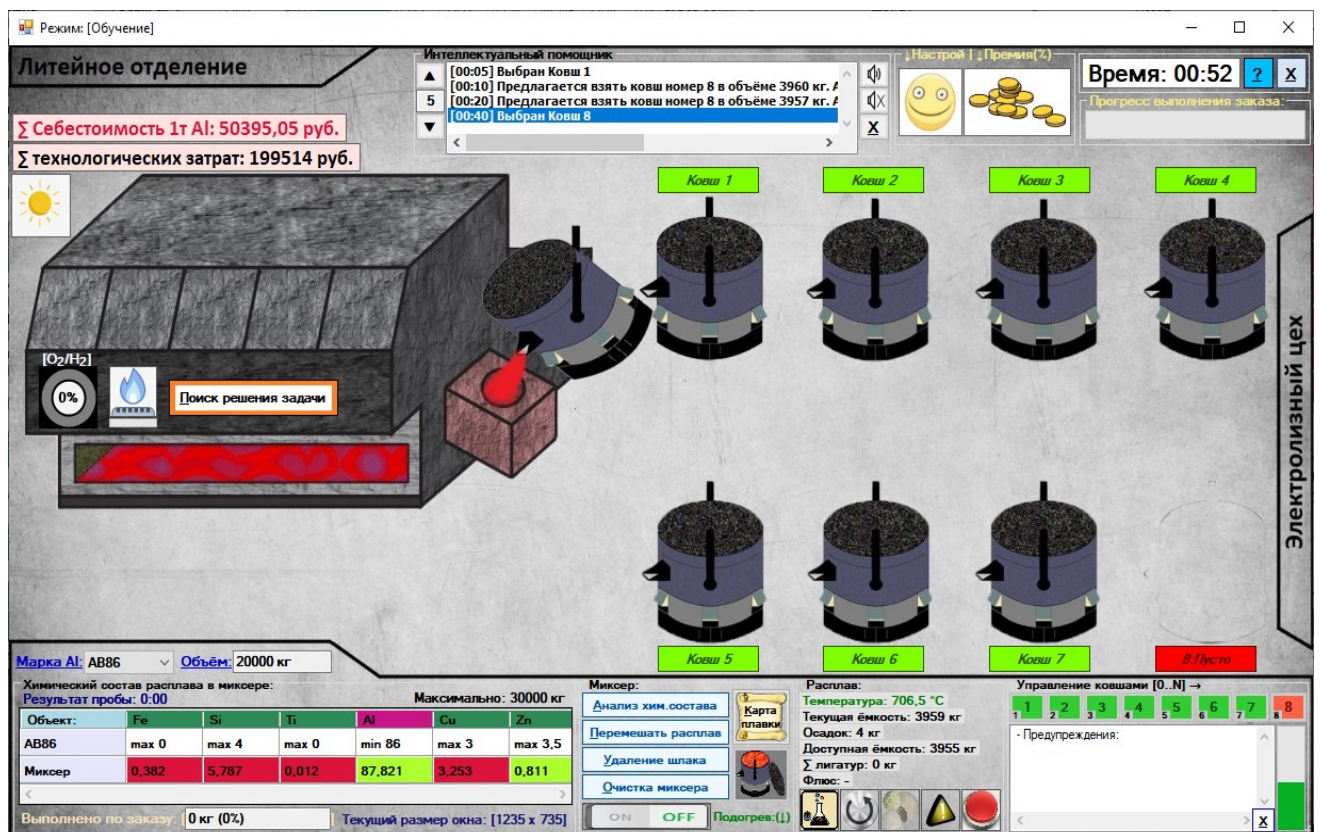


Рисунок 3.18 – Процесс слива части содержимого литейного ковша в миксер

В правой части основного окна находится кнопка «Электролизный цех». Если осуществить нажатие на данную кнопку, то откроется новая экранная форма, содержащая реальное изображение электролизного цеха одного из предприятий компании «РУСАЛ» (рисунок 3.19). Завершить знакомство с изображением электролизного цеха можно с помощью кнопки «Закончить просмотр».

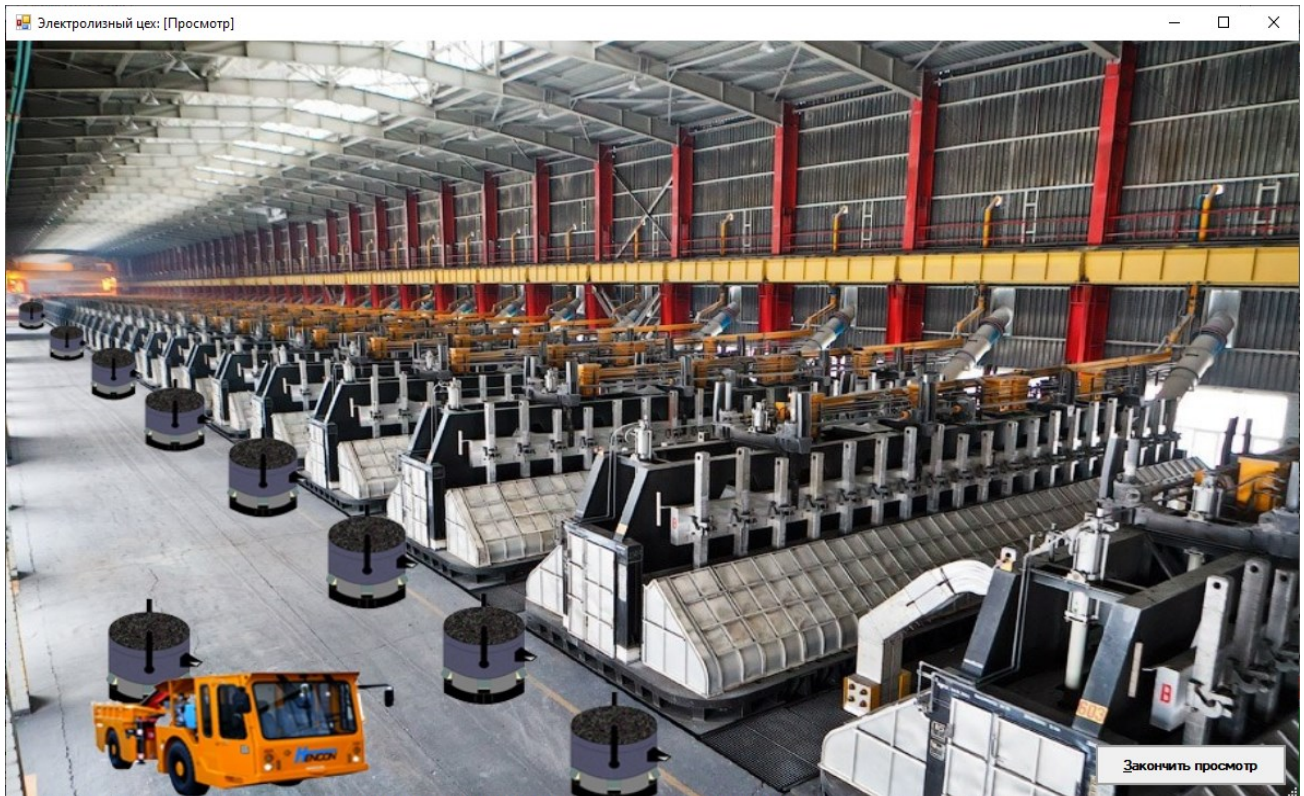


Рисунок 3.19 – Изображение электролизного цеха

В левой нижней части экрана находится структурированная информация об объеме заказа производства, здесь же располагаются сведения о требуемом и текущем химическом составе алюминиевого сплава (рисунок 3.20).

Марка Al:	A0	Объем:	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 3.20 – Сведения о текущем и заданном химическом составе расплава

В программной таблице располагаются химические элементы, отражающие соответствие текущего химического состава заданной марке сплава, в том числе, присутствует информация о прогрессе выполнения заказа. По мере заполнения миксера алюминием-сырцом, текущий химический состав расплава постепенно изменяется, поэтому необходимо периодически отбирать пробу формируемого расплава на анализ в химическую лабораторию.

В информационном контейнере «Миксер» содержатся все необходимые технологические операции, обеспечивающие формирование заданного химического состава расплава в миксере (рисунок 3.21):

- «Анализ химического состава»;
- «Перемешать расплав»;
- «Удаление шлака»;
- «Очистка миксера»;
- «Карта плавки»;
- «Слив металла из миксера в ковш»;
- «Автоматический регулятор температуры расплава».

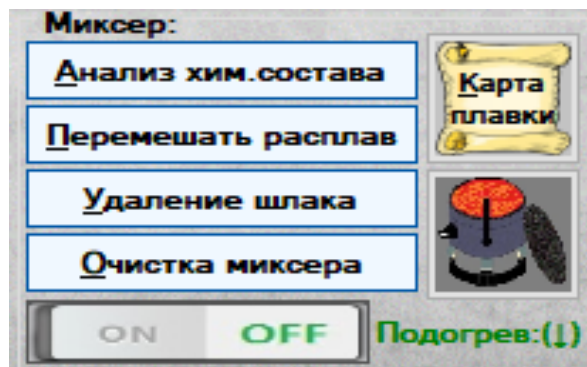


Рисунок 3.21 – Информационный контейнер «Миксер»

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 (рисунок 3.22).

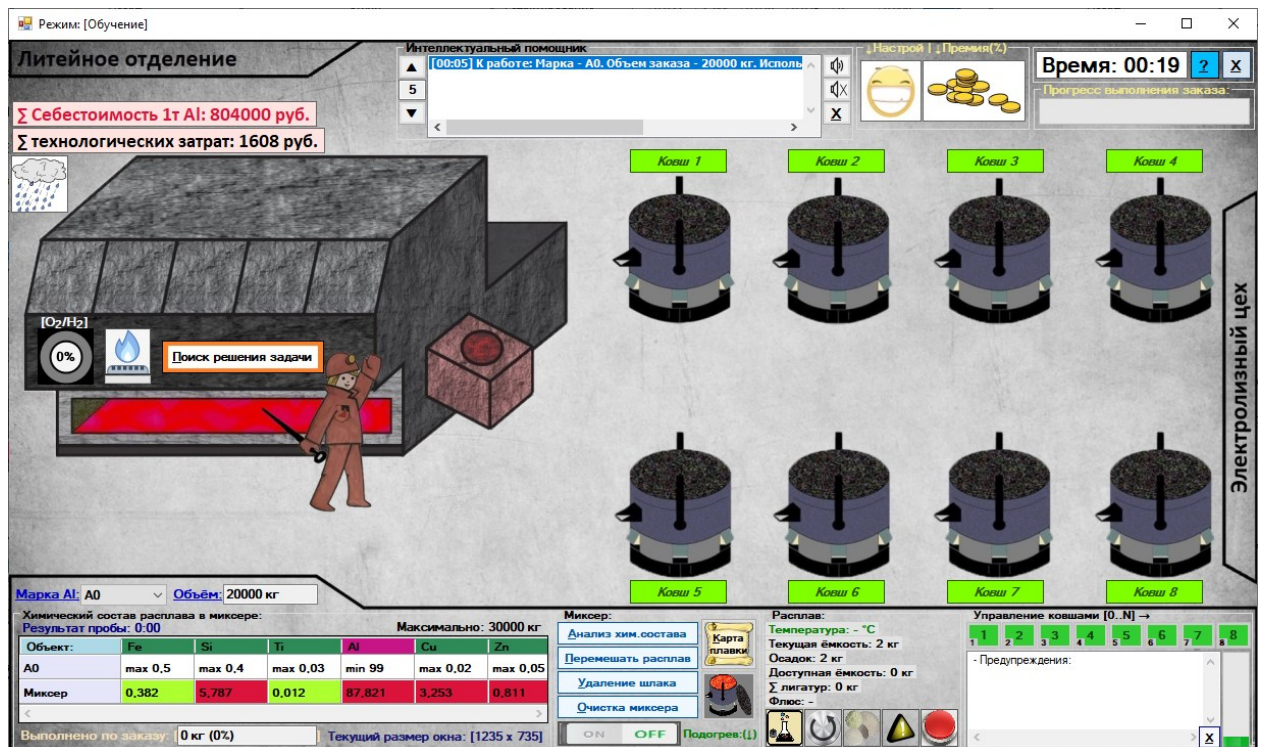


Рисунок 3.22 – Процесс очистки миксера от осадка

Все действия записываются в память компьютера и отображаются при активации кнопки «Карта плавки» (рисунок 3.23).

Карта плавки марки алюминия

Карта плавки: AB86.
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
AB3	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 3.23 – Карта плавки алюминиевого расплава заданной марки

В случае если не удалось сформировать заданный химический состав расплава, можно произвести слив части расплава из миксера в специально подготовленный пустой литейный ковш (рисунок 3.24).

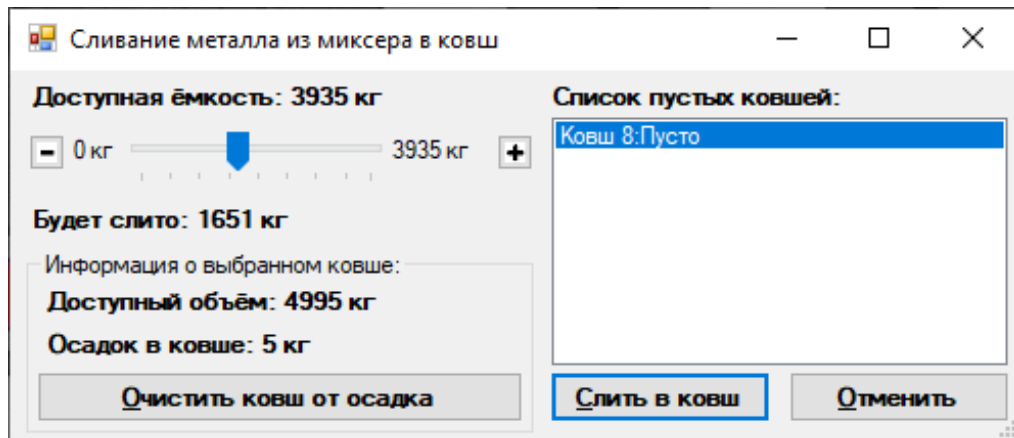


Рисунок 3.24 – Диалоговое окно слива части расплава из миксера в ковш

В этом окне необходимо выбрать один из ковшей, который оказался пустым после его многократного использования и нажать кнопку «Слить в ковш», что запустит анимационную сцену, представленную на рисунке 3.25.

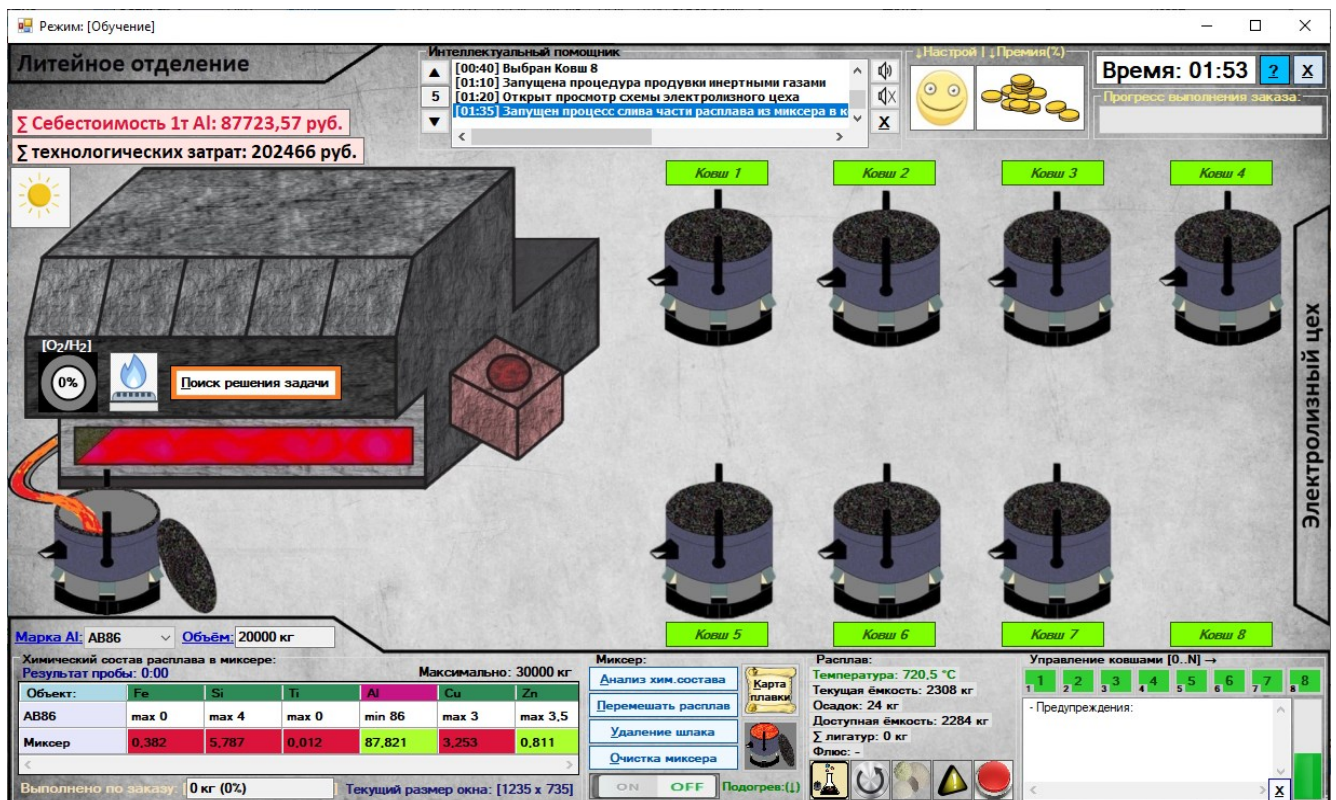


Рисунок 3.25 – Процесс слива части расплава из миксера в выбранный ковш

Информационный контейнер «Расплав» позволяет непрерывно отслеживать показатели формирования химического состава расплава (рисунок 3.26).

Остальные кнопки определяют возможности его модификации, в частности:

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

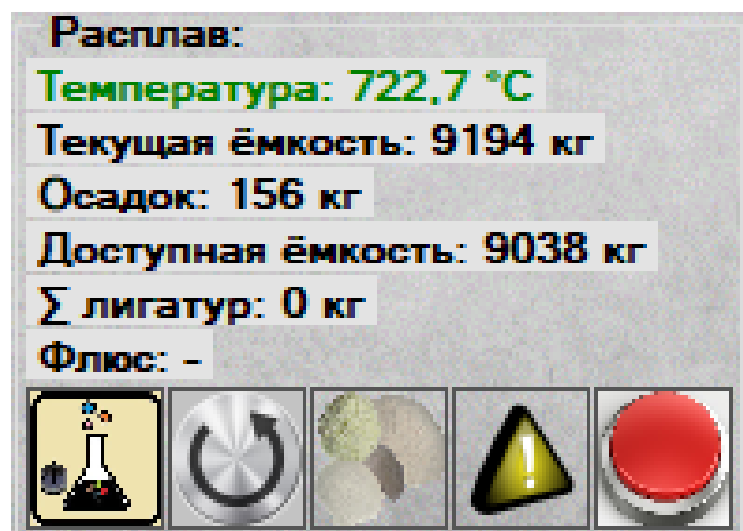


Рисунок 3.26 – Информационный контейнер «Расплав»

Изучение имеющихся сведений позволяет произвести описание информационных элементов в порядке их важности. Главным, изменяющимся во времени параметром, является доступная емкость миксера. Емкость расплава определяется разностью между массой расплава в миксере и массой осадка на его стенках. Также емкость миксера может изменяться за счет использования модифицирующих

материалов в виде легирующих металлов и флюсовых добавок. При этом данный информационный блок содержит информацию о текущей температуре миксера, так как ее значение влияет на возможность разливки жидкого металлического расплава в готовую продукцию.

Далее представлен последовательный разбор управляющих иконок из рисунка 3.26. Первая кнопка слева предоставляет возможность просмотра набора имеющихся в наличии литейных ковшей и их химического состава. Функция данной кнопки объединяет отдельные элементы управления литейными ковшами в удобный список для создания более наглядного и детально обоснованного принятия решения пользователем (рисунок 3.27).

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	0,001
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	0,021
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	0,001
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	0,011
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	0,021
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	0,011

Выбор ковша для слива в миксер:

Ковш 1

Слить ковш

Отменить действие

Рисунок 3.27 – Список доступных литейных ковшей и их химический состав

При выборе определенного ковша из списка доступных, реализуется анимационная сцена слива части содержимого литейного ковша в миксер.

Вторая кнопка предназначена для добавления в расплав миксера легирующих добавок. Нажатие на данную кнопку позволит открыть новое окно со списком легирующих добавок (рисунок 3.28). В данном окне представлен список разнообразных легирующих добавок с различным химическим составом, каждая из которых имеет уникальное влияние на алюминиевый расплав в миксере.

Легированные 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 лигатуру: AlB3 Масса добавки(кг) Доступно в миксере: 0 кг
Доступно лигатуры: 1000 кг

Химический состав лигатуры

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

Цена за 1 кг: 8500 руб.
Итого: 0 руб.

Рисунок 3.28 – Список легирующих добавок и их химический состав

Каждая лигатура из представленного списка имеет свое собственное значение цены за 1 кг, поэтому важно тщательно взвешивать необходимость использования той или иной легирующей добавки в целях модификации алюминиевого расплава. Масса добавляемых в расплав миксера легирующих металлов определяется числом, которое необходимо указать в поле «Масса добавки (кг)». Максимальная масса легирующих добавок ограничивается только вместимостью миксера и их количеством. При определении массы нужного количества легирующих металлов система подсчитывает конечную стоимость выбранных шихтовых материалов с учетом их единичной стоимости.

Третья кнопка предоставляет возможность добавления флюсовых добавок в расплав миксера. Флюсовые добавки служат для обеднения расплава от ненужных примесей (рисунок 3.29). Добавление флюсовых добавок необходимо с целью обеднения расплава от ненужных примесей, что возможно осуществить путем многократного выбора совместимых флюсовых порошков. Каждый флюс имеет собственный маркируемый номер, цену, а также индивидуальные свойства.

Добавление флюсов в расплав

Изображения флюсовых компонентов




Таблица удаляемых флюсами элементов

Флюс:	Норма(%)	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb
№1	0,8	0	-100	0	0	0	0	0	0	0
№2	1	0	0	0	0	0	0	0	-100	0
№3	1,5	0	-50	0	0	-50	0	0	0	0

Выберите флюс:

№1

Цена: 50 руб.

Доступно: 100 кг.

Используется: -

Расчёт количества флюса:

50

Необходимо: ≈ 174 кг.

Итого: 2500 руб.

*Доступно в миксере: 8297 кг

Принять данные Отменить действие

Рисунок 3.29 – Список флюсовых добавок и их химический состав

Под каждым набором данных о флюсе имеются необходимые рекомендации, позволяющие достигать правильного решения поставленной учебно-технологической задачи. Определение расчетных масс, добавляемых в миксер флюсовых добавок должно осуществляться с учетом известной единичной стоимости и степени химического влияния на алюминиевый расплав.

После просмотра информации о свойствах выбранных флюсов рекомендуется нажать на кнопку «Отменить действие». Следует помнить, что принятие результатов настройки флюсовых добавок возможно при наличии ненулевого значения в поле экранной формы. При этом необходимо отметить, что любые изменения параметров расчета оказывают влияние на вычисление итогового показателя технологических затрат. При подтверждении действий по добавлению легирующих или флюсовых добавок запустится анимационная сцена, где осуществляется загрузка металлических заготовок или сыпучих материалов в миксер (рисунок 3.30).

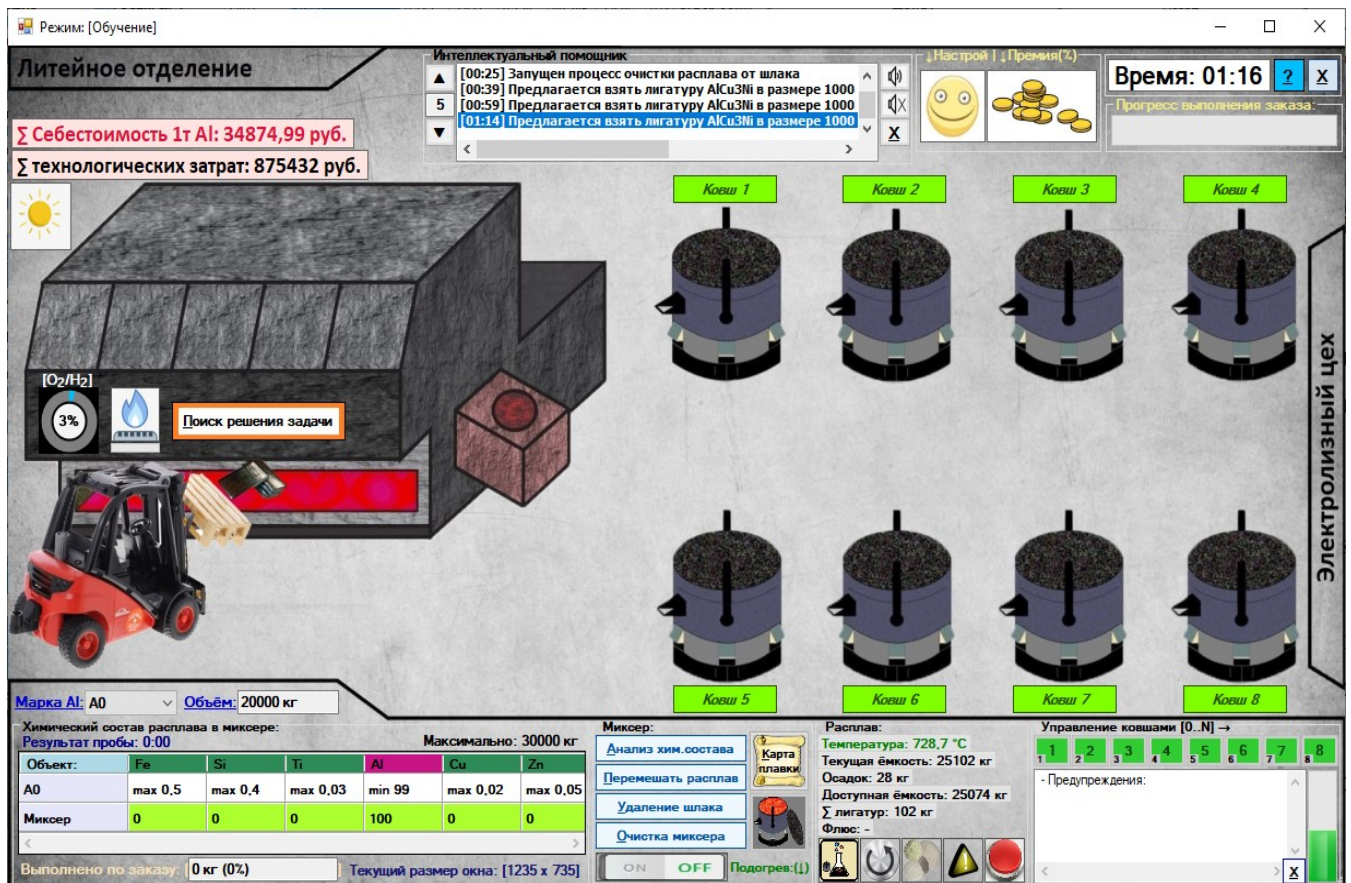


Рисунок 3.30 – Процесс загрузки модифицирующих материалов в миксер

Легирующие добавки полностью растворяются в жидком расплаве алюминия без образования шлаковых излишков. Только при добавлении порошковых флюсов требуется осуществлять удаление шлака (рисунок 3.31).

Например, когда температура расплава в литейных ковшах окажется меньше ~200 °C или полезная емкость ковша будет близка к нулю, тогда среда сгенерирует предупреждающее сообщение о том, что содержимое ковша недоступно. Иконки застывших ковшей подсвечиваются красным цветом и сигнализируют о предстоящей замене (рисунок 3.32). Возникающие в процессе работы сообщения можно очищать, используя кнопку «Очистить предупреждения». Справа от структурированного списка находится прогрессивная шкала состояния, характеризующая факт выполнения какого-либо технологического действия.

При выполнении различных технологических операций в расплаве могут образовываться газовые включения, которые могут навредить качеству готовой продукции, образуя полости в затвердевших слитках после разливки.

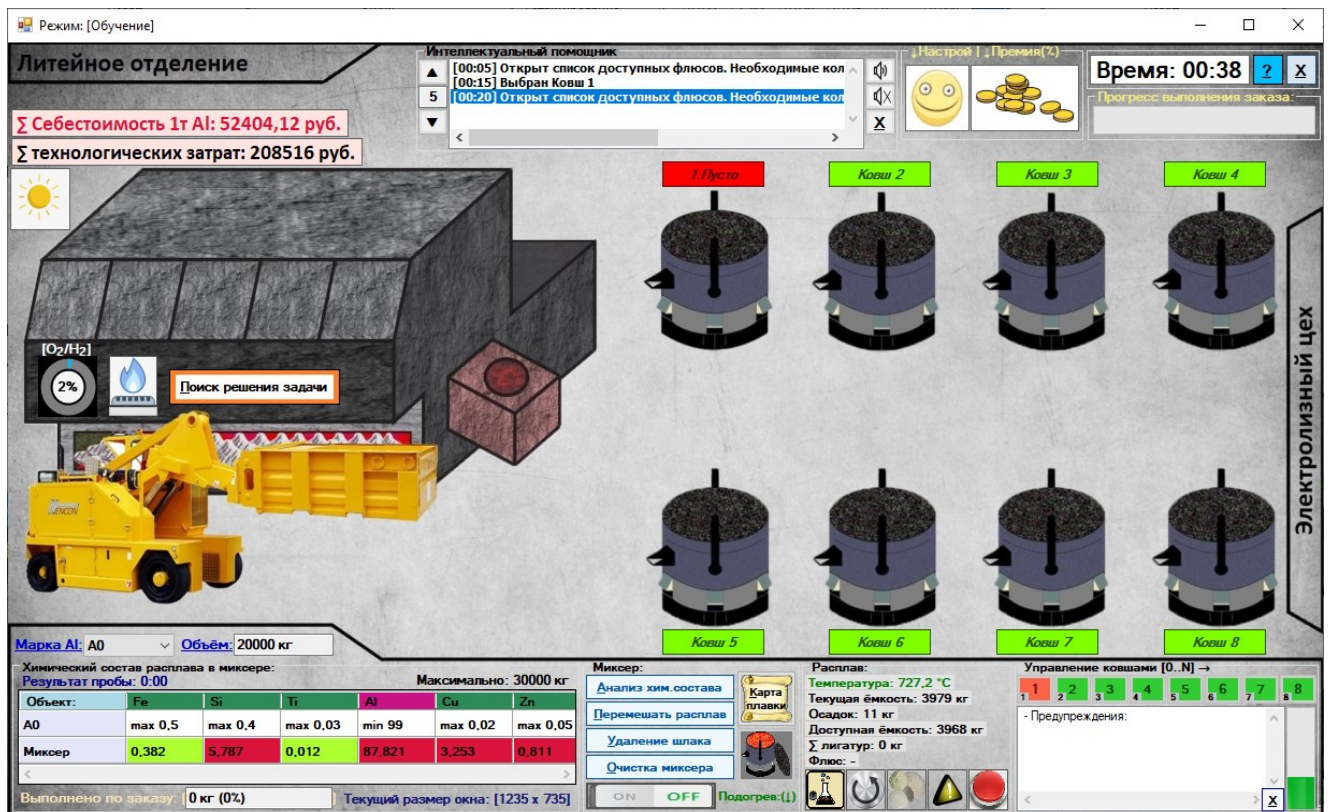


Рисунок 3.31 – Процесс удаления шлака с поверхности расплава

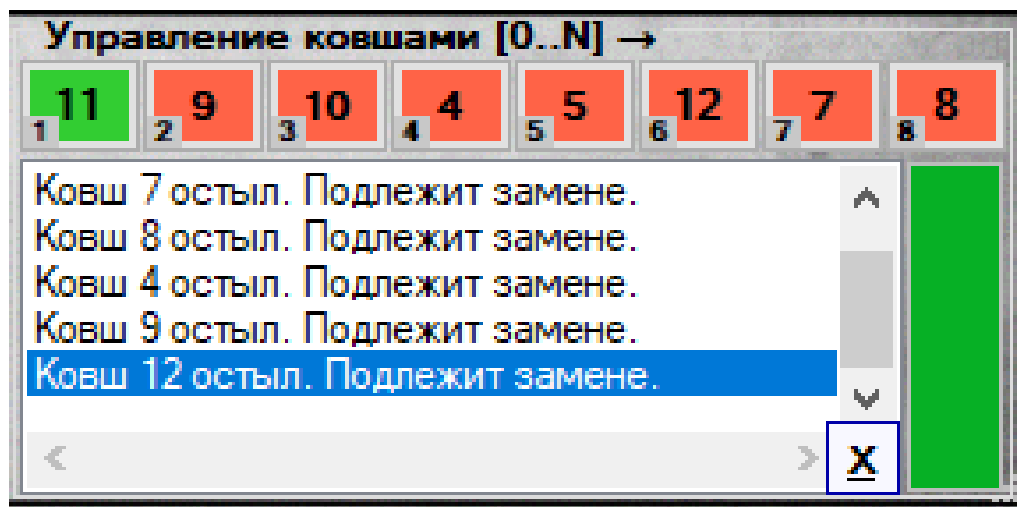


Рисунок 3.32 – Информационный блок предупреждающих сообщений

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 настраиваемым режимом работы (рисунок 3.33). Продувка инертными газами помогает не только уменьшить процент газовых включений, но и снижает температуру расплава.

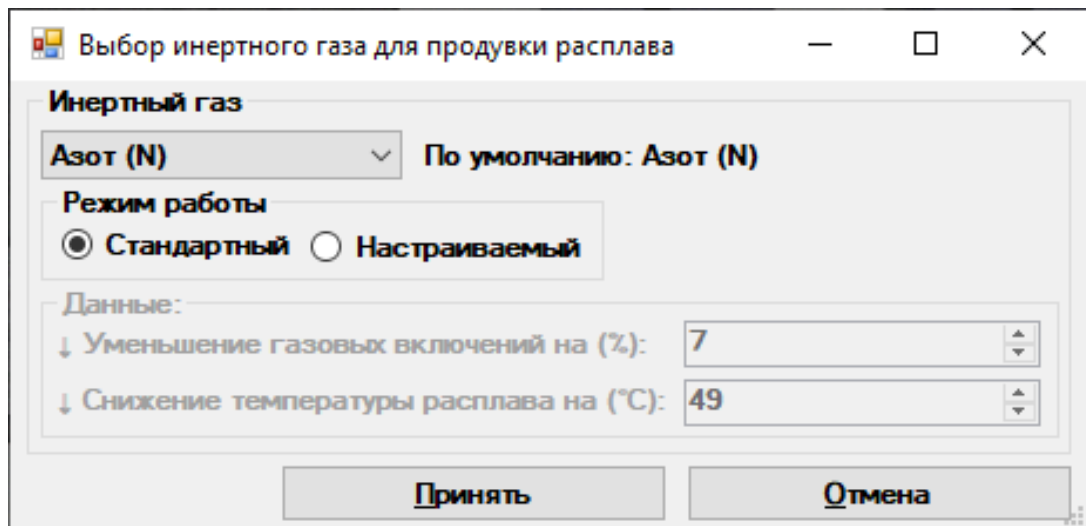


Рисунок 3.33 – Диалоговое окно продувки расплава инертными газами

В результате, четвертая кнопка позволяет производить текущую оценку качества алюминиевого расплава в любой момент времени.

Сформированный различными манипуляциями алюминиевый расплав с определенным химическим составом необходимо слить на разливочный конвейер, где расплавленные порции жидкого алюминия должны превратиться в застывшие металлические слитки определенной массы и формы. Параметры разливки зависят от вместимости миксера и от процента уже выполненного заказа.

Разливка осуществляется с помощью пятой кнопки, активация которой приводит к появлению следующего диалогового окна (рисунок 3.34).

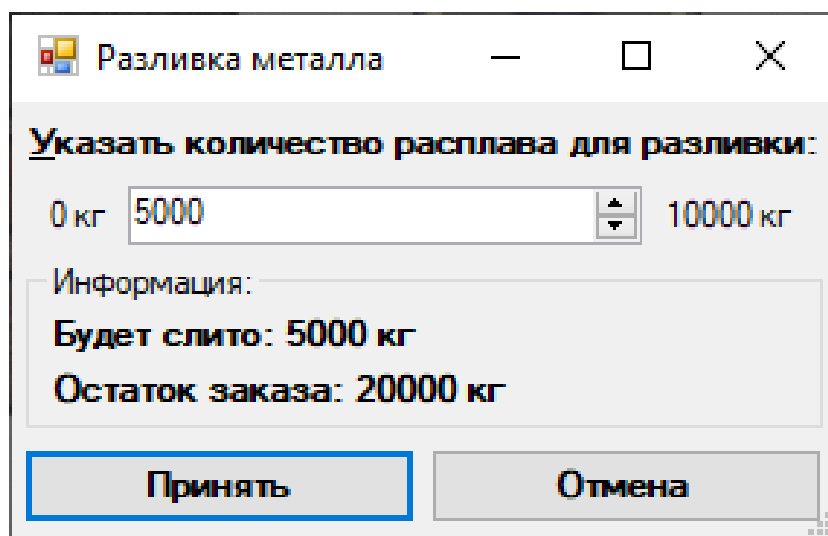


Рисунок 3.34 – Настройка параметров разливки металла из миксера

После настройки параметров разливки и нажатия кнопки «Принять» запустится анимационная сцена изготовления алюминиевых слитков на разливочном конвейере (рисунок 3.35).

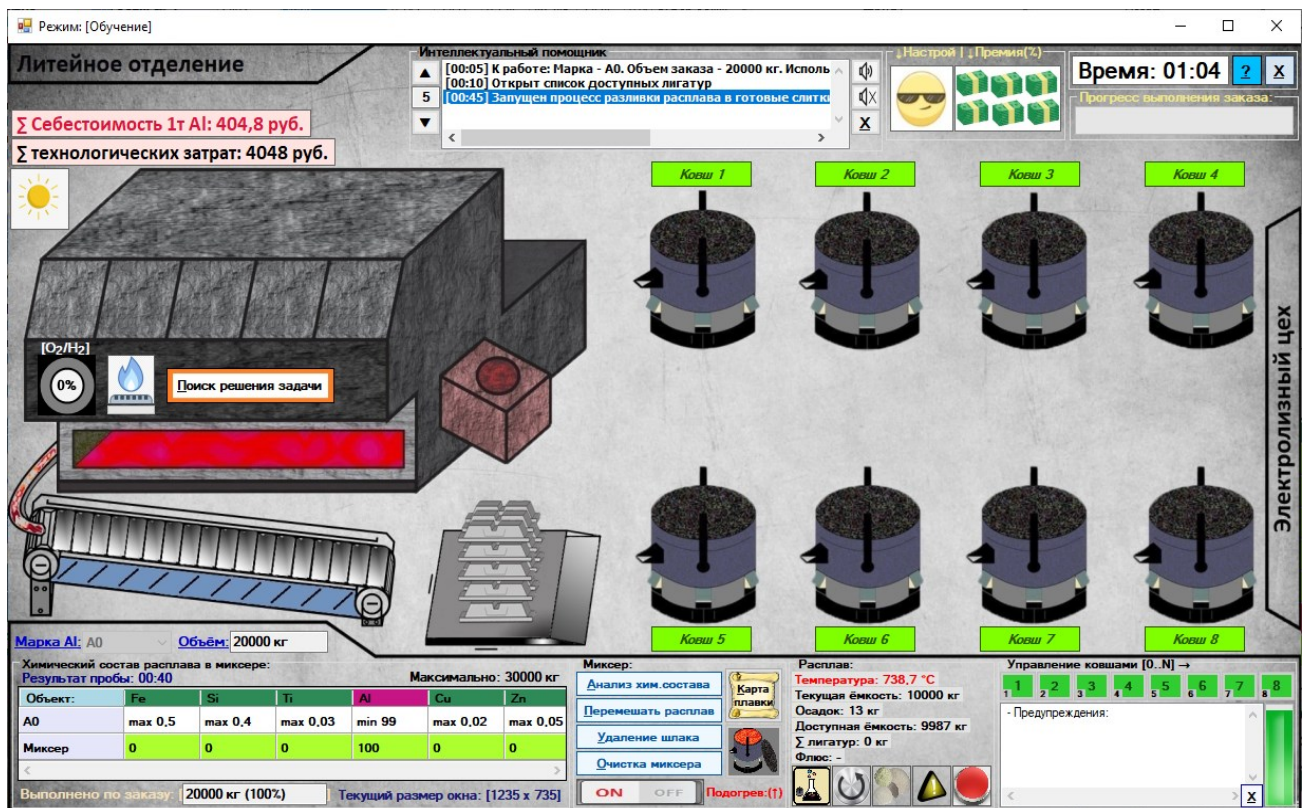


Рисунок 3.35 – Процесс разливки алюминиевого расплава в готовые слитки

Выполнение технологического заказа в полном объеме сопровождается появлением картинки и текстом с результатами (рисунок 3.36).

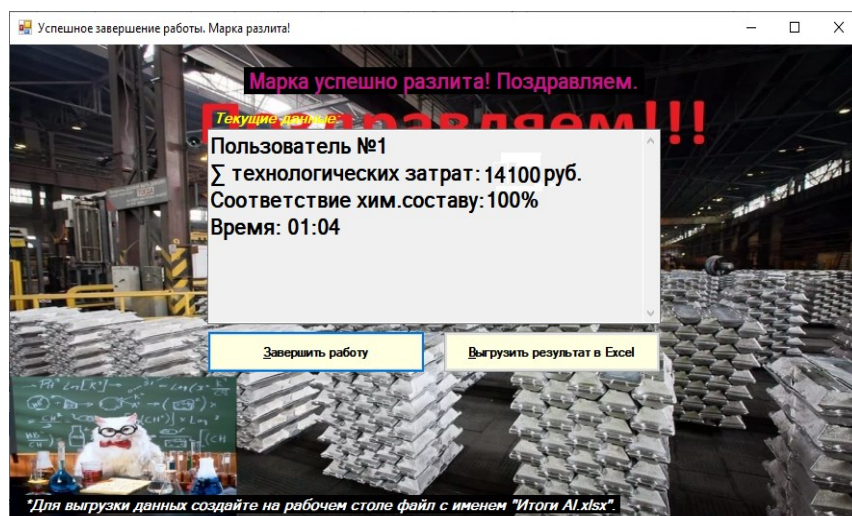


Рисунок 3.36 – Диалоговое окно успешного завершения работы

Одним из важных преимуществ разработанной системы является наличие мощного инструмента, определяемого в виде голосового интеллектуального помощника, способного помочь в поиске решения учебно-технологической задачи.

Он располагается в верхней центральной части интерфейса информационно-обучающей системы «Алюминщик» (рисунок 3.37). В его левой части находится регулятор частоты срабатывания помощника, а в правой части расположены кнопки, управляющие звуком и списком рекомендаций.

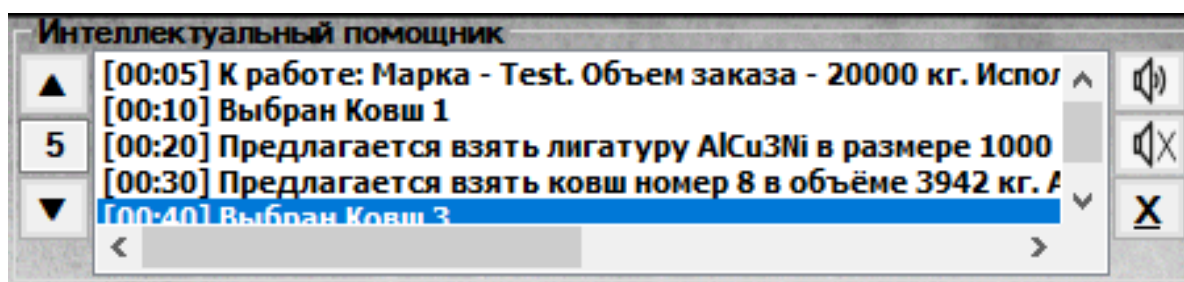


Рисунок 3.37 – Голосовой интеллектуальный помощник

Для регулярного получения рекомендаций от голосового интеллектуального помощника необходимо, чтобы он был активирован в стандартных настройках программного комплекса. При выполнении любых технологических операций помощник сгенерирует рекомендации на основе текущих данных работы. Например, при выборе ковша или модифицирующих компонентов выдаются конкретные рекомендации по использованию тех или иных материалов с конкретными расчетными значениями, определяемыми специальными алгоритмами системы.

По завершению пользовательской выплавки выбранной алюминиевой марки сплава необходимо проанализировать полученное значение показателя себестоимости производства 1 т металла. После нажатия кнопки «Поиск решения задачи» откроется специальное диалоговое окно, содержащее «Модуль прогнозирования управляющих воздействий» для информационно-обучающей системы «Алюминщик». Этот модуль позволяет осуществлять поиск необходимого варианта решения технологической задачи с учетом изменяющихся исходных данных или в соответствии с уже внесенными пользовательскими изменениями в процесс формирования алюминиевого расплава (рисунок 3.38).

Модуль прогнозирования управляющих воздействий [Поиск решения технологической задачи]

Test Восстановить исходную марку Выгрузить данные в MS Excel Состояние: [Отсутствует] Максимальная ёмкость миксера: 30000 кг

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

Химический состав по заказу [Марка Al]:

Марка Al	По заказу(кг)	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd	Li	Na	Ca	Ni
Test	20000	max 1,5	max 1	max 1	min 88,65	max 2,25	max 1,6	max 1	max 1	max 1	max 1	max 0	max 0	max 0	max 0	max 0

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

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

Объект	Расчёт(кг)	Ёмкость(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]:
 $\sum (I) \text{ строки} = 0 (0) \%$

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

№ Ковша:	Расчёт(кг)	Ёмкость(кг)	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd	Li	Na	Ca	Ni	Be	B
Ковш 1	4099	4099	0,143	2,831	0,128	91,385	3,026	0,066	0,023	2,244	0,079	0,075	0	0	0	0	0	0	0
Ковш 2	136	4000	0,841	4,433	0,099	88,308	2,959	1,159	0,068	1,839	0,238	0,056	0	0	0	0	0	0	0
Ковш 3	4000	4000	0,069	0,811	0,198	91,409	2,499	2,257	0,051	2,445	0,161	0,1	0	0	0	0	0	0	0
Ковш 4	0	1941	0,081	7,464	0,076	86,829	2,438	2,51	0,087	0,38	0,031	0,104	0	0	0	0	0	0	0
Ковш 5	0	2684	0,706	7,063	0,153	88,042	1,906	0,398	0,004	1,519	0,082	0,127	0	0	0	0	0	0	0
Ковш 6	4305	4305	0	5,874	0,06	89,644	0,53	2,383	0,037	1,259	0,192	0,021	0	0	0	0	0	0	0
Ковш 7	3498	3498	0,797	4,624	0,053	89,295	2,668	1,763	0,087	0,425	0,268	0,02	0	0	0	0	0	0	0
Ковш 8	3962	3962	0,476	4,712	0,05	92,156	1,063	0,649	0,068	0,649	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 Al	Результат(кг)	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd	Li	Na	Ca	Ni
Test	20000	0,283	3,779	0,099	90,781	1,931	1,423	0,052	1,435	0,138	0,079	0	0	0	0	0

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

Рисунок 3.38 – Модуль поиска решения учебно-технологической задачи

Решение учебно-технологической задачи можно осуществлять для любой марки алюминиевого сплава. Выбор марки сплава происходит при помощи использования выпадающего списка. Кнопка «Восстановить исходную марку» позволяет вернуть исходную марку алюминиевого сплава, которая фигурирует в параметрах исходной технологической задачи.

Поиск варианта решения возможен в двух основных режимах. Первый режим использует текущие исходные данные. Второй режим позволяет вручную редактировать уже имеющиеся данные или вводить новые значения задачи.

При редактировании данных, вносимые значения подвергаются немедленному анализу, обеспечивая контроль правильности ввода согласно требованиям системы «Алюминщик». Кнопки «Добавить строку» и «Удалить строку» доступны для режима редактирования во время ввода новых значений.

По умолчанию все имеющиеся данные в ячейках таблиц подсвечиваются двумя различными цветами, а именно «зеленым» и «красным». Зеленый цвет

указывает на ячейки, значения которых соответствуют заданным границам диапазона выбранной алюминиевой марки. Красный цвет сигнализирует о несоответствии текущих значений заданным требованиям химического состава марки.

Такой подход позволяет произвести визуальную оценку степени соответствия текущих данных заданным значениям, не прибегая к помощи средств поиска решения. Цветовая подсветка может быть отключена с помощью кнопки «Отключить подсветку ячеек» или включена при нажатии кнопки «Включить подсветку ячеек». Данный модуль реализует принцип последовательного разбиения основной учебно-технологической задачи на ряд простых подзадач. Тогда поиск решения осуществляется с помощью поэтапных вычислений, что связано с обработкой большого объема исходных данных.

Также, возможна выгрузка представленных данных в Microsoft Excel при нажатии кнопки «Выгрузить данные в Microsoft Excel». Выгруженная в Microsoft Excel порция данных подвергается обработке, что также позволяет получить наилучший вариант решения исходной технологической задачи с использованием встроенных в вычислительную среду различных алгоритмов расчета в рамках имеющихся ограничений.

Итоговые результаты индивидуального расчета, полученные с использованием «Модуля прогнозирования управляющих воздействий» или при помощи средств Microsoft Excel следует сопоставить с результатами пользователя и осуществить интерпретацию отклонений. Результаты тестового примера представлены ниже на рисунке 3.39, а процесс решения конкретной технологической задачи будет представлен в следующей главе.

Модуль прогнозирования управляющих воздействий [Поиск решения технологической задачи]				
Test	Восстановить исходную марку	Выгрузить данные в MS Excel	Состояние: [Отсутствует]	Максимальная ёмкость миксера: 30000 кг
Шаг 1: [Ковши]	Шаг 2: [Лигатуры]	Шаг 3: [Флюсы]	Себестоимость: [Итого]	
Итоговая себестоимость:				
[1] Себестоимость [Ковши]: 1000000 руб.				
[2] Себестоимость [Лигатуры]: 0 руб.				
[3] Себестоимость [Флюсы]: 26000 руб.				
Итого [Σ]: 1026000 руб.				

Рисунок 3.39 – Пример расчета себестоимости решения технологической задачи

3.4 Выводы к главе 3

1. Рассмотрены основные принципы разработки программных комплексов, определены наиболее важные функционально-технические возможности информационно-обучающей системы «Алюминщик».
2. Выбран и обоснован язык программирования высокого уровня для реализации математической модели и численного метода решения уравнения диффузии компонентов расплава в программном комплексе «Алюминщик».
3. Разработан комплекс программ в виде информационно-обучающей системы «Алюминщик» на основе объектно-ориентированного подхода, предназначенный для проведения вычислительных экспериментов и исследования процесса формирования алюминиевого расплава в миксере.
4. Представлены общие рекомендации по использованию основных функциональных возможностей информационно-обучающей системы «Алюминщик» в виде изображений и поясняющего текста.

4 Применение программного комплекса «Алюминщик» для исследования процесса формирования алюминиевого сплава

4.1 Тестирование программного комплекса «Алюминщик» на основе технологических данных

Для проверки адекватности разработанной математической модели объекта был проведен сравнительный анализ фактических и модельных данных. В частности, проанализированы данные из 246 паспортов плавов, взятых на предприятии АО «НКАЗ». С использованием этих данных были проведены расчеты на разработанной модели и получены модельные данные. Сравнительный анализ проведен для марок АВ88, АВ91, АВ92, АВ97 относительно содержания алюминия как основного элемента определяющего качество расплава. Результаты сравнительного анализа представлены на рисунке 4.1.

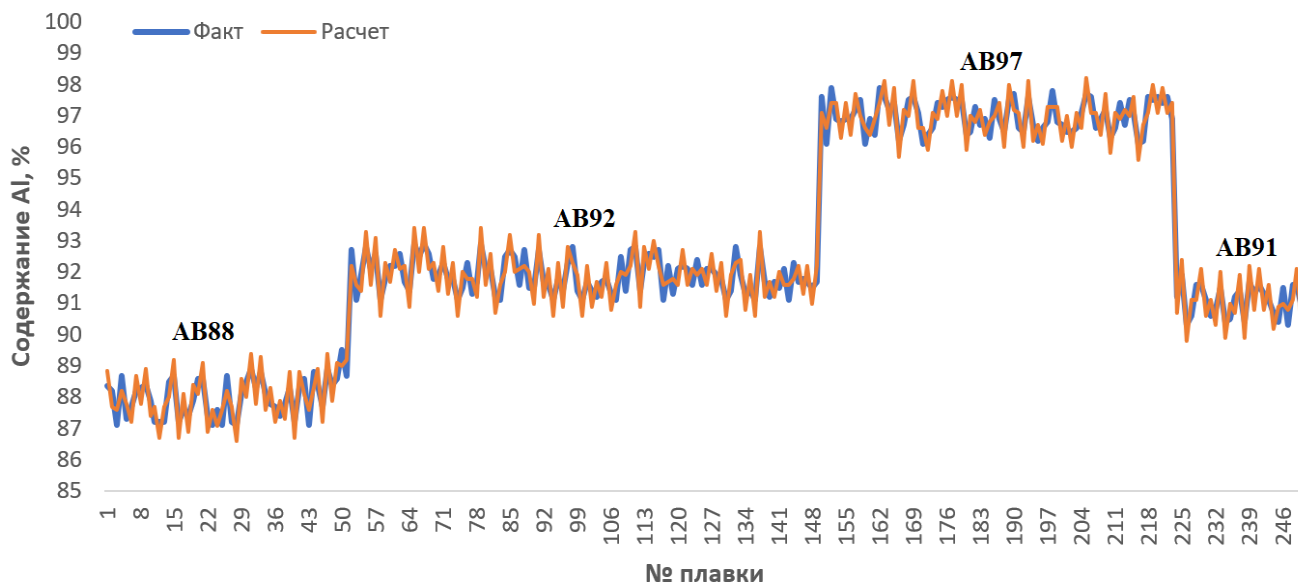


Рисунок 4.1 – Сравнительный анализ фактических и модельных данных

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

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

В результате расчета погрешностей для основных элементов алюминиевого расплава получены следующие результаты, представленные в таблице 4.1

Таблица 4.1 – Результаты расчета погрешностей для элементов расплава

	Состав расплава									
	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn
Погрешность модели	0,005	0,007	0,005	0,010	0,009	0,006	0,003	0,008	0,002	0,005
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

Результаты расчетов показали, что погрешность модели не превышает погрешности измерения химического состава алюминиевого расплава производственными методами и соответствует погрешности, предусмотренной ГОСТ 25086-2011. Таким образом, погрешность моделирования не превышает точности измерения химического состава алюминиевого расплава, поэтому можно считать, что разработанная математическая модель является адекватной.

4.2 Расчеты процесса формирования алюминиевого расплава в миксере с использованием математической модели

С использованием математической модели и программного комплекса «Алюминщик» проведены исследования технологического процесса формирования алюминия в миксере с учетом перемешивания расплава. Фрагмент исходных данных по восьми литейным ковшам для одной плавки приведен в таблице 4.2.

На рисунке 4.2 с использованием данных из таблицы 4.2 представлены результаты математического моделирования динамического процесса изменения концентрации компонентов формируемого расплава при добавлении алюминия-сырца из восьми литейных ковшей в миксер через промежутки времени τ .

Таблица 4.2 – Фрагмент исходных технологических данных

№ Объекта	Доступная масса(кг)	Химический состав алюминия-сырца в литейных ковшах, %									
		Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn
ЛК 1	4052	0,143	2,831	0,128	91,385	3,026	0,066	0,023	2,244	0,079	0,075
ЛК 2	3965	0,841	4,433	0,099	88,308	2,959	1,159	0,068	1,839	0,238	0,056
ЛК 3	3953	0,069	0,811	0,198	91,409	2,499	2,257	0,051	2,445	0,161	0,10
ЛК 4	1910	0,081	7,464	0,076	86,829	2,438	2,51	0,087	0,38	0,031	0,104
ЛК 5	2646	0,706	7,063	0,153	88,042	1,906	0,398	0,004	1,519	0,082	0,127
ЛК 6	4270	0,005	5,874	0,06	89,639	0,53	2,383	0,037	1,259	0,192	0,021
ЛК 7	3454	0,797	4,624	0,053	89,295	2,668	1,763	0,087	0,425	0,268	0,02
ЛК 8	3908	0,476	4,712	0,05	92,156	1,063	0,649	0,068	0,649	0,001	0,176

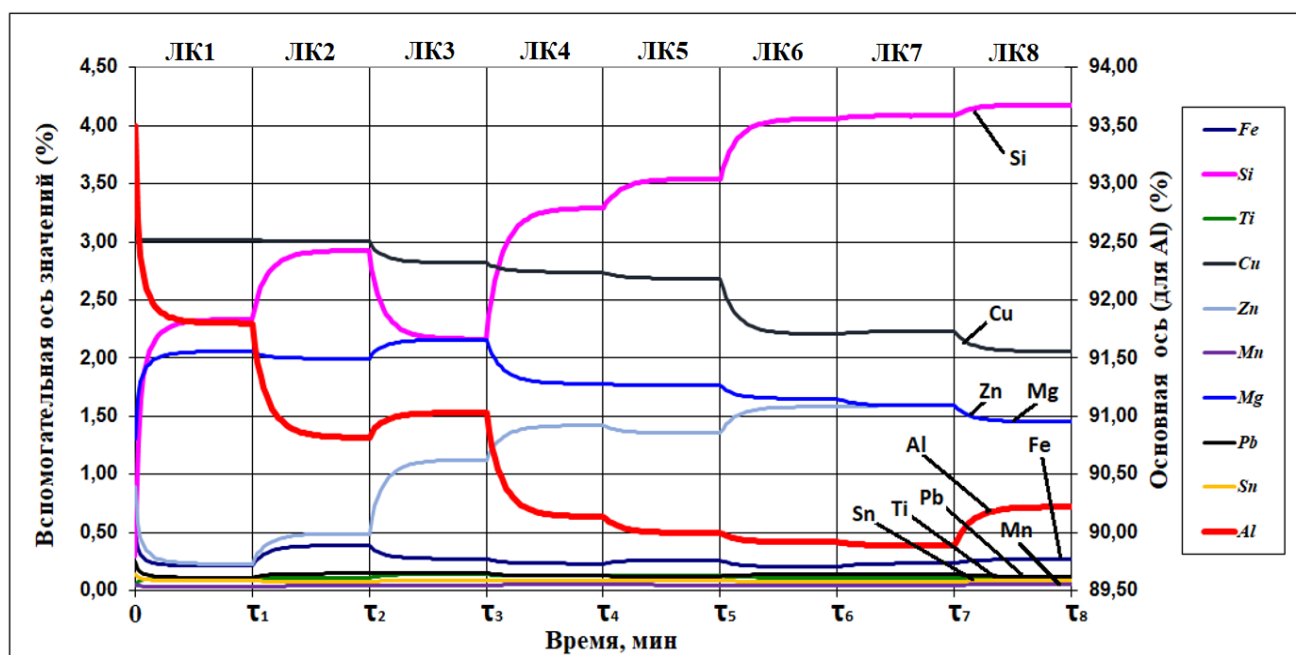


Рисунок 4.2 – Динамика изменения химического состава алюминиевого расплава

Таким образом, с использованием программного комплекса можно производить эмпирический расчет значений параметров смешивания алюминия-сырца из литейных ковшей и осуществлять визуализацию различных вариантов формирования химического состава алюминиевого расплава с учетом меняющихся начальных условий и ограничений.

На рисунке 4.3 представлено распределение коэффициента диффузии по центральному сечению объема миксера в диапазоне изменения значений при молекулярной и турбулентной диффузии под воздействием перемешивания различной степени интенсивности, что позволяет наиболее точно оценить время усреднения концентраций компонентов алюминиевого расплава.

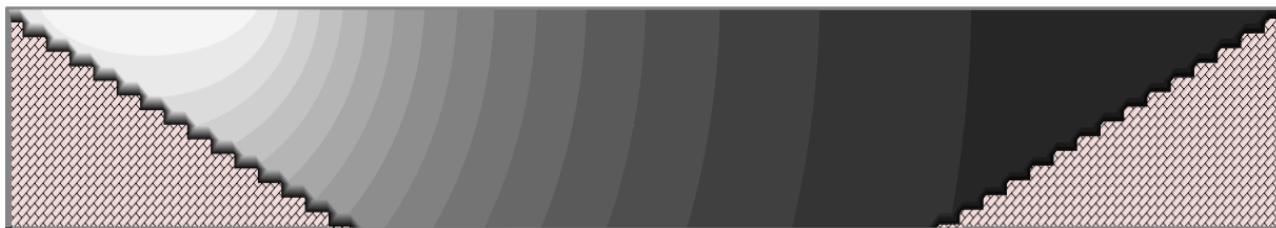


Рисунок 4.3 – Распределение коэффициента диффузии
по центральному сечению объема миксера

На рисунке 4.4 представлена динамика движения фронта концентрации компонента расплава при добавлении алюминия-сырца из литейного ковша на основе решения уравнения диффузии в рамках задачи математической физики.

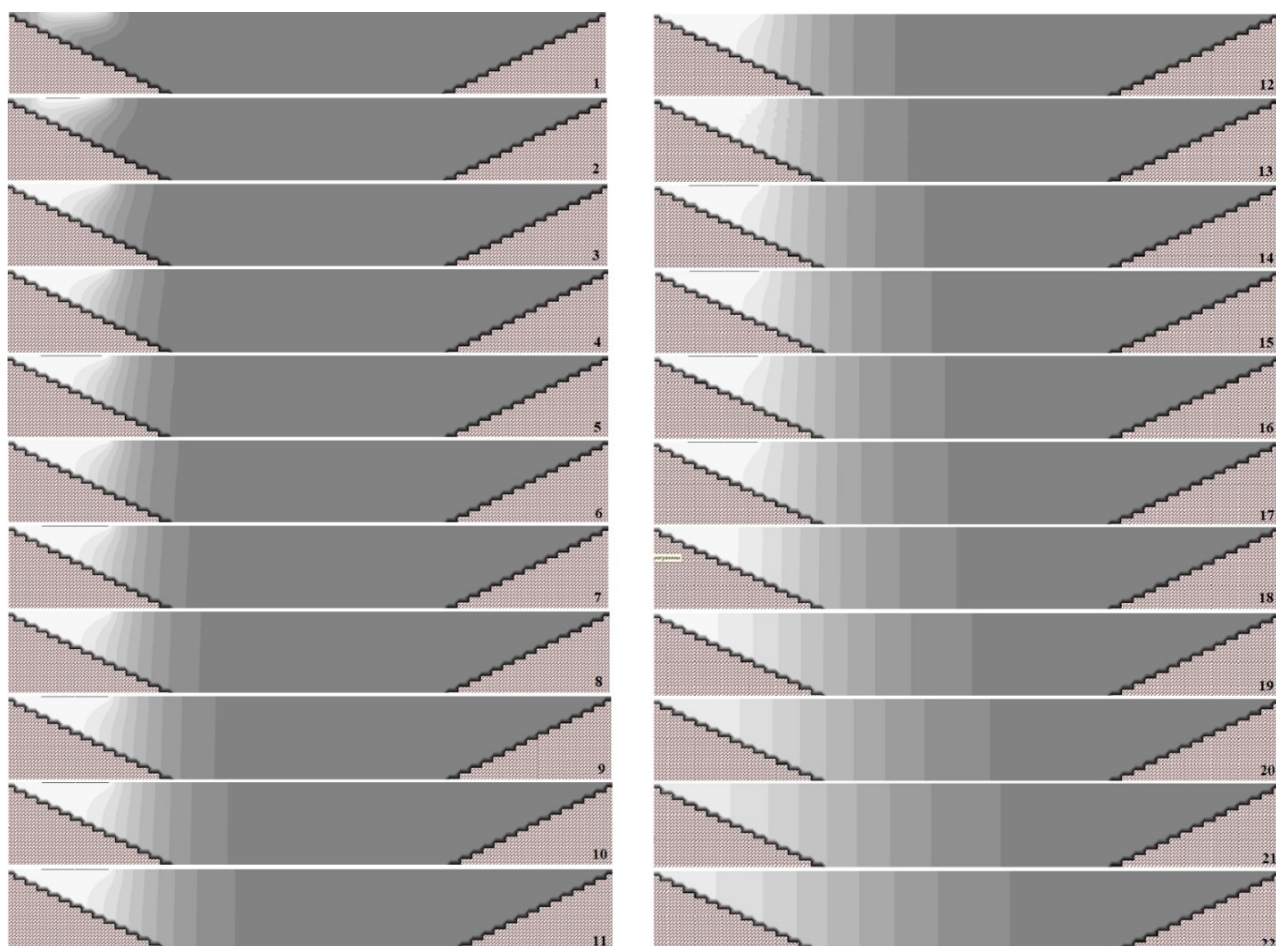


Рисунок 4.4 – Динамика движения фронта концентрации компонента расплава

Таким образом, представленные экранные формы на рисунках 4.3 и 4.4. позволяют визуально оценить, как характер распределения коэффициента диффузии по объему миксера, так и динамику фронта концентрации компонентов расплава при добавлении алюминия-сырца из очередного литейного ковша.

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

Рассмотрим пример формирования некоторой марки Test алюминиевого расплава с использованием программного комплекса «Алюминщик». Исходные данные для расчета взяты из таблицы 4.2. В связи со сложностью поставленной задачи необходимо ее разделить на несколько простых подзадач, в частности на три этапа для осуществления последовательного поиска решения.

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 коррекция химического состава алюминиевого расплава путем поиска нужного количества легирующих и флюсовых добавок соответственно.

Полученные результаты решения первой подзадачи являются исходными условиями для второго этапа вычислений, определяющего формирование заданной марки сплава путем дополнительного расчета необходимого количества легирующих компонентов для выравнивания химических показателей расплава.

На основе рассчитанных значений второй подзадачи, происходит выполнение третьего этапа вычислений, который заключается в итоговом подборе значений параметров расчета количества флюсовых добавок с целью получения конечного варианта решения поставленной технологической задачи.

Далее представлен пример шихтовки алюминиевого сплава марки Test с использованием модуля «Поиска решения технологической задачи». В верхней части интерфейса диалогового окна модуля представлена выбранная марка алюминия, а также отражена текущая информация о содержимом миксера. Вкладки данных характеризуют порядок проведения последовательных вычислений в виде трех основных этапов. Так, расчетные значения для 1 этапа представлены на рисунке 4.5, а вычисленный набор значений для 2 этапа представлен на рисунке 4.6.

Модуль прогнозирования управляющих воздействий [Поиск решения технологической задачи]

Test Восстановить исходную марку Выгрузить данные в MS Excel Состояние: [Отсутствует] Максимальная ёмкость миксера: 30000 кг

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

Химический состав по заказу [Марка Al]:

Марка Al	По заказу(кг)	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd	Li	Na	Ca	Ni
Test	20000	max 1,5	max 1	max 1	min 88,65	max 2,25	max 1,6	max 1	max 1	max 1	max 1	max 0	max 0	max 0	max 0	max 0

Исходный химический состав расплава [Миксер]:
Σ (0) строки = 0 (0) %

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

Объект	Расчёт(кг)	Ёмкость(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]:
Σ (0) строки = 0 (0) %

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

№ Ковша:	Расчёт(кг)	Ёмкость(кг)	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd	Li	Na	Ca	Ni	Be	B
Ковш 1	4099	4099	0,143	2,831	0,128	91,385	3,026	0,066	0,023	2,244	0,079	0,075	0	0	0	0	0	0	0
Ковш 2	829	4000	0,841	4,433	0,099	88,308	2,959	1,159	0,068	1,839	0,238	0,056	0	0	0	0	0	0	0
Ковш 3	4000	4000	0,069	0,811	0,198	91,409	2,499	2,257	0,051	2,445	0,161	0,1	0	0	0	0	0	0	0
Ковш 4	0	1941	0,081	7,464	0,076	86,829	2,438	2,51	0,087	0,38	0,031	0,104	0	0	0	0	0	0	0
Ковш 5	0	2684	0,706	7,063	0,153	88,042	1,906	0,398	0,004	1,519	0,082	0,127	0	0	0	0	0	0	0
Ковш 6	4305	4305	0	5,874	0,06	89,644	0,53	2,383	0,037	1,259	0,192	0,021	0	0	0	0	0	0	0
Ковш 7	3498	3498	0,797	4,624	0,053	89,295	2,668	1,763	0,087	0,425	0,268	0,02	0	0	0	0	0	0	0
Ковш 8	3962	3962	0,476	4,712	0,05	92,156	1,063	0,649	0,068	0,649	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 [Итого]:

Марка Al	Результат(кг)	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd	Li	Na	Ca	Ni
Test	20693	0,301	3,801	0,099	90,697	1,966	1,414	0,053	1,449	0,142	0,078	0	0	0	0	0

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

Рисунок 4.5 – Экранная форма результатов расчета для первого этапа задачи

Модуль прогнозирования управляющих воздействий [Поиск решения технологической задачи]

Test Восстановить исходную марку Выгрузить данные в MS Excel Состояние: [Отсутствует] Максимальная ёмкость миксера: 30000 кг

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

Химический состав по заказу [Марка Al]:

Марка Al	По заказу(кг)	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd	Li	Na	Ca	Ni
Test	20000	max 1,5	max 1	max 1	min 88,65	max 2,25	max 1,6	max 1	max 1	max 1	max 1	max 0	max 0	max 0	max 0	max 0

[Шаг 1]: Текущий химический состав расплава [Миксер]
Σ (0) строки = 0 (0) %

Марка Al	Результат(кг)	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd	Li	Na	Ca	Ni
A0	20693	0,301	3,801	0,099	90,698	1,966	1,414	0,053	1,449	0,142	0,078	0	0	0	0	0

Химический состав доступных компонентов [Лигатуры]:
Σ (0) 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
AlB3	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	
AlB4	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	
AlB5	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	
AlBe5	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	
AlBz3	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	
AlCa6	0	1000	0,3	0,3	0	92,94	0	0	0,05	0,05	0,04	0,04	0	0,04	0,04	6	0	0,04	
AlCa10	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	
AlCo10	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 [Итого]:

Марка Al	Результат(кг)	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd	Li	Na	Ca	Ni
Test	20693	0,301	3,801	0,099	90,697	1,966	1,414	0,053	1,449	0,142	0,078	0	0	0	0	0

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

Рисунок 4.6 – Экранная форма результатов расчета для второго этапа задачи

В данном случае расчетные значения для легирующих материалов остались в исходном состоянии, так как эту задачу можно решить без использования дорогостоящих легирующих компонентов, что приводит к дополнительному снижению временных и технологических затрат.

На рисунке 4.7 представлены расчетные данные для 3 этапа. Здесь представлен наиболее подходящий вариант расчета количества флюсовых добавок в соответствии с их технической спецификацией.

Модуль прогнозирования управляющих воздействий [Поиск решения технологической задачи]

Test Восстановить исходную марку Выгрузить данные в MS Excel Состояние: [Отсутствует] Максимальная ёмкость миксера: 30000 кг

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

Химический состав по заказу [Марка Al]:

Марка Al	По заказу(kg)	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd	Li	Na	Ca	Ni
Test	20000	max 1,5	max 1	max 1	min 88,65	max 2,25	max 1,6	max 1	max 1	max 1	max 1	max 0	max 0	max 0	max 0	max 0

[Шаг 2]: Текущий химический состав расплава [Миксер]
Σ (0) строки = 0 (0) %

Марка Al	Результат(kg)	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd	Li	Na	Ca	Ni
A0	20693	0,301	3,801	0,099	90,698	1,966	1,414	0,053	1,449	0,142	0,078	0	0	0	0	0

Химический состав доступных компонентов [Флюсы]:
Σ (0) строки = 0 (0) %

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

№ Флюса	Норма(%)	Расчёт(kg)	Доступно(kg)	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd	Li	Na	Ca	Ni
№-1	0,8	125	500	0	-100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
№-2	1	70	1000	0	0	0	0	0	0	0	-100	0	0	0	0	0	0	
№-3	1,5	0	1000	0	-50	0	0	-50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

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

Подсветка ячеек:
☐ Включить подсветку ячеек ☐ Отключить подсветку ячеек

Шаг 3: Расчётный химический состав расплава в миксере [Итог]:

Марка Al	Результат(kg)	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd	Li	Na	Ca	Ni
Test	20000	0,312	0,971	0,102	93,843	2,035	1,463	0,055	0,992	0,147	0,080	0	0	0	0	0

Шаг 3: Рассчитать итог(=) [Авто]: Поиск решения Очистить расчётные данные Состояние: [Расчёт завершен] Заккрыть окно

Рисунок 4.7 – Экранная форма результатов расчета для третьего этапа задачи

В результате, с помощью последовательных вычислений было сформировано итоговое решение заданной технологической задачи в соответствии с установленными требованиями марки сплава. Информация о себестоимости решения отражена во вкладке «Себестоимость [Итог]» (рисунок 4.8).

Таким образом, итоговая себестоимость формирования алюминиевого расплава заданной марки Test составила: 1.044.050 руб. При этом для реализации решения в системе «Алюминщик» необходимо: 1 мин. 55 сек (рисунок 4.9).

Test	Восстановить исходную марку	Выгрузить данные в MS Excel	Состояние: [Отсутствует]
Шаг 1: [Ковши]	Шаг 2: [Лигатуры]	Шаг 3: [Флюсы]	Себестоимость: [Итог]
Итоговая себестоимость:			
[1] Себестоимость [Ковши]: 1034650 руб.			
[2] Себестоимость [Лигатуры]: 0 руб.			
[3] Себестоимость [Флюсы]: 9400 руб.			
Итого [Σ]: 1044050 руб.			

Рисунок 4.8 – Экранная форма результатов расчета себестоимости формирования алюминиевого расплава

Последовательность выполненных действий отображается в структурированном виде в разделе «Карта плавки марки алюминия». Представленная на рисунке 4.9 карта плавки отображает наилучший результат шихтовки расплава с использованием всего набора функциональных возможностей информационно-обучающей системы «Алюминщик».

Карта плавки марки алюминия

Карта плавки: Test.

Текущая дата: Пт 22.11.19 г.

Наименование исходных и шихтовых материалов:

№ Материала:	Время:	Масса(кг):	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd	Li
Ковш 1	00:01	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	00:15	829	0,841	4,433	0,099	88,308	2,959	1,159	0,068	1,839	0,238	0,056	0	0
Ковш 3	00:23	4000	0,069	0,811	0,198	91,409	2,499	2,257	0,051	2,445	0,161	0,1	0	0
Ковш 6	00:31	4305	0	5,874	0,06	89,644	0,53	2,383	0,037	1,259	0,192	0,021	0	0
Ковш 7	00:37	3498	0,797	4,624	0,053	89,295	2,668	1,763	0,087	0,425	0,268	0,02	0	0
Ковш 8	00:44	3962	0,476	4,712	0,05	92,156	1,063	0,649	0,068	0,649	0,001	0,176	0	0
[Флюс] №1	00:57	125	0	-100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
[Флюс] №2	01:12	65	0	0	0	0	0	0	0	-100	0	0	0	0
[Флюс] ФПР-23 (1%)	01:33	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Итого: 20000 (осадок: 0) кг

Результаты экспресс-анализа:

№ Пробы:	Время:	Масса(кг):	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd	Li	Na
Проба: 1	01:44	20000	0,312	0,971	0,102	93,843	2,035	1,463	0,055	0,992	0,147	0,08	0	0	0

Данные на момент времени: 01:55

Закончить просмотр

Рисунок 4.9 – Карта наилучшей расчетной плавки алюминиевого сплава Test

На рисунке 4.10 представлена другая карта плавки, выполненная одним из пользователей системы без использования подсказок и рекомендаций, то есть стандартным методом «проб и ошибок».

Карта плавки марки алюминия

Карта плавки: Test.
Текущая дата: 15.05.2020 г.
Наименование исходных и шихтовых материалов:

№ Материала:	Время:	Масса(кг):	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd	Li
Ковш 1	00:07	4099	0,143	2,831	0,128	91,385	3,026	0,066	0,023	2,244	0,079	0,075	0	0
Ковш 3	00:15	4000	0,069	0,811	0,198	91,409	2,499	2,257	0,051	2,445	0,161	0,1	0	0
Ковш 4	00:21	1941	0,081	7,464	0,076	86,829	2,438	2,51	0,087	0,38	0,031	0,104	0	0
Ковш 5	00:28	2684	0,706	7,063	0,153	88,042	1,906	0,398	0,004	1,519	0,082	0,127	0	0
Ковш 6	00:46	4305	0	5,874	0,06	89,644	0,53	2,383	0,037	1,259	0,192	0,021	0	0
Ковш 8	00:57	3962	0,476	4,712	0,05	92,156	1,063	0,649	0,068	0,649	0,001	0,176	0	0
[Флюс] №1	01:12	150	0	-100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
[Флюс] №2	01:40	100	0	0	0	0	0	0	0	-100	0	0	0	0
[Флюс] ФПР-23 (1%)	02:33	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Итого: 20010 (осадок: 0) кг
Результаты экспресс-анализа:

№ Пробы:	Время:	Масса(кг):	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn	Cd	Li	Na
Проба: 1	00:41	12724	0,229	3,796	0,147	89,993	2,535	1,197	0,038	1,869	0,098	0,098	0	0	0
Проба: 2	00:56	17029	0,171	4,321	0,125	89,904	2,028	1,497	0,038	1,715	0,122	0,079	0	0	0
Проба: 3	01:10	20991	0,229	4,395	0,111	90,328	1,846	1,337	0,044	1,514	0,099	0,097	0	0	0
Проба: 4	01:32	20167	0,238	0,49	0,116	94,017	1,921	1,392	0,046	1,576	0,103	0,101	0	0	0
Проба: 5	01:56	20010	0,24	0,494	0,117	94,756	1,936	1,403	0,046	0,802	0,104	0,102	0	0	0
Проба: 6	02:47	20010	0,24	0,494	0,117	94,756	1,936	1,403	0,046	0,802	0,104	0,102	0	0	0

Данные на момент времени: 02:49

Закончить просмотр

Рисунок 4.10 – Карта пользовательской плавки алюминиевого сплава марки Test

Итоговая стоимость производства алюминиевого расплава с использованием метода «проб и ошибок» составила: 1.061.090 руб. Время, затраченное пользователем на решение данной задачи, составило: 2 мин. 49 сек. Полученные результаты, в соответствии с заданным химическим составом марки алюминиевого сплава Test отражены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Итоговые результаты решений

Тип решения	Время работы	Себестоимость тонны Al (руб.)	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn
Пользователь	00:02:49	53054.50	0,240	0,494	0,117	94,756	1,936	1,403	0,046	0,802	0,104	0,102
«Алюминщик»	00:01:55	52202.50	0,312	0,971	0,102	93,843	2,035	1,463	0,055	0,992	0,147	0,080

Таким образом, с использованием информационно-обучающей системы «Алюминщик» и модуля «Поиска решения технологической задачи» реализован более точный вариант решения заданной технологической задачи по сравнению с решением пользователя. При этом получено наилучшее время реализации вычислительного эксперимента наряду с сокращением себестоимости производства 1 тонны алюминиевого расплава на 852 руб. в конкретном случае.

4.4 Выводы к главе 4

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

2. С использованием программного комплекса «Алюминщик» проведены исследования технологического процесса формирования алюминиевого расплава в миксере, а также представлены результаты математического моделирования динамического процесса изменения концентрации компонентов формируемого расплава при последовательном добавлении алюминия-сырца из литейных ковшей с учетом распределения коэффициента диффузии в диапазоне изменения значений при молекулярной и турбулентной диффузии по объему миксера.

3. Представлен пример решения технологической задачи с использованием функциональных возможностей программного комплекса «Алюминщик» и осуществлена интерпретация полученных данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты математического моделирования и программной реализации информационно-обучающей системы «Алюминщик» для проведения вычислительных экспериментов и исследования технологического процесса формирования алюминиевых сплавов в миксере.

1. Проведен анализ технологии производства алюминиевых сплавов на предприятии АО «НкАЗ». Определено, что существующие технологические этапы производства алюминия не являются совершенными из-за своей многозадачности и сложности. При подробном рассмотрении технологии производства металла, оказалось, что одной из наиболее сложных стадий выплавки алюминия является формирование (шихтовка) алюминиевого расплава в миксере литейного отделения.

2. Проведен обзор существующих программных комплексов, связанных с производством алюминия. Установлено, что готовых программных продуктов, моделирующих известные этапы производства алюминия крайне мало, а технология шихтовки расплава остается несовершенной, что приводит к неточностям реализации технологического процесса и повышению себестоимости готовой продукции.

3. Разработана математическая модель, описывающая технологический процесс формирования алюминиевого расплава с заданной массой, химическим составом и температурой, которая базируется на уравнениях диффузии, материального и теплового балансов, динамических уравнениях скоростей изменения масс и химического состава формируемого расплава при последовательном добавлении алюминия-сырца из литейных ковшей в миксер, а также присадок лигатур и флюсов различного качества.

4. Разработан численный метод решения уравнения диффузии, который учитывает распределение коэффициента диффузии компонентов формируемого расплава по объему миксера в диапазоне изменения значений при молекулярной и турбулентной диффузии под воздействием перемешивания различной степени интенсивности, что позволяет более точно оценить время усреднения химического состава алюминиевого расплава.

5. Разработан комплекс программ в виде информационно-обучающей системы «Алюминщик» с интерактивным интерфейсом для проведения вычислительного эксперимента, направленного на формирование алюминиевого расплава в миксере с заданным химическим составом.

6. Результаты работы:

- внедрены в учебный процесс «СибГИУ» на кафедрах прикладных информационных технологий и программирования (ПИТиП), а также металлургии цветных металлов и химических технологий (МЦМиХТ) при подготовке бакалавров и магистров по направлениям: 22.03.02 Металлургия в дисциплине «Металлургия легких металлов»; 09.03.01 Информатика и вычислительная техника; 09.03.03 Прикладная информатика в дисциплине «Моделирование систем»;
- внедрены в учебно-информационный центр компании АО «НКАЗ»;
- использовались для проведения и продвижения профориентационного конкурса «Алюминий Баттл» совместно со специалистами АО «НКАЗ» и развивающим НПЦ «Кузница Наук» на образовательной платформе ФГБОУ ВО «СибГИУ».

Таким образом, разработанный комплекс программ в виде информационно-обучающей системы «Алюминщик» позволяет проводить математическое моделирование процесса формирования алюминиевых сплавов с целью снижения количества ошибок шихтовки за счет повышения уровня квалификации технологического персонала, а также способствует повышению качества готовой продукции благодаря более рациональному использованию материальных ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Шибистов, Б. В. Бокситы и железоалюминиевые руды / Б. В. Шибистов. – Красноярск: Изд-во «СФУ». – 2013. – С. 995–1002.
- 2 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.
- 3 Кушнарев, Г. М. Минералы и горные породы / Г. М. Кушнарев. – Челябинск: Изд-во «ЮУрГУ». – 2007. – 70 с.
- 4 Тихонов, Н. Н. Перспективы развития технологических процессов глиноземного производства / Н. Н. Тихонов. – СПб.: Изд-во «ВАМИ». – 1992. – 144 с.
- 5 Золоторевский, В. С. Металловедение цветных металлов. Алюминиевые сплавы / В. С. Золоторевский, Н. А. Белов. – М.: Изд-во «МИСиС». – 2000. – 147 с.
- 6 Тереньтев, В. Г. Производство алюминия / В. Г. Тереньтев, Р. М. Школьников, И. С. Гринберг, А. Е. Черных [и др.] – И.: Изд-во «Папирус-АРТ». – 1998. – 350 с.
- 7 Щелканова, Е. Элемент №13 / Е. Щелканова, Н. Еремина, В. Кузьминых. – Красноярск: Изд-во «Поликор». – 2015. – 144 с.
- 8 Шмитц, К. Рециклинг алюминия / К. Шмитц. – М.: Изд-во «АЛЮСИЛ МВиТ». – 2008. – 509 с.
- 9 Беляев, А. И. Металловедение алюминия и его сплавов / А. И. Беляев, О. С. Бочвар, Н. Н. Буйнов. – М.: Изд-во «Металлургия». – 1995. – 335 с.
- 10 Тихонов, В. Н. Аналитическая химия алюминия / В. Н. Тихонов. – М.: Изд-во «Наука». – 1971. – 266 с.
- 11 Янко, Э. А. Производство алюминия / Э. А. Янко. – СПб.: Изд-во «СПбГУ». – 2007. – 305 с.
- 12 Белецкий, В. М. Алюминиевые сплавы. Состав, свойства, технология, применение / В. М. Белецкий, Г. А. Кривов. – К.: Изд-во «Коминтех». – 2005.

– 365 с.

13 Корнеев, В. И. Красные шламы / В. И. Корнеев, А. Г. Сусс, А. И. Цехова. – М.: Изд-во «Металлургия». – 1991. – 144 с.

14 Зиновеев, Д. В. Обзор мировой практики переработки красных шламов. Пирометаллургические способы / Д. В. Зиновеев, П. И. Грудинский, В. Г. Дюбанов, Л. В. Коваленко [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2018. – С. 843–858.

15 Логинова, И. В. Технология производства глинозема / И. В. Логинова, А. В. Кырчиков, Н. П. Пенюгалова. – Екатеринбург: Изд-во «Урал. ун-та». – 2015. – 336 с.

16 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.

17 Вольфсон, Г. Е. Производство алюминия в электролизерах с обожженными анодами / Г. Е. Вольфсон, В. П. Ланкин. – М.: Изд-во «Металлургия». – 1974. – 136 с.

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

19 Колодин, Э. А. Производство обожженных анодов алюминиевых электролизеров / Э. А. Колодин, В. А. Свердлин, Р. В. Свобода. – М.: Изд-во «Металлургия». – 1980. – 84 с.

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

21 Колобов, Г. А. Металлургия цветных металлов / Г. А. Колобов, В. Н. Бредихин, Н. Л. Маняк [и др.] – Донецк: Изд-во «Кальмиус». – 2007. – 462 с.

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

23 Борисоглебский, Ю. В. Металлургия алюминия / Г. В. Галевский, Н. М.

Кулагин, М. Я. Минцис, Г. А. Сиразутдинов. – Новосибирск: Изд-во «Наука». – 2000. – 438 с.

24 Сорлье, М. Катоды в алюминиевом электролизе / М. Сорлье, Х. А. Ойя. – Красноярск: Изд-во «Алюминиум Ферляг». – 1997. – 460 с.

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

26 Модернизация электролизного производства [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://rusal.ru/innovation/technology/ra-550/>, свободный (дата обращения: 01.05.2021).

27 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.

28 Александрова, Э. А. Аналитическая химия / Э. А. Александрова, Н. Г. Гайдукова. – М.: Изд-во «Юрайт». – 2019. – 533 с.

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

30 Дроздов, А. Тринадцатый элемент / А. Дроздов, Е. Шанина. – М.: «Библиотека РУСАЛа». – 2007. – 122 с.

31 Курдюмов, А. В. Производство отливок из сплавов цветных металлов / А. В. Курдюмов. – М.: Изд-во «МИСиС». – 2011. – 615 с.

32 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.

33 Купряков, Ю. П. Производство тяжелых цветных металлов из лома и отходов / Ю. П. Купряков. – Харьков: Изд-во «Основа». – 1992. – 399 с.

34 Гопиенко, В. Г. Металлические порошки алюминия, магния, титана и кремния / В. Г. Гопиенко, С. Ю. Петрович, В. П. Черепанов, А. К. Ярмолевич [и др.]. – Спб.: Изд-во «Политехнический университет». – 2012. – 356 с.

35 Шеметев, Г. Ф. Алюминиевые сплавы: составы, свойства, применение

/ Г. Ф. Шеметев. – СПб.: Изд-во «СПбПУ». – 2012. – 155 с.

36 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.

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

38 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.

39 Технология приготовления алюминиевых сплавов [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://mishytka1974.ucoz.ru/publ/tekhnologija_prigotovlenija_aljuminievykh_splavov/1-1-0-146, свободный (дата обращения: 05.05.2021).

40 Шизби, П. Г. Обработка поверхности и отделка алюминия / П. Г. Шизби, Р. Пиннер. – М.: Изд-во «Алюсил МВнТ». – 2011. – 1377 с.

41 Осипова, В. А. Повышение эффективности обучения операторов технологических процессов на базе компьютерных тренажеров / Системы. Методы. Технологии // В. А. Осипова, Г. Б. Даныкина. – Братск, 2011. – С. 106–114.

42 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.

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

44 Обзор литейных программ [Электронный ресурс]: MagmaSoft – Режим доступа: <http://lvmflow.ru/liteinie-programmi/obzor-liteynyih-programm/magmasoft/>, свободный (дата обращения: 05.05.2021).

45 Обзор литейных программ [Электронный ресурс]: WinCast SimTec – Режим доступа: <http://lvmflow.ru/liteinie-programmi/obzor-liteynyih-programm/>

wincast/, свободный (дата обращения: 05.05.2021).

46 Обзор литейных программ [Электронный ресурс]: SolidCast Finite Solutions Inc – Режим доступа: <http://lvmflow.ru/liteinie-programmi/obzor-liteynyih-programm/solidcast/>, свободный (дата обращения: 05.05.2021).

47 Все о моделировании литейных процессов [Электронный ресурс]: ProCast – Режим доступа: <https://castsoft.ru/programs/procast/>, свободный (дата обращения: 05.05.2020).

48 Обзор литейных программ [Электронный ресурс]: LVMFlow – Режим доступа: <http://lvmflow.ru/lvmflow/>, свободный (дата обращения: 05.05.2021).

49 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.

50 Мартусевич, Е. А. Изменение образовательных ресурсов под влиянием средств информатизации / Е. А. Мартусевич, С. В. Ковыршина // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2016. – № 4. – С. 35–38.

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

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

53 Звонарев, С. В. Основы математического моделирования / С. В. Звонарев. – Екатеринбург: Изд-во «Уральского университета». – 2019. – 112 с.

54 Медведева, С. А. Основы технической подготовки производства / С. А. Медведева. – СПб.: Изд-во «СПбГУ ИТМО». – 2010. – 69 с.

55 Крутин, Ю. В. Эффективность информационных систем и технологий

/ Ю. В. Крутин. – Екатеринбург: Изд-во «РГППУ». – 2020 – 62 с.

56 Беспалов, В. В. Информационные технологии / В. В. Беспалов. – Томск: Изд-во «ТПУ». – 2012. – 134 с.

57 Могилев, А. В. Информационные технологии / А. В. Могилев, Н. И. Пак, Е. К. Хеннер. – М.: Изд-во «Бином». – 2004. – 848 с.

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

59 Сергеев, С. Ф. Введение в инженерную психологию и эргономику иммерсивных сред / С. Ф. Сергеев. – СПб.: Изд-во «СПбГУ ИТМО». – 2011. – 258 с.

60 Максименко, С. Д. Общая психология / С. Д. Максименко. – М.: Изд-во «Рефл-бук». – 2004. – 528 с.

61 Панкратова, Т. М. Методика преподавания психологии / Т. М. Панкратова. – Ярославль: Изд-во «ЯрГУ». – 2015. – 112 с.

62 Михайленко, Т. М. Игровые технологии как вид педагогических технологий / Материалы I Международной научной конференции // Т. М. Михайленко. – Челябинск: Изд-во «Два комсомольца». – 2011. – С. 140–146.

63 Емельянова, Т. В., Игровые технологии в образовании / Т. В. Емельянова, Г. А. Медяник. – Тольятти: Изд-во «ТГУ». – 2015. – 88 с.

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

65 Васина, Н. В. Деловые игры игровые упражнения в учебном процессе / Н. В. Васина, О. А. Мищенко. – Хабаровск: Изд-во «ТГУ». – 2016. – 227 с.

66 Захарова, Н. А. Компьютерный тренажер для обучения операторов технологических процессов / Материалы IV студенческой международной заочной научно-практической конференции «Молодежный научный форум: технические и математические науки» // Н. А. Захарова, О. В. Михайлова. – М: Изд-во «МЦНО».

– 2013. – 106 с.

67 Мартусевич, Е. А. Применение информационно-обучающих систем для обучения технологического персонала навыкам управления промышленными объектами / Е. А. Мартусевич, В. Н. Буинцев, С. Н. Калашников // Труды X Международной научно-практической конференции «Информация и образование: границы коммуникаций» INFO'18. – 2018. – С. 269–271.

68 Захарова, Г. Б. Компьютерные тренажеры как средство эффективного обучения / Г. Б. Захарова, Д. Н. Первухин, Д. В. Байгозин // Новые образовательные технологии в ВУЗе. – Екатеринбург: Изд-во «УГТУ-УПИ». – 2009. – С. 124–127.

69 Артемкин, Д. Е. Основы компьютерного моделирования / Д. Е. Артемкин, В. В. Баринов, Г. В. Овечкин, И. М. Степнов. – М.: Изд-во «Лаборатория базовых знаний». – 2004. – 152 с.

70 Дилигенская, А. Н. Идентификация объектов управления / А. Н. Дилигенская. – Самара: Изд-во «СГТУ». – 2009. – 136 с.

71 Хруцкий, В. Е. Оценка персонала. Сбалансированная система показателей / В. Е. Хруцкий, Р. А. Толмачев, Р. В. Хруцкий. – М.: Изд-во «Юрайт». – 2019. – 208 с.

72 Белов, М. П. Технические средства автоматизации и управления / М. П. Белов. – СПб.: Изд-во «СЗТУ». – 2006. – 184 с.

73 Еляков, А. Д. Современная информационная революция / А. Д. Еляков. – Самара: Изд-во «СГЭУ». – 2003. – 85 с.

74 Городнова, А. А. Развитие информационного общества / А. А. Городнова. – М.: Изд-во «Юрайт». – 2017. – 235 с.

75 Ракитов, А. И. Информация, наука, технология в глобальных исторических изменениях / А. И. Ракитов. – М.: Изд-во «РАН». – 2014. – 104 с.

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

77 Рейзлин, В. И. Математическое моделирование / В. И. Рейзлин. – М.:

Изд-во «Юрайт». – 2016. – 128 с.

78 Федоткин, И. М. Математическое моделирование технологических процессов / И. М. Федоткин. – М.: Изд-во «Ленанд». – 2015. – 416 с.

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

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

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

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

83 Емельянов, С. В. Информационные технологии и вычислительные системы / С. В. Емельянов. – М.: Изд-во «Ленанд». – 2015. – 96 с.

84 Митришкин, Ю. В. Линейные математические модели динамических систем с управлением / Ю. В. Митришкин. – М.: Изд-во «Ленанд». – 2019. – 464 с.

85 Кулаичев, А. П. Методы и средства комплексного анализа данных / А. П. Кулаичев. – М.: Изд-во «ИНФРА-М». – 2017. – 512 с.

86 Петрунин, Ю. Ю. Информационные технологии анализа данных / Ю. Ю. Петрунин. – М.: Изд-во «КДУ». – 2010. – 292 с.

87 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.

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

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

90 Бахвалов, Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г.

М. Кобельков. – М.: Изд-во «БИНОМ». – 2008. – 636 с.

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

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

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

94 Ребро, И. В. Дифференциальные уравнения / И. В. Ребро, С. Ю. Кузьмин, Н. Н. Короткова, Д. А. Мустафина. – Волгоград: Изд-во «ВолгГТУ». – 2006. – 64 с.

95 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.

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

97 Мартусевич, Е. А. Модуль прогнозирования управляющих воздействий для информационно-обучающей системы «Алюминщик» / Е. А. Мартусевич, В. Н. Буинцев, С. Н. Калашников // Труды VIII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (ТИМ'19). – 2019. – С. 263–266.

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

99 Албахари, Д. Полное описание языка C#: справочник по руководству

- пользования / Д. Албахари, Б. Албахари. – М.: Изд-во «Вильямс». – 2017. – 1040 с.
- 100 Касперски, К. Техника отладки программ без исходных текстов / К. Касперски. – СПб.: Изд-во «БХВ-Петербург». – 2005. – 832 с.
- 101 Виссер, Дж. Разработка обслуживаемых программ на языке C# / Дж. Виссер. – М.: Изд-во «Пресс». – 2017. – 192 с.
- 102 Гостев, И. М. Операционные системы / И. М. Гостев. – М.: Изд-во «Юрайт». – 2020. – 164 с.
- 103 Вайсфельд, М. Объектно-ориентированное мышление / М. Вайсфельд. – СПб.: Изд-во «Питер». – 2014. – 304 с.
- 104 Блюмин, А. М. Мировые информационные ресурсы / А. М. Блюмин, Н. А. Феоктистов. – М.: Изд-во «Дашков и К». – 2015. – 680 с.
- 105 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.
- 106 Ясницкий, Л. Н. Интеллектуальные системы / Л. Н. Ясницкий. – М.: Изд-во «Лаборатория знаний». – 2016. – 224 с.
- 107 Купер, А. Об интерфейсе профессионально / А. Купер, Р. Рейман, Д. Кронин. – СПб.: Изд-во «Питер». – 2017. – 720 с.
- 108 Фофанов, О. Б. Алгоритмы и структуры данных / О. Б. Фофанов. – Томск: Изд-во «ТПУ». – 2014. – 123 с.
- 109 Миллер, Р. Последовательные и параллельные алгоритмы: Общий подход / Р. Миллер, Л. Боксер. – М.: Изд-во «Бином». – 2006. – 406 с.
- 110 Скиена, С. Руководство по разработке / С. Скиена. – СПб.: Изд-во «БХВ-Петербург». – 2011. – 720 с.
- 111 Кормен, Т. Алгоритмы. Построение и анализ / Т. Кормен, Ч. Лейзерон, Р. Ривест, К. Штайн. – М.: Изд-во «Вильямс». – 2013. – 1296 с.
- 112 Радченко, Г. И. Объектно-ориентированное программирование / Г. И.

Радченко, Е. А. Захаров. – Челябинск: Изд-во «ЮУрГУ». – 2013. – 167 с.

113 Фаулер, М. Основы UML / М. Фаулер. – СПб.: Изд-во «Символ-Плюс». – 2005. – 192 с.

114 Розенберг, Д. Применение объектного моделирования с использованием UML и анализа прецедентов / Д. Розенберг. – М.: Изд-во «ДМК Пресс». – 2002. – 158 с.

115 Смит, Д. Элементарные шаблоны проектирования / Д. Смит. – М.: Изд-во «Вильямс». – 2013 – 304 с.

116 Гамма, Э. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования / Э. Гамма, Р. Хелм, Р. Джонсон, Д. Влиссидес. – СПб.: Изд-во «Питер». – 2009. – 366 с.

117 Тепляков, С. В. Паттерны проектирования на платформе .NET / С. В. Тепляков. – СПб.: Изд-во «Питер». – 2015. – 320 с.

118 Орлов, С. А. Теория и практика языков программирования / С. А. Орлов. – СПб.: Изд-во «Питер». – 2017. – 688 с.

119 Александрова, И. Л. Программирование на языке C# / И. Л. Александрова, Д. Н. Тумаков. – Казань: Изд-во «КГУ». – 2017. – 112 с.

120 Магда, Ю. С. Программирование последовательных интерфейсов / Ю. С. Магда. – СПб.: Изд-во «БХВ-Петербург». – 2009. – 304 с.

121 Фаронов, В. В. Создание приложений с помощью C#: Руководство программиста / В. В. Фаронов. – М.: Изд-во «Эксмо». – 2008. – 576 с.

122 Скит, Д. C# для профессионалов. Тонкости программирования / Д. Скит. – М.: Изд-во «Вильямс». – 2014. – 608 с.

123 Мартин, Р. Принципы, паттерны и методики гибкой разработки на языке C# / Р. Мартин, М. Мартин. – М.: Изд-во «Символ-Плюс». – 2011. – 768 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 индустриальный университет»

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
и инновациям
д.т.н., профессор

М.В. Землянцев

25 февраля 2019 г.

АКТ

о внедрении результатов НИР в учебный процесс

Результаты научно-исследовательской работы АИОС «Алюминщик» по свидетельству о государственной регистрации №2017661402 от 12.10.2017 г., выполненной на кафедре прикладных информационных технологий и программирования аспирантом Е.А. Мартусевичем под руководством к.т.н., доцента В.Н. Буинцева и д.т.н., профессора С.Н. Калашникова в 2019 г. внедрены в учебный процесс на основании решения кафедры (протокол заседания кафедры № 1 от 01.02.2019 г.).

Указанные результаты внедрены в учебный процесс для подготовки студентов, обучающихся по направлениям: 22.03.02 Металлургия (бакалавриат) в дисциплине «Металлургия легких металлов», 09.03.01 Информатика и вычислительная техника (бакалавриат); 09.03.03 Прикладная информатика (бакалавриат) в дисциплине «Моделирование систем», а также могут быть использованы при курсовом проектировании и выполнении выпускных квалификационных работ.

Начальник управления научных исследований,
к.т.н., доцент

Начальник учебно-методического управления,
к.т.н., доцент

Заведующий кафедрой ПИТиП,
к.т.н., доцент



А.И. Куценко



О.Г. Приходько



С.П. Огнев

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

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 Д

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 Е

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