

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС»

На правах рукописи

Куликовский Михаил Андреевич

Модели и алгоритмы автоматизированного управления процессом
кислотного растворения золотосодержащих гранул

Специальность 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор В.Е. Пятецкий

Москва - 2025

Содержание

Введение.....	5
ГЛАВА 1. Анализ технологий и способов моделирования аффинажного производства, а также подходов к управлению химико-технологическими процессами в металлургии	11
1.1 Аффинаж драгоценных металлов.....	11
1.2 Анализ способов растворения золота	18
1.2.1 Царскowodочное растворение	18
1.2.2 Гидрохлорирование	20
1.2.3 Нитрит-процесс	21
1.2.4 Кислотно-кислородный метод.....	22
1.2.5 Сравнительный анализ методов извлечения золота в раствор.....	23
1.3 Моделирование химико-технологических процессов.....	24
1.3.1 Физическое моделирование	24
1.3.2 Математическое моделирование	25
1.3.3 Имитационное моделирование	27
1.3.4 Нейросетевое моделирование	28
1.3.5 Сравнительный анализ представленных методов исследования.....	29
1.4 Существующие подходы к управлению химико-технологическими процессами в металлургии	31
1.4.1 Ручное управление	31
1.4.2 Автоматизированное управление.....	32
1.4.3 Автоматическое управление	35
1.4.4 Сравнительный анализ систем управления по степени автоматизации	36
1.4.5 Обзор концептуальных схем управления химико-технологическими процессами.....	38
1.5 Выводы по главе 1.....	42

ГЛАВА 2. Эмпирический анализ кинетики процессов технологии химического аффинажа золота	44
2.1 Имитационное моделирование процессов	44
2.1.1 Разработка имитационной модели	47
2.1.2 Запуск имитации технологических процессов	49
2.2 Анализ операции растворения золотосодержащих гранул	52
2.3 Кинетика царсководочного выщелачивания золотосодержащих гранул	55
2.3.1 Кинетика царсководочного выщелачивания в зависимости от температуры реакции	56
2.3.2 Кинетика царсководочного выщелачивания в зависимости от скорости вращения реактора	63
2.3.3 Кинетика царсководочного выщелачивания в зависимости от крупности гранул	66
2.3.4 Кинетика царсководочного выщелачивания в зависимости от химического состава сырья	71
2.3.5 Кинетика царсководочного выщелачивания в зависимости от соотношения Т:Ж	78
2.4 Математическое моделирование процесса растворения золота	83
2.5 Выводы по главе 2	88
Глава 3. Разработка нейросетевой модели прогнозирования целевых параметров и определения технологических режимов растворения золотосодержащих гранул	92
3.1 Постановка задачи нейросетевого моделирования	92
3.2 Анализ обучающей выборки	99
3.3 Моделирование архитектуры нейросети	102
3.4 Обучение нейросетевых моделей	103
3.5 Выводы по главе 3	109
Глава 4. Разработка ПО для поддержки принятия решений оператора при управлении технологическими режимами растворения	111
4.1 Решение многокритериальной задачи выбора оптимального	

архитектурного решения	111
4.2 Проектирование микросервисной архитектуры разрабатываемого решения	117
4.3 Описание пользовательских интерфейсов	120
4.4 Разработка схемы автоматизации реактора	126
4.5 Выводы по главе 4.....	128
ГЛАВА 5. Опытно-промышленные испытания по царсководочному выщелачиванию золотосодержащих гранул	130
5.1 Опытно-промышленные испытания выщелачивания золота с применением нейросетевой модели	130
5.2 Имитация технологических процессов с оптимальными режимами растворения.....	134
5.3 Расчет ожидаемого технико-экономического эффекта от внедрения предлагаемой нейросетевой модели царсководочного выщелачивания золотосодержащих гранул.....	137
5.4 Выводы по главе 5.....	146
Заключение	148
Список использованных источников	150
ПРИЛОЖЕНИЕ А	163
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	164
ПРИЛОЖЕНИЕ В	165
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	166
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	167
ПРИЛОЖЕНИЕ Е	168
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж	169

Введение

Актуальность работы

В настоящее время большое значение для промышленных предприятий цветной металлургии приобретает химический метод аффинажа благородных металлов. С использованием современных достижений данный способ очистки золота по сравнению с широко распространенными электролитическими способами дает возможность ускорить технологический цикл очистки металла от примесей и снизить, а в некоторых случаях даже исключить, использование оборотных благородных металлов, стоимость которых на уровне затрат по созданию аффинажного завода.

Но, несмотря на широкое применение данного способа, процессу растворения золотосодержащего сырья требуется модернизация с учетом развития современных информационных технологий, применение которых позволит не только снизить длительность процесса, но и повысить качество получаемого раствора, а также сократить содержание драгоценного металла в нерастворимом осадке, что исключит необходимость в повторном выщелачивании золотосодержащих гранул.

Автоматизация исследуемой технологии растворения благородных металлов с использованием моделей искусственного интеллекта позволит прогнозировать целевые значения результата процесса, что дает основу проактивного управления технологическими операциями, путем настройки системы заблаговременных уведомлений исполнителя об обнаруженных отклонениях параметров от оптимальных режимов и дальнейшего оперативного принятия управленческих решений.

Применение искусственного интеллекта в управлении процессом позволит стабилизировать растворение золота, увеличить производительность труда на производстве и снизить негативное влияния человеческого фактора на результат.

Цель: повышение степени извлечения золота в раствор после первичного выщелачивания Au с использованием автоматизированной системы-советчика оператора на базе нейросетевого ансамбля, прогнозирующего целевые параметры

и режимы процесса.

Задачи:

1. Провести анализ процесса кислотного растворения золотосодержащих гранул; аппаратного устройства технологии выщелачивания; перечня измеряемых параметров и границ их допустимого изменения; факторов, влияющих на качество продукта.

2. Разработать модели прогноза основных измеряемых параметров, обеспечивающие высокую точность предсказания целевых значений результата процесса и способные оперативно реагировать на изменение внешних условий протекания процесса.

3. Разработать алгоритм функционирования подсистемы определения целевых параметров реакции, а именно: массы нерастворимого осадка, содержания золота в нерастворимом осадке и степень извлечения золота в раствор на базе нейросетевого моделирования.

4. Разработать схему автоматизированной системы-советчика управления процессом кислотного растворения золотосодержащих гранул с возможностью индивидуального регулирования технологических режимов на основе ситуационного анализа изменения параметров технологии выщелачивания.

Степень разработанности темы исследования

Решение проблемы извлечения золота в раствор из исходного сырья приведено в работах институтов и учреждений, среди которых Иркутский национальный исследовательский технический университет, ОАО «Иргиредмет», Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», институт химии им. В.И. Никитина Академии наук Республики Таджикистан, Государственный университет цветных металлов и золота, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС». Трудами многих ученых, среди которых Л.С. Стрижко, Карпухин А.И., Жмурова В.В., Жуков В.В., Холов Х.И., Ковалев Н.В., Горенский Б.М., созданы кинетические и математические модели, определяющие оптимальные технологические режимы выщелачивания благородного металла.

Однако для удовлетворения растущих потребностей рынка в части объема извлечения и чистоты благородного металла существующему подходу к организации кислотного растворения золотосодержащего сырья требуется модернизации с учетом использования современных достижений в области информационных технологий.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования рассматривается технологический процесс кислотного растворения золотосодержащих гранул, образцы которых используются в АО "Московский завод по обработке специальных сплавов". Замеры фракции хлорида серебра были выполнены на анализаторе размера частиц BPSA-6100D (Biobase, Китай). Количество золота, перешедшего в царскородочный раствор, определяли в отбираемых пробах атомно-абсорбционным методом. Фиксирование температуры раствора осуществлялось с использованием термостойкого лабораторного термометра ТЛС-2 (ООО «Медремкомплект», Россия). Моделирование нейронных сетей и их обучение проводились с использованием высокоуровневой библиотеки Keras на языке Python.

Достоверность и обоснованность подтверждаются использованием современного профильного оборудования, в том числе: средств измерений, базовых концепций нейросетевого моделирования, а также методов химического анализа и статистической обработки большого количества экспериментальных данных; сходимостью результатов лабораторного моделирования с практическими результатами опытно–промышленных испытаний.

Научная новизна работы

1. Построена оригинальная прогнозная модель, отличающаяся использованием ансамбля нейросетей, которая позволяет прогнозировать извлечение золота в раствор (%), объем нерастворимого осадка (кг) и содержание в нем золота (%), определять технологические режимы выщелачивания золота в зависимости от исходной массы (кг), химического состава (%) и крупности (мм) лигатурного сырья, а именно: Т:Ж, температуру процесса (°C), скорость вращения реактора (об/мин), продолжительность растворения (ч), скорость подачи реагентов,

концентрацию газа и обладает способностью к оперативной адаптации под меняющиеся условия технологии кислотного растворения гранул на основе экспериментальных данных с целью преимущественного извлечения золота в раствор.

2. Разработана структурная схема и алгоритм функционирования автоматизированной системы управления технологией растворения золотосодержащих гранул, отличающийся индивидуальным регулированием технологических параметров, на основе нейросетевого прогнозирования целевых режимов процесса и контроля отклонений показателей реакции от требуемых значений в реальном времени.

Практическая значимость работы

Применение разработанной автоматизированной системы-советчика оператора при управлении процессом кислотного растворения золотосодержащих гранул на предприятии АО "Московский завод по обработке специальных сплавов» обеспечило извлечение золота в раствор на уровне 98,85 – 99,15%, что в среднем на 6% лучше диапазона 91 – 95%, зафиксированного в момент начала исследования, при этом выход нерастворимого осадка составил 0,17 – 0,53%, а хлорида серебра 2,28 – 3,15% от веса лигатурного золота, взятого на растворение. Содержание золота в нерастворимом осадке зафиксировано на уровне 0,05 – 1,29 %. Размер фракций хлорида серебра составил 600 – 700 мкм.

Данные показатели достигнуты при растворении лигатурного золота весом 59,15 – 65,13 кг при содержании основных компонентов: Au (75,13 – 90,12%), Ag (5,21 – 15,67%), Cu (4,13 – 10,35 %) и крупности гранул, мм: длина - 10 ± 2 ; ширина - $8 \pm 2,5$; толщина – $1,2 \pm 0,7$ в условиях соблюдения режимов: Т:Ж = 1:5, Т = 80°C, скорость вращения реактора = 20 об\мин, объем деионизированной воды = 0,5 от объема царской водки, t = 5,2 ч.

На защиту выносятся:

1. Алгоритм прогнозирования целевых параметров процесса кислотного растворения золотосодержащих гранул, а именно массы нерастворимого осадка,

содержание в нем золота и степень извлечения золота в раствор, а также определения технологических режимов, использующий оригинальную нейросетевую модель, которая обеспечивает возможность оперативной адаптации под меняющиеся условия технологии на основе экспериментальных данных в режиме реального времени.

2. Структура функционирования автоматизированной системы управления процессом кислотного растворения золотосодержащих гранул, обеспечивающая получение информации об изменении параметров технологии выщелачивания в режиме реального времени и поддержку принятия ситуационного управленческого решения.

Апробация работы

Основные положения и результаты работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: XLIX и L «Гагаринские чтения» МАИ (Россия, Москва, 2023 -2024 гг.), XIV Всероссийское совещание по проблемам управления ИПУ РАН (Россия, Москва, 2024 г.), II Международная научно-практическая конференция «Инновации и информационные технологии в условиях цифровизации экономики» ФГБОУ ВО «ДонГТУ» (Россия, Алчевск, 2024 г.), XVII Международная конференция «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2024) ИПУ РАН (Россия, Москва, 2024 г.), V Международная научная конференция «Геотехнологии, недропользование, рациональное развитие минерально-сырьевого комплекса и охрана окружающей среды» (Россия, Красноярск, 2025 г.).

Публикации

По теме диссертационной работы имеется 8 публикаций, в том числе 1 статья в журнале, входящим в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ 2 квартиля, 2 статьи в международных рецензируемых базах данных Scopus и WoS (Q4), 5 публикаций по материалам российских и международных конференций, входящих в базу данных РИНЦ, 6 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ. Всего – 14 научных работ.

Личный вклад автора заключается в анализе существующих способов растворения золотосодержащего сырья, постановке задач исследования,

организации и проведении исследований каждого этапа работы, подборе оптимальных технологических режимов, оценке значимости влияния технологических параметров на результат растворения золотосодержащих гранул методом построения нейронной сети, проведении опытно-промышленных испытаний кислотного выщелачивания с предложенными режимами, анализе и сопоставлении результатов моделирования с экспериментальными данными, обработке полученных результатов, формулировке выводов и рекомендаций, предложении оптимальных технологических режимов выщелачивания золота из золотосодержащих гранул АО «Московский завод по обработке специальных сплавов», оценка экономической эффективности предлагаемых режимов.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 90 библиографических источников и 7 приложений. Работа изложена на 169 страницах машинописного текста, включая 58 рисунков и 54 таблиц.

ГЛАВА 1. Анализ технологий и способов моделирования аффинажного производства, а также подходов к управлению химико-технологическими процессами в металлургии

1.1 Аффинаж драгоценных металлов

С развитием современных технологий и появлением новых отраслей промышленности, требования к чистоте благородных металлов постоянно возрастают. Ведь именно чистота оказывает прямое влияние на свойства металлов и возможность их использования в различных сферах деятельности, таких как электронная, авиационная, космическая, оборонная и многие другие.

Аффинаж является важным процессом в цветной металлургической промышленности. Он позволяет очистить благородные металлы от примесей, таких как кремний, свинец, мышьяк и других элементов, которые могут присутствовать в исходном сырье [1].

Сырье для аффинажных заводов включает в себя различные материалы, содержащие золото и другие драгоценные металлы. Основные виды сырья, используемого на аффинажных заводах, включают:

- золотосодержащие руды - руды, содержащие золото в виде мелких частиц или связанного с другими минералами. Обычно требуется предварительная переработка (например, дробление, обогащение) для дальнейшего извлечения.
- отходы горнодобывающей промышленности, такие как концентраты, полученные в процессе обогащения руд, отвалы и хвосты, оставшиеся после обработки руд.
- золотые сплавы - сплавы, содержащие золото и другие металлы, такие как серебро, медь, платина и др. Используются в ювелирной промышленности и могут содержать до 24 каратов золота.
- золотой лом - использованные ювелирные изделия, электроника и другие изделия, содержащие золото. Исходное сырье может включать старые украшения, монеты, платы и так далее.

– сырьё из переработки - материалы, полученные из вторичной переработки, включая отходы производства, которые могут содержать драгоценные металлы.

– золотосодержащие электроника и устройства - платы и компоненты, содержащие золото, которые используются в производстве электроники, таких как мобильные телефоны, компьютеры и другие устройства [2].

В настоящий момент известно несколько методов аффинажа золота. Наибольшее распространение среди них получили следующие: хлорный, электролитический и химический.

Современное аффинажное производство золота характеризуется высоким уровнем применения электролиза (88 % заводов) и внедрением жидкостной экстракции (12 %). В качестве стандартных операций в технологии аффинажа используют процесс Миллера (40 %), гидрохлорирование (54 %), кислотный аффинаж (46 %) и купелирование (22 %) [3].

История возникновения основных методов аффинажа золота представлена в таблице 1 [3].

Таблица 1. Хронология возникновения методов аффинажа золота

Метод	Начало применения, год
Разделение Au и Ag при обжиге с: • солью (NaCl) • серой • сульфидом мышьяка • селитрой серой и железом	100 до н.э. 1150...1200 1300...1400 1556 1738
Купелирование	1400 до н.э.
Кислотный аффинаж	1400...1600
Высокотемпературная хлоринация (процесс Миллера)	1867

Выбор конкретного способа аффинажа зависит от множества факторов, которые могут варьироваться в разных ситуациях и для разных материалов, таких как качество исходного сырья, объем примесей, инфраструктура предприятия, экологические требования и финансовые затраты [4].

Хлорный метод аффинажа золота — это процесс очистки золота, который

основан на растворении примесей при помощи хлора. Принцип работы данного подхода следующий:

1. Подготовка: исходное золото, содержащее различные примеси (например, серебро, медь, свинец), сначала измельчается и подготавливается для обработки.

2. Растворение: золото помещается в специальную печь с газообразным хлором. Хлор реагирует с примесями, образуя летучие хлориды, которые можно легко удалить.

3. Отделение золота: чистое золото остается в твердом состоянии, так как оно не реагирует с хлором. После завершения реакции золото отделяется от раствора.

4. Постобработка: полученное золото может быть дополнительно очищено и переработано в слитки или другие формы.

Преимущество данного подхода заключается в достижении высокой степени очистки золота и эффективностью воздействия в отношении различных примесей. Однако хлорный способ подразумевает использование токсичных веществ, требует специальных условий для проведения процесса и может быть более дорогим по сравнению с другими методами аффинажа [5].

Хлорный метод аффинажа золота применяется в основном в промышленности и позволяет получать золото высокой чистоты. Однако из-за своей сложности и необходимости соблюдения мер безопасности, он используется реже, чем некоторые другие методы аффинажа.

Электролитический метод — это один из наиболее распространённых и эффективных способов очистки драгоценных металлов, таких как золото, серебро, платина и медь. Этот метод основан на использовании электрического тока для разделения и очищения металлов от примесей [6].

Принцип работы следующий: создаётся электролитический раствор, который обычно состоит из соли очищаемого металла (например, хлорида золота или сульфата серебра) и растворителя. Этот раствор должен быть хорошим проводником электричества.

Процесс проходит в специальной установке — электролитической ячейке, которая состоит из анода (положительный электрод) и катода (отрицательный электрод). На аноде размещаются примеси и загрязнения, а на катоде — чистый металл.

В момент, когда через ячейку пропускается электрический ток, ионы металла из раствора начинают перемещаться к катоду, где они восстанавливаются и осаждаются в виде чистого металла. На аноде происходят окислительные реакции, в результате которых примеси могут растворяться или образовывать нерастворимые соединения.

После завершения процесса осадка чистого металла его собирают с катода, а на аноде очищенные примеси могут быть удалены или переработаны [6].

Среди преимуществ электролитического метода отмечается высокая степень очистки. Метод позволяет достигать высокой чистоты драгоценных металлов (до 99,99%). При правильной организации процесса можно значительно снизить затраты на переработку. Подходит для аффинажа различных металлов, включая золото, серебро, медь и платину.

Применение данного подхода требует наличие специализированного оборудования. Для выполнения процесса требуются специальные установки, которые могут быть дорогими в приобретении и обслуживании [7].

Необходимо точно контролировать параметры, такие как напряжение и плотность тока, чтобы избежать образования нежелательных побочных продуктов.

Электролитический метод широко используется в ювелирной промышленности, в производстве электроники, а также в металлургии для очистки вторичных ресурсов, таких как отходы производства или переработанные материалы. Данный подход является важным инструментом в сфере обработки и очистки драгоценных металлов, обеспечивая высокую эффективность и качество конечного продукта [6,7].

В последнее время большое значение для промышленных предприятий цветной металлургии приобретают химические методы аффинажа, которые не так давно рассматривались, как бесперспективные. Применяя в производстве

технологические достижения, такие как предварительное опробование, разбавление раствора водой, подогрев кислот, химические методы аффинажа золота по сравнению с широко распространенными электролитическими способами дают возможность ускорить технологический цикл очистки металла от примесей и снизить, а в некоторых случаях даже исключить, использование оборотных благородных металлов, стоимость которых на уровне затрат по созданию аффинажного завода [1,8].

Кислотные методы аффинажа — это процессы очистки драгоценных металлов, основанные на использовании кислот для растворения примесей и выделения чистых металлов. Кислоты используются для растворения металлов в их солях или других формах. Например, для аффинажа золота часто применяется царская водка (смесь соляной и азотной кислот), которая эффективно растворяет золото, оставляя за собой многие примеси. После растворения золота в кислоте из полученного раствора можно выделить чистый металл различными способами, такими как осаждение с помощью восстановителей (например, сульфит натрия) или выпаривание. Полученные растворы могут содержать ионы различных металлов, поэтому часто необходимо дополнительно очищать их с использованием методов, таких как осаждение, фильтрация или экстракция.

Кислотные методы могут достигать высокой степени очистки, позволяя получать металлы высокой пробы. Эти методы подходят для аффинажа различных драгоценных металлов и их сплавов [8].

Среди недостатков стоит отметить, что работа с кислотами требует жестких регламентов и соблюдения строгих мер безопасности, так как кислоты могут быть коррозионными и токсичными. Процессы могут генерировать вредные отходы, которые требуют специальной обработки и утилизации.

Необходимость контроля условий реакций и чистоты конечного продукта может усложнить процесс. Химические методы аффинажа являются важными инструментами в металлургии и ювелирном производстве. Они позволяют эффективно очищать драгоценные металлы от примесей, однако требуют аккуратности и соблюдения мер безопасности [9].

Актуальность химического метода аффинажа рассмотрена А.И. Карпухиным в книге «Кислотно-солевой аффинаж золота и серебра». Автор подчеркивает перспективность использования данной технологии за счет снижения количества золота в незавершенном производстве и существенного уменьшения количества используемого оборотного металла. Так же автор приводит усовершенствованную технологическую схему кислотного аффинажа и ее апробацию на Колымском аффинажном заводе [10].

При исследовании химического аффинажа авторы применили современные методы анализа процессов, такие как математическое [11,12] и имитационное моделирование [35] с целью выявления проблемных мест технологии. Использование таких подходов сокращает необходимость проведения дорогостоящих и длительных испытаний на реальном объекте. Над процессом, представленным в виде системы уравнений или виртуальной модели, есть возможность проводить эксперименты, в рамках которых варьировать технологические режимы или вносить изменения в структуру технологии, оценивая их влияние на конечный результат без вмешательства в непрерывное производство, остановка которого критична для работы предприятия.

Исследование процесса химического аффинажа золота получило свое продолжение в диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Жмуровой В.В. в части оптимизации кислотного выщелачивания цветных металлов из золотосодержащих катодных осадков. Автор оценивает влияние параметров (концентрация растворителя, температуру процесса) азотнокислого выщелачивания благородных металлов из катодных осадков, получаемых при переработке сложного по химическому составу золотосодержащего сырья, для получения сплава драгоценных металлов с минимальным содержанием примесей. Математический аппарат применяется автором для оценки термодинамической вероятности взаимодействия компонентов катодных осадков с различными растворителями [11]. Программный комплекс «Селектор» дает достаточно высокую точность в оценке, оперируя тремя факторами: содержание металла в растворе, концентрация растворителя и кислотность раствора.

Применение математического аппарата в ходе выщелачивания золота описывается Жуковым В.В. в диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «Моделирование и управление процессом выщелачивания золота в каскаде реакторов». Результаты, приводимые автором, подтверждают эффективность применения программного комплекса для разработки математических моделей технологического процесса [12]. Однако при детализированном описании объекта исследования растет количество неопределённых параметров модели, что приводит к снижению достоверности прогнозных данных.

В рамках исследования проблемы повышения извлечения золота из исходного сырья в раствор авторы работы [90] предлагают к применению гидроакустический излучатель, повышающий концентрацию растворённого кислорода счёт диспергирования воздуха на мельчайшие пузырьки. Однако данный подход применим лишь к растворам щелочной среды, рН которых 9,3–10. Царсководочное выщелачивание золота реализуется в кислой среде $\text{pH} < 7$.

Имитационная модель, использованная авторами в исследовании [35], позволила установить факт временных отклонений поступления полупродукта на обработку и согласовать длительность выполнения отдельных операций технологического процесса. Установленные причины сбоя в динамике процесса связаны с существующей организацией технологии, при которой сотрудник определяет технологические режимы, исходя из стехиометрических вычислений, не учитывающих особенностей исходного сырья, а также реальные условия протекания технологических процессов и возможностей производства. Такой подход приводит к низкому извлечению золота в раствор при первичном выщелачивании, росту объема нерастворимого осадка и высокому проценту брака золотого порошка на этапе осаждения.

Результаты исследований [42] по использованию нейросетевого подхода к оценке значимости технологических параметров на результат кислотного аффинажа благородных металлов показывают точность прогноза в районе 95%, что подтверждает перспективность использования нейронных моделей для прогноза

целевых параметров процесса и оптимальных режимов их достижения.

Для контроля спрогнозированных нейросетью значений в ходе выполнения реакций необходимо использовать автоматизированную систему оперативного уведомления сотрудника о необходимости внесения корректировок в текущие технологические режимы. При таком подходе автоматизация позволит поддерживать оптимальные режимы в заданном интервале, увеличить производительность труда на производстве и снизить влияние человеческого фактора на результат процесса [75].

Физическое моделирование аффинажа позволяет перейти от крупногабаритных аппаратов, задействованных в технологической цепочке операций, к уменьшенной версии лабораторных моделей, спроектированных подобно производственным оригиналам, но с конструктивными упрощениями, не влияющими на производительность и качество выпускаемого продукта [28]. Такие установки активно используются в ходе опытно-промышленных испытаний инновационных подходов к решению [78].

1.2 Анализ способов растворения золота

В настоящее время, когда требования к качеству аффинированного золота постоянно повышаются, а возможности применяемых способов (электролиза и процесса Миллера) ограничены, активно ведутся исследования по применению кислотных методов в аффинаже, но на более высоком уровне и с учетом современных достижений [13].

С целью технологической оценки химических методов аффинажа в институте "Иргиредмет" для шлихового и катодного золота комбината «Алданзолото» проведены исследования по выщелачиванию золота царской водкой, гидрохлорированием, "нитрит-процессом" и кислотно-кислородным методом [1].

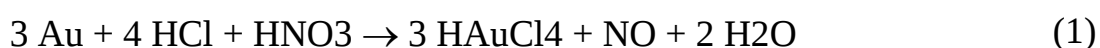
1.2.1 Царсководочное растворение

Выщелачивание золота с использованием царсководочного раствора — это

процесс, который применяется для извлечения золота из руды или других материалов, содержащих драгоценный металл. Царскородочный раствор представляет собой смесь соляной (HCl) и азотной (HNO₃) кислот, которая обладает уникальной способностью растворять золото.

Процесс выщелачивания при таком методе сводится к следующему: исходный материал (руда или сплав) должен быть подготовлен: его дробят, измельчают и очищают от крупных примесей [14].

Царскородочный раствор готовится в определенной пропорции. Обычно используется 3 части HCl и 1 часть HNO₃, однако это может варьироваться в зависимости от конкретных условий и требуемой концентрации. Подготовленный материал помещается в реакционную емкость, где добавляется царскородочный раствор. В результате происходит химическая реакция, в ходе которой золото растворяется, образуя хлорауровую кислоту (HAuCl₄) (1):



После завершения реакции полученный раствор фильтруется для удаления нерастворимых остатков и примесей. Это позволяет получить чистый раствор хлораурата. Из раствора можно выделить золото, добавляя восстановители, такие как сульфит натрия (Na₂S₂O₅) или другие реагенты, которые восстанавливают золото из хлораурата (2):



Осажденное золото промывается водой для удаления остатков реагентов и затем сушится [14].

Как показывают исследования [15,16] работая с царскородочным раствором, необходимо соблюдать строгие меры безопасности, так как как соляная, так и азотная кислоты являются коррозионными и токсичными. Генерация газов, таких как оксиды азота, требует работы в хорошо проветриваемом помещении или под вытяжкой, а утилизация отходов также должна проводиться с соблюдением экологических норм.

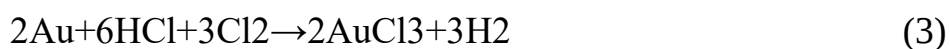
Выщелачивание золота с помощью царскородочного раствора — это

эффективный метод, позволяющий извлекать золото из различных источников. Однако исследование [17] подчеркивает, что процесс требует высокой квалификации и строгого соблюдения мер безопасности для минимизации рисков.

1.2.2 Гидрохлорирование

Гидрохлорирование золота — это процесс, при котором золото подвергается воздействию хлора в присутствии воды или водных растворов соляной кислоты (HCl). Этот метод используется для извлечения золота из руды или других материалов, содержащих этот металл.

Исходный материал, содержащий золото, дробится и измельчается до состояния порошка, чтобы увеличить площадь контакта с реагентами. В качестве реакционного агента используется раствор соляной кислоты, который может быть разбавлен водой. В процессе гидрохлорирования золото реагирует с хлором в присутствии соляной кислоты. Это приводит к образованию хлораурата (AuCl_3), который хорошо растворим в растворе (3):



В этом уравнении (3) золото (Au) реагирует с хлором (Cl_2), образуя хлорауровый комплекс. После завершения реакции раствор фильтруется для удаления нерастворимых остатков. Полученный раствор содержит хлорауровые ионы. Золото можно выделить из раствора путем добавления восстановителей, таких как сульфит натрия или другие химические вещества, которые восстанавливают золото к его металлической форме. Осажденное золото промывается для удаления остатков реагентов и затем сушится [18].

Исследование [19] показало, что применение данного метода позволяет достичь высокой эффективности в извлечении золота, а также дает возможность обработки различных типов руд и концентратов.

Однако использование токсичных веществ, таких как хлор и соляная кислота, требует строгих мер безопасности. Гидрохлорирование золотосодержащего сырья сопровождается выделением вредных побочных продуктов, что требует осторожной утилизации. Авторы патента [20] обращают внимание, что несмотря

на его эффективность, процесс требует внимательного обращения с химическими реагентами и соблюдения мер безопасности.

1.2.3 Нитрит-процесс

Нитрит-процесс выщелачивания золота — это метод извлечения золота из руд и концентратов, который основан на использовании нитритов в качестве реагентов. Этот процесс стал интересен благодаря своей способности извлекать золото с высокой эффективностью, а также благодаря относительной безопасности по сравнению с традиционными методами, такими как цианидное выщелачивание.

Нитриты (например, натрий-нитрит, NaNO_2) действуют как окислители, которые способны связываться с золотом и образовывать растворимые комплексы. В процессе выщелачивания золото переходит в раствор, что позволяет его выделить. Исходный материал (руда или концентрат с содержанием золота) измельчается и смешивается с раствором нитрита. Обычно используется также кислота (например, соляная), чтобы создать оптимальные условия для реакции. В результате химической реакции золото окисляется и образует растворимый комплекс, который затем можно отделить от нерастворимых остатков [21].

Авторы патента [22] выделяют преимущества применения данного метода: нитриты менее токсичны по сравнению с цианидом, что делает процесс более безопасным для работников и окружающей среды. Нитрит-процесс может быть эффективен для извлечения золота из сложных руд, которые могут быть труднодоступны для других методов.

Как и в любом процессе выщелачивания, необходимо учитывать утилизацию отходов, образующихся в ходе реакции. Исследование [22] подчеркивает, что процесс требует соблюдения определенных температурных и кислотных условий для достижения максимальной эффективности. Обычно используется контролируемая температура и время реакции.

Таким образом, нитрит-процесс выщелачивания золота представляет собой перспективный метод извлечения благородных металлов из руд и концентратов. Благодаря своей относительной безопасности и эффективности, он может стать

альтернативой более традиционным методам, таким как цианидное выщелачивание, особенно в случаях, когда безопасность и экологические аспекты имеют первостепенное значение [22].

1.2.4 Кислотно-кислородный метод

Кислотно-кислородный метод выщелачивания золота — это технология, основанная на использовании кислоты и кислорода для извлечения золота из руд и концентратов. Этот метод чаще всего применяется для обработки сложных руд, содержащих золото в связке с другими минералами, которые затрудняют его извлечение [23].

Исследование [24] основано на окислении золотосодержащих минералов в кислой среде с использованием кислорода (обычно атмосферного) для повышения растворимости золота. В процессе выделяются ионы золота, которые переходят в раствор. Исходный материал (руда) измельчается и обрабатывается в кислой среде (например, с использованием серной кислоты или хлороводородной кислоты). В процессе добавляется кислород, который способствует окислению и повышает эффективность выщелачивания. Золото, находящееся в минералах, переходит в раствор в виде ионов золота (Au^{3+}), что позволяет его затем извлекать.

Метод подходит для извлечения золота из руд, которые трудно поддаются традиционным методам, таким как цианидирование [24].

Авторы патента [25] обращают внимание, что окислительные реакции протекают быстрее в кислой среде с добавлением кислорода, что позволяет сократить время процесса. В некоторых случаях метод может требовать меньших затрат на реагенты по сравнению с другими процессами.

Однако использование кислот может приводить к коррозии оборудования, что требует применения устойчивых к коррозии материалов. Образующиеся в процессе отходы должны быть правильно утилизированы, чтобы избежать загрязнения окружающей среды. Необходимость в обеспечении кислородом может увеличивать операционные затраты [25].

Кислотно-кислородный метод применяется в промышленности, особенно

при обработке сложных руд, содержащих сернистые минералы или другие соединения, которые могут затруднять извлечение золота. Таким образом, несмотря на свои недостатки, данный подход может обеспечить высокий уровень извлечения золота и является важным инструментом в современных технологиях переработки полезных ископаемых.

1.2.5 Сравнительный анализ методов извлечения золота в раствор

Основные результаты исследования [1] по выщелачиванию катодных осадков и шлихового золота царской водкой, гидрохлорированием, "нитрит-процессом" и кислотно-кислородным методом представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты исследования по выщелачиванию золотосодержащих продуктов

Исходный продукт	Метод выщелачивания	Условия выщелачивания			Извлечение золота в раствор, %
		Отношение Т:Ж	Температура, °С	Продолжительность, ч	
Катодный осадок (Au-89,62 %, Ag - 6,27 %)	царсководочное (HCl:HNO ₃ , =3:1)	1:3	60	2,5	97,1
	царсководочное (HCl:HNO ₃ , =3:1)	1:3	60	5,0	99,9
	гидрохлорирование (HCl-6M, VCl ₂ =40 мл/мин)	1:5	90	5	54,8
	«нитрат-процесс» (HCl-6M, NaNO ₂ - 0,1M)	1:5	90	5	28,0
	кислотно-кислородное (HCl: HNO ₃ =20:1, HCl – 12M)	1:3	80	2	87,6
	кислотно-кислородное (HCl: HNO ₃ =20:1, HCl– 12M)	1:5	80	5	98,4
Шлиховое золото (Au-83,31 %, Ag- 10,34 %)	царсководочное (HCl: HNO ₃ = 3:1)	1:3	80	5	86,4
	двойное царсководочное (HCl: HNO ₃ ,=3:1)	1:5	80	5	94,8

	гидрохлорирован ие (HCl-6M, VCl ₂ = 40 мл/мин)	1:5	90	5	48,3
	царскородочное, после окислительного обжига (HCl: HNO ₃ , =3:1)	1:5	80	5	95,5

По извлечению золота в раствор более эффективным методом является царскородочное, т.е. кислотное выщелачивание. Для катодного осадка извлечение золота составило 99,9 %, для шлихового золота - только 86,4 % за одну стадию выщелачивания и 94,8 % - за две стадии.

В целом химические технологии аффинажа золота по сравнению с вышеописанными являются более перспективными за счет снижения количества золота в незавершенном производстве и существенного уменьшения количества используемого оборотного золота [16,17].

1.3 Моделирование химико-технологических процессов

Наиболее распространенными методами исследования химико-технологических процессов являются физическое, математическое, имитационное и нейросетевое моделирование. Хотя в основе имитационного и нейросетевого моделирования лежит математическая база, их реализация стала возможной только с появлением электронно-вычислительных машин, потому их часто выделяют отдельно [26,27].

1.3.1 Физическое моделирование

Физическое моделирование химико-технологических процессов – это экспериментальный метод исследования, при котором реальный процесс воспроизводится на физической модели, воспроизводящей наиболее важный комплекс свойств и параметров, изучаемых явлений, с целью получения результатов, применимых к реальному процессу [28, 31].

В основе данного метода лежит теория подобия, которая устанавливает

критерии, при которых поведение процесса на модели будет соответствовать поведению процесса в оригинале. Для обеспечения подобия используют критерии подобия – безразмерные величины, значения которых должны быть одинаковыми для модели и оригинала. Авторы статьи [29] считают, что ключевым этапом является составлением критериальных уравнений для масштабирования результатов на реальный процесс.

В работе [30] отмечается, что при исследовании сложных химико-технологических процессов возникает проблема формирования большого набора критериев подобия, которые зачастую оказываются несовместимыми для одновременного удовлетворения. Для преодоления данной трудности применяется поэтапное моделирование, заключающееся в последовательном воспроизведении процесса с постепенным увеличением масштаба.

Применение метода физического моделирования в производстве предполагает выведение общего вида критериального уравнения, отражающего физические закономерности исследуемого явления. А затем экспериментального определения коэффициента пропорциональности и показателей степеней при критериях подобия [31].

1.3.2 Математическое моделирование

В рамках данного метода исследования реальный процесс описывается при помощи математических уравнений, устанавливающих количественные зависимости между рассматриваемыми величинами [29 – 31].

Моделирование включает параметрическую оптимизацию посредством алгоритмических расчетов. На этом этапе варьируются ключевые параметры модели с целью определения оптимальных условий, обеспечивающих достижение наивысших показателей эффективности химико-технологического процесса. Под эффективностью в данном контексте понимается максимизация выхода целевого продукта, селективности, степеней превращения сырья, а также эффективности использования энергии и других ресурсов [30,31].

Последние исследования [30,31] показывают, что неотъемлемой частью

процесса моделирования является оценка точности модели. Она заключается в сравнении результатов, полученных на модели, с экспериментальными данными, полученными в производственных условиях. Экспериментальная проверка проводится при оптимальных параметрах, определенных на этапе моделирования. В случае существенных расхождений между модельными и экспериментальными данными, в модель вносятся необходимые корректировки, и процесс оптимизации повторяется до достижения приемлемой точности соответствия.

В работе [87] автор использует математическую модель для анализа взаимосвязи между входными и выходными параметрами процесса и определением оптимальных значений технологических параметров ацетил-тиомочевинного выщелачивания золота из хвостов флотации при различных температурах. В результате сравнения расчетов по программе и экспериментальных данных автор доказывает, что математическая модель адекватно описывает реальный процесс. Однако стоит заметить, что прогноз извлечения золота, выполняемый в модели, опирается только на 3 параметра: температуру процесса, кислотность раствора и продолжительность реакции.

Математическая модель в работе [88] применяется для определения температурного режима подогрева выщелачивающего раствора и рациональной геометрии рудного штабеля при ограничениях, наложенных на степень извлечения золота и продолжительность процесса кучного выщелачивания. Однако данную модель невозможно адаптировать под условия царсководочного растворения ввиду разной природы используемых методик.

Оптимизация даже одного параметра в рамках химико-технологического процесса требует решения множества математических уравнений, что обусловлено сложной функциональной связью различных параметров. Формализация этих взаимосвязей приводит к созданию громоздких систем дифференциальных уравнений, решение которых, даже с использованием современных вычислительных мощностей, требует значительных финансовых и временных затрат [31].

Авторы статьи [32] подчеркивают, что по этой причине часто проводится

оценка степени влияния параметров на результат с целью устранения из математической модели переменных, оказывающих незначительное воздействие на целевые показатели. Однако, подобное упрощение неизбежно приводит к снижению качества получаемых результатов, тем самым нивелируя ключевое преимущество метода – высокую точность.

1.3.3 Имитационное моделирование

Имитационное моделирование позволяет создать виртуальную модель процесса, которая имитирует его выполнение в реальном времени. Полученная модель позволяет проводить эксперименты, в которых изменяются технологические режимы или вносятся изменения в структуру процесса, чтобы оценить их влияние на конечный результат [33].

Модель технологии позволяет спрогнозировать результаты, что помогает в принятии обоснованных управленческих решений на производстве. Полученная модель процесса даст возможность определить оптимальные параметры технологического процесса, такие как распределение ресурсов, порядок выполнения операций, контроль температурного режима, момент добавления реактива и другие факторы, которые могут повлиять на конечный результат [34,35].

Исследования [34,35] показывают, что имитация процессов сокращает необходимость проведения дорогостоящих и времязатратных испытаний на реальном объекте.

Компьютерный тренажер, разработанный в исследовании [89], работает на основе имитационной модели в режиме обучения, исследования и автоматическом режиме. В данном случае имитация дает возможность не только исследовать влияние управляющих воздействий на определяющие выходные параметры процесса - температуру хлорирования и окислительно-восстановительный потенциал, но и регистрировать ошибки, допущенные при управлении оператором.

Однако такие модели подвержены воздействию случайных величин и требуют принятия допущений, позволяющих разрешить неопределённости, что может негативно сказываться на достоверности результатов.

Разработка имитационной модели обычно сложнее разработки математических моделей, описывающих стационарные режимы работы объектов. Это связано с тем, что уравнения нестационарных режимов объектов включают в себя обыкновенные и частные производные функций переменных процессов по времени, а соответствующие алгоритмы их решения требуют реализации эффективных методов решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений и систем дифференциальных уравнений в частных производных [34].

Имитационное моделирование позволяет создавать модели, которые имитируют поведение и работу реальных систем, чтобы исследовать их свойства, взаимодействия и результаты различных сценариев. Имитационный подход используется авторами статьи [35] в рамках решения задачи согласования времени выполнения отдельных операций технологического процесса, чтобы сократить возможное время ожидания поступления полупродукта на обработку.

1.3.4 Нейросетевое моделирование

Нейросетевое моделирование химико-технологических процессов – это метод исследования, при котором изучаемая система заменяется на математическую модель, основу которой составляют искусственные нейронные сети различной топологии [36].

Авторы трудов [36,37] показывают, что нейронные сети аппроксимируют неизвестные функции и позволяют найти эмпирические решения дифференциальных уравнений, что даёт возможность вычислить сложные и нелинейные зависимости между параметрами процессов в случае, когда поиск аналитических решений затруднен.

Обученная модель, представленная одной или несколькими нейронными сетями, позволяет моделировать поведение технологического объекта и идентифицировать передаточные функции по различным каналам возмущения и управления, а также может быть непосредственно использована в системах автоматического регулирования координат объекта управления [38].

Переменные, выступающие в роли входных и выходных сигналов нейронной

сети, могут представлять собой исторические экспериментальные данные, получаемые измерением выходных параметров объекта при задании определённых входных, или расчётные данные, отражающие физико-химическую сущность процессов, протекающих в объекте исследования [39-41].

Результаты последних исследований [42] по применению нейросетевого подхода в оценке значимости технологических параметров на результат кислотного аффинажа благородных металлов показывают точность в 95%, что подтверждает перспективность использования нейронных сетей в системе индикации и мониторинга производственных рисков аффинажного производства.

1.3.5 Сравнительный анализ представленных методов исследования

Каждый из рассмотренных выше методов обладает различной спецификой и эффективностью в зависимости от цели и условий применения.

Физическое моделирование основывается на теории подобия, что позволяет наглядно изучать процессы и получать экспериментальные данные, применимые к реальным условиям. Этот метод эффективен для экспериментов, требующих воспроизведения сложных физических закономерностей. Однако создание физических моделей затратно и сложно, особенно при необходимости соблюдения множества критериев подобия. Поэтапное моделирование с постепенным увеличением масштаба может частично решить эту проблему, но требует дополнительных ресурсов и времени [27,28].

Математическое моделирование, напротив, позволяет описывать процессы через математические уравнения, устанавливающие количественные зависимости. Этот метод, в отличие от физического моделирования, не требует материальных затрат на физическое воссоздание процесса, но точность модели сильно зависит от корректности уравнений и учета всех значимых параметров. Упрощение модели для снижения вычислительной сложности может негативно сказаться на точности результатов, что ограничивает его применение [33, 34].

Имитационное моделирование эффективно при анализе временных изменений и нестационарных режимов работы объектов. Однако сложность

разработки алгоритмов решения уравнений динамики и высокие требования к вычислительным ресурсам делают их использование оправданным только для задач, где динамика играет ключевую роль [35,38].

Нейросетевое моделирование основано на использовании искусственных нейронных сетей, что позволяет моделировать сложные нелинейные зависимости и аппроксимировать процессы без необходимости явного задания уравнений. Работа с большими объемами данных без необходимости явного аналитического решения – основное преимущество данного подхода. Именно эта особенность обусловила рост применения нейросетевого моделирования в промышленности, где классические методы моделирования демонстрируют ограничения и высокую стоимость применительно к сложным химико-технологическим процессам. Однако в этом и заключается главный недостаток метода. Точность модели зависит от качества и количества исходных данных, а процесс обучения требует значительных вычислительных ресурсов [40-42].

Сравнительная характеристика методов исследования химико-технологических процессов представлена в таблице 3.

Таблица 3. Сравнительная характеристика методов моделирования

№	Метод	Преимущества	Недостатки
1	Физическое моделирование	Наглядное воспроизведение процессов	Высокие временные и стоимостные затраты, сложность реализации, ограничения по масштабированию
2	Математическое моделирование	Экономичность, возможность оптимизации	Необходимость априорных знаний физико-химических закономерностей, трудности в учете случайных факторов, ограничения при моделировании сложных нелинейных процессов
3	Имитационное	Моделирование	Сложность разработки,

	моделирование	динамики сложных систем, учет стохастических факторов	зависимость результатов от адекватности представления элементов системы, высокие вычислительные требования
4	Нейросетевое моделирование	Аппроксимация нелинейных зависимостей сложных ХТП, адаптация к изменениям	Зависимость точности модели от качества и объема обучающей выборки, необходимость значительных вычислительных мощностей для обучения

Выбор метода моделирования зависит от конкретной задачи и требуемой точности результатов. Комбинация различных методов часто применяется для достижения наилучших результатов в прогнозировании химико-технологических процессов.

1.4 Существующие подходы к управлению химико-технологическими процессами в металлургии

Управление химико-технологическими процессами — это деятельность, направленная на мониторинг, регулирование и оптимизацию параметров технологического процесса с целью обеспечения его стабильности, эффективности и безопасности. Основная цель управления ХТП заключается в достижении заданных параметров конечного продукта при минимальных затратах энергии и сырья, а также в предотвращении аварийных ситуаций [43].

1.4.1 Ручное управление

Ручное управление химико-технологических процессов подразумевает непосредственное участие исполнителей в контроле и регулировании параметров технологического процесса без использования автоматизированных систем. Оператор самостоятельно принимает решения на основе показаний приборов и своего опыта, выполняя необходимые действия для поддержания оптимальных

условий реакции [44].

В химико-технологических процессах ручное управление всё еще находит применение в различных областях, начиная с лабораторных исследований и заканчивая малыми производственными установками и процессами с низкой степенью автоматизации. В лабораторных условиях химии вручную регулируют ключевые параметры, такие как температура, давление и скорость перемешивания реакционных смесей, используя оборудование вроде термостатов, манометров и мешалок. Это позволяет добиться высокой точности и воспроизводимости результатов [45].

В процессах с низкой степенью автоматизации ручное управление становится ключевым способом обеспечения стабильности. В тех случаях, когда автоматизация экономически нецелесообразна или технически сложна, операторы, основываясь на своем опыте и показаниях приборов, поддерживают необходимые условия. Исследования [46] показывают, что основным недостатком данного типа является то, что ручное управление требует высокой квалификации оператора, так как от его действий напрямую зависит стабильность и безопасность процесса.

Отсюда с развитием технологий и стремлением к повышению эффективности производства наблюдается тенденция к переходу от ручного управления к автоматизированным и автоматическим системам, что позволяет минимизировать влияние человеческого фактора и повысить точность контроля процессов [47].

1.4.2 Автоматизированное управление

Автоматизированное управление ХТП представляет собой комплексную систему, обеспечивающую контроль и регулирование ключевых параметров технологического процесса с минимальным участием человека, при этом не исключая его из процесса [48].

Эти системы объединяют широкий спектр технологий, обеспечивающих сбор, анализ и управление процессами на всех этапах технологической цепочки. АСУ ХТП представляют собой многоуровневую иерархическую структуру, состоящую из следующих основных компонентов (таблица 4) [49].

Таблица 4. Описание структуры АСУ ХТП и основные компоненты

Уровень	Компоненты	Функции
Устройства ввода-вывода	Датчики, исполнительные механизмы	Сбор первичной информации о процессе (температура, давление, расход), реализация управляющих воздействий, самодиагностика, первичная обработка данных, взаимодействие с другими устройствами через сети.
Программируемые логические контроллеры (ПЛК)	ПЛК	Управление процессами на уровне производственных установок, работа в реальном времени, автономность при сбоях верхних уровней, высокая надежность.
SCADA-системы	Диспетчеризация, мониторинг, визуализация	Контроль состояния процессов в реальном времени, настройка параметров, реакция на изменения, анализ больших объемов данных, поддержка принятия решений.
MES-системы	Управление производственными процессами	Связь технологических процессов с управлением ресурсами, оперативное планирование, учет и оптимизация операций, интеграция технологических и бизнес-процессов.
ERP-системы	Планирование и управление ресурсами предприятия	Стратегическое планирование, управление финансами, закупками, логистикой и персоналом, повышение эффективности всей производственной системы.

На рисунке 1 представлена структура АСУ ХТП [49].

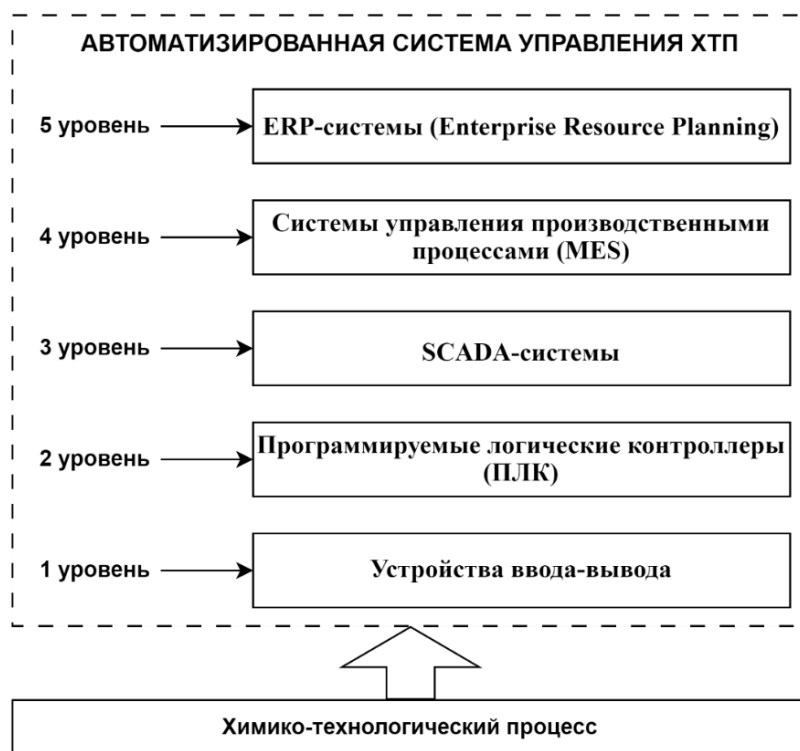


Рисунок 1 - Иерархия АСУ ХТП

АСУ ХТП функционируют как единый механизм, обеспечивая интеграцию технологических, производственных и управленческих процессов. Это позволяет решать широкий спектр задач: от стабилизации ключевых параметров процессов до автоматической диагностики неисправностей и оптимизации ресурсопотребления [49,50].

Результаты внедрения таких автоматизированных систем управления демонстрируют значительные улучшения в производственном процессе:

- Снижение энергозатрат на 15–20% за счёт оптимизации работы мельниц и минимизации их перегрузок.
- Увеличение производительности на 10–12%, что достигается за счёт повышения эффективности работы оборудования и сокращения времени на простои.
- Снижение потерь сырья до 8–10%, благодаря более точной дозировке и предотвращению перерасхода материалов.
- Обеспечение стабильного качества продукции, что позволяет снизить количество возвратов и переделок [51].

Предложенная автором [12] схема АСУ выщелачиванием золота предполагает использование в контуре управления кинетической модели процесса, основная задача которой заключается в определении оптимального объема подпитки реагентами в каждый из реакторов каскада. Математическая модель исследования базируется на 3 основных факторах: концентрация меди в растворе, концентрация тиосульфат иона в растворе и температура в реакторе. Схема структуры управления процессом не может быть адаптирована под кислотное растворение гранул ввиду отсутствия необходимого аппаратного обеспечения.

Однако внедрение АСУ ТП сопровождается и рядом недостатков. Среди них: высокие первоначальные затраты, уязвимость к киберугрозам, сложность обслуживания и необходимость квалифицированного персонала, риск технических сбоев и постоянная потребность в обновлении оборудования и программного обеспечения. Авторы статьи [52] обращают внимание, что эти факторы требуют дополнительных ресурсов и усилий, что может быть затруднительно для малых и средних предприятий.

1.4.3 Автоматическое управление

С развитием автоматизированных систем управления ХТП современное производство все больше сосредотачивается на внедрении автоматических методов управления данной категорией процессов. В основе автоматического управления лежит идея полной автономности. Система собирает данные о текущем состоянии процесса, анализирует их и принимает решения на основе заранее заданных программ или адаптивных алгоритмов. Человек, в данном случае, лишь наблюдает за системой и вмешивается только при необходимости изменения настроек или устранения аварийных ситуаций [53].

Методология проектирования РАСУ включает несколько ключевых этапов. На первом этапе формулируются цели автоматизации, такие как повышение производительности, улучшение качества или обеспечение безопасности. Затем разрабатывается имитационная модель, отражающая реальные условия производства, для тестирования различных сценариев. Далее синтезируется

программное обеспечение, которое координирует работу компонентов РАСУ, включая технологическое оборудование и роботов-лаборантов. Заключительным этапом является определение технического задания и оценка погрешностей модели для обеспечения соответствия системы реальным условиям производства [54].

В трудах [55, 56] авторы отмечают, что в управлении химико-технологическими процессами наблюдается активное развитие применения искусственного интеллекта (ИИ). Выделяются два подхода: нисходящая парадигма, основанная на экспертных системах, семантических сетях и нечетких вычислениях, и восходящая, использующая нейронные сети и методы машинного обучения.

Исследование авторов [57] подчеркивает, что интеграция ИИ в управление ХТП способствует оптимизации ресурсов, снижению энергозатрат и отходов, а также улучшению экологической устойчивости. Это делает производство более эффективным и соответствует глобальному переходу к "зеленым" технологиям, формируя основу для устойчивого управления ХТП.

1.4.4 Сравнительный анализ систем управления по степени автоматизации

Сравнительный анализ подтверждает актуальность каждого типа управления ХТП в зависимости от условий их применения. Ручное управление, благодаря своей гибкости и низким затратам, является целесообразным выбором для небольших процессов, однако его применение ограничивается низкой масштабируемостью и высоким риском ошибок. Автоматизированное управление, напротив, обеспечивает высокую точность и надёжность, что делает его оптимальным решением для крупных производств с высокой степенью стандартизации процессов [58].

Автоматическое управление, минимизируя участие человека и риски, достигает максимальной производственной эффективности, однако его высокая стоимость и сложность внедрения ограничивают использование преимущественно сложными и опасными технологическими процессами. Таким образом, выбор системы управления определяется спецификой задач и масштабом производства

[59]. В таблице 5 представлены обобщенные оценки каждого типа управления по выделенным критериям.

Таблица 5. Сравнительный анализ различных типов управления ХТП

Параметр	Ручное	Автоматизированное	Автоматическое
Участие человека	Высокое	Низкое	Минимальное
Точность и надёжность	Средняя	Высокая	Высокая
Стоимость внедрения	Низкая	Средняя	Высокая
Риск ошибок	Высокий	Низкий	Практически отсутствует
Гибкость	Высокая	Средняя	Ограниченная
Масштабируемость	Низкая	Высокая	Максимальная

Стоит отметить, что цифровизация в области цветной металлургии демонстрирует положительную динамику: 78% ведущих компаний развернули цифровые программы, но 75% инициатив пока остаются в стадии отдельных проектов, а 50% — на уровне пилотных. Это указывает на медленный, но неизбежный переход от традиционного управления химико-технологическими процессами (ХТП) к автоматизированным и затем полностью автоматическим системам [57].

Автоматизированное управление продолжает активно внедряться и:

- позволяет снизить энергозатраты на 10–15%;
- повышает производительность снабжения на 50% и снижает выбросы на 15–30%;
- стабильно занимает около 40% в структуре управления ХТП [58].

Автоматическое управление, основанное на искусственном интеллекте и роботизированных системах, демонстрирует стремительный рост. Его доля увеличивается с 15% до 40% за последнее десятилетие, что подтверждает глобальную тенденцию минимизации влияния человеческого фактора [59].

На рисунке 2 представлено процентное распределение типов управления ХТП в цветной металлургии в России на 2024 год.

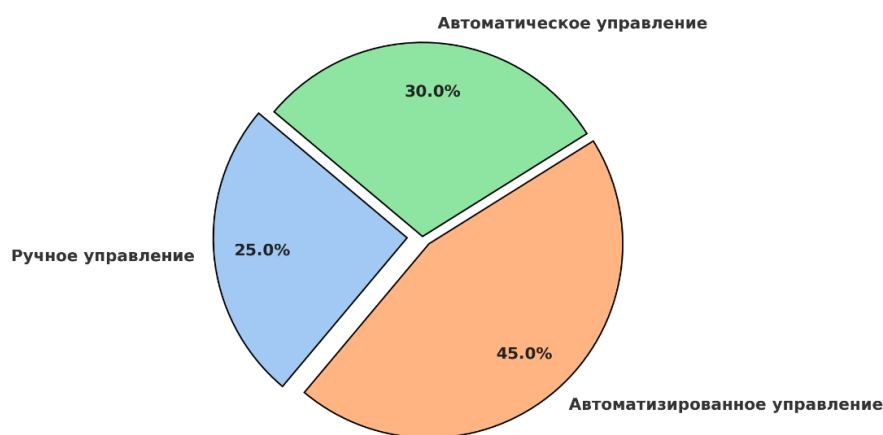


Рисунок 2 - Распределение типов управления ХТП в РФ в 2024 году

Несмотря на 30–40% отставание металлургии от других отраслей по цифровой зрелости, очевидно, что предприятия постепенно переходят от ручного управления к автоматизированному, а затем к полностью автоматическому управлению. Ключевые драйверы этого процесса — развитие ИИ, внедрение цифровых двойников и необходимость повышения эффективности в условиях жесткой конкуренции [59,60].

1.4.5 Обзор концептуальных схем управления химико-технологическими процессами

Существует два основных подхода к управлению рассматриваемыми процессами: проактивный и реактивный. Проактивный подход фокусируется на предвидении проблем и активном формировании желаемого будущего отклика. В реактивном подходе, напротив, реализуется управляющее воздействие по факту уже произошедшего события [61].

Реактивный подход является одним из подходов к управлению химико-технологическими процессами, который основан на применении мер контроля и управления при наличии параметров, вышедших за пределы нормы. Такой подход позволяет реагировать на происходящие события, адаптироваться к переменам и смягчать их последствия. При данном подходе руководители фокусируются на решении уже возникших проблем, а не на их предотвращении.

Авторы труда [61] обращают внимание, что реактивное управление следует

отличать от запоздалого реагирования со стороны руководства компании. Этот принцип актуален для бизнес-процессов, где необходим упреждающий, а не адаптивный подход. Триггером для принятия решения при реактивном подходе является отклонение, проблема, требующая вмешательства менеджмента предприятия [62]. Схема реактивного подхода к управлению представлена на рисунке 3.

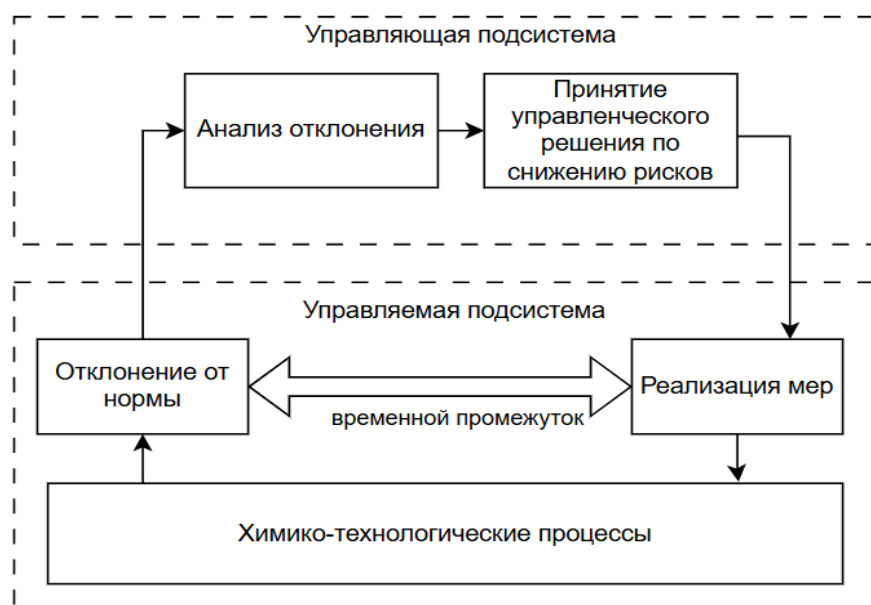


Рисунок 3 - Схема реактивного подхода к управлению

Для химико-технологических процессов отклонения могут быть получены, как из системы мониторинга процессов, при ее наличии, так и без нее. Важно, что для получения более точной информации об отклонении требуется предпринять меры по ее получению, так как только наличие полной информации может способствовать эффективному управленческому решению [63].

После принятия управленческого решения следует реализация мер, которая позволяет скорректировать, минимизировать выявленное отклонение и его последствия. В статье [64] отмечается важность, что с момента обнаружения до принятия мер существует временной диапазон, который может наложить новые последствия для выявленного отклонения.

Проактивный подход противопоставляется реактивному подходу, предполагающему решение проблем при их возникновении, т. е. без предварительной идентификации проблем и подготовки к их решению или

недопущению. Проактивное управление является непрерывным процессом, не ожидающим наступления проблемы или инцидента. Данный подход к управлению состоит из двух операций: анализ тенденций и планирование предупреждающих мероприятий [65,66]. Схема подхода представлена на рисунке 4.

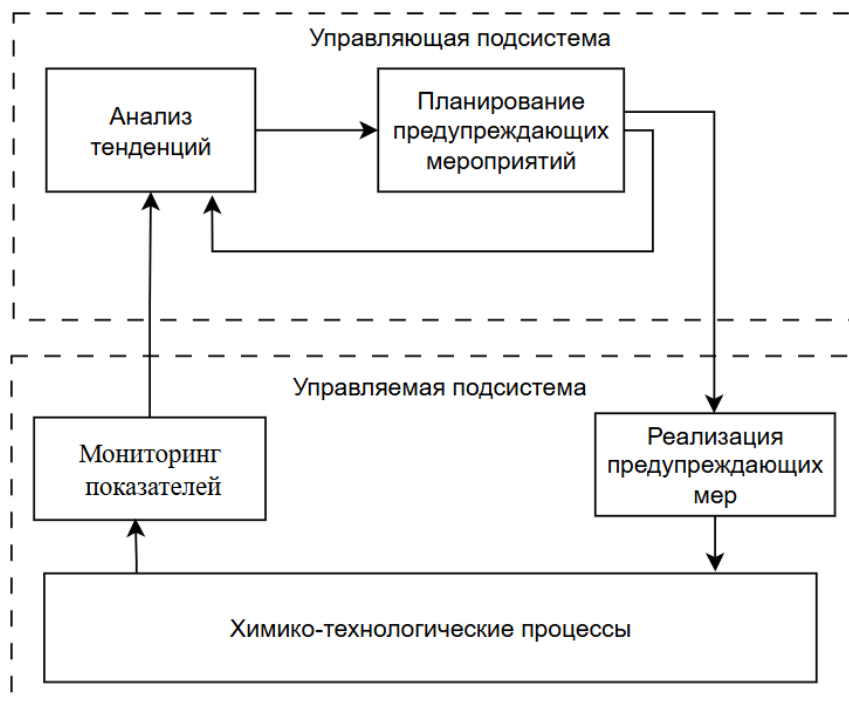


Рисунок 4 – Схема проактивного подхода к управлению

Исследование [64] обращает внимание, что особенность данного подхода в том, что триггером для корректировки и принятия управленческого решения не является уже вышедший из-под контроля процесс. Входом для процесса проактивного управления являются показатели мониторинга показателей.

Проактивный подход к управлению всегда базируется на результатах предыдущих измерений. Особенность химико-технологических процессов в том, что они порождают большое количество данных, которые в дальнейшем можно использовать в целях их анализа и предсказания. Однако задача прогнозирования значительно усложняется, если технологический процесс является многостадийным, отличающимся существенной нестационарностью и стохастичностью [67-69].

В настоящее время искусственный интеллект в химико-технологических процессах представляет собой набор методов и моделей, функционирующих во

многим интуитивно. Исследования [70,71] демонстрируют, что глобальный рост мирового рынка искусственного интеллекта происходит стремительно до 30% в год, однако сегмент исследуемой предметной области занимает в нем незначительное место

Авторы статьи [72] подчеркивают, что искусственный интеллект не подходит для всех технологических объектов. В применении предиктивной аналитики и искусственного интеллекта – химико-технологические процессы уступают транспорту и логистике, банкам, ритейлу, добыче, производству потребительских товаров, ИТ-отрасли (в совокупности составляющим 70% рынка ИИ-систем) и многим другим сферам применения.

Выбор подхода к управлению химико-технологических процессов основан на различных критериях и последствий для промышленных производств. Сопоставительный анализ рассматриваемых подходов приведен в таблице 6.

Таблица 6. Сравнительный анализ подходов к управлению

Критерий	Реактивный подход	Проактивный подход
Цель	Реагирование на уже произошедшие отклонения.	Предотвращение возможных отклонений и аварий.
Фокус	Устранение последствий проблем.	Предотвращение причин проблем.
Методы	Ручное устранение неисправностей, аварийные ремонты.	Автоматизированный мониторинг, прогнозирование, плановое обслуживание.
Риски	Высокая вероятность аварийных ситуаций, которые могут привести к неисправимым последствиям в области химико-технологических процессов	Минимизация рисков благодаря раннему выявлению проблем; Риски с некачественными данными, связанные с предметной областью (например, использование инструментов предиктивной аналитики для оборудования в химических и технологических производствах необходимо из-за наличия разнородных и содержащих помехи данных измерений)

Затраты	Высокие из-за срочного ремонта, простоев и устранения аварий.	Высокие начальные инвестиции, но снижение расходов в долгосрочной перспективе.
Экономическая эффективность	Снижается из-за простоев и аварийных ситуаций.	Повышается за счет стабильности и надежности процессов.
Влияние на безопасность	Увеличенный риск травм и аварий из-за неожиданного отказа оборудования.	Повышение безопасности сотрудников и экологичности производства.

Каждый из подходов отличается по своей цели: если реактивный подход к управлению направлен на решение уже произошедших отклонений, то проактивный подход предотвращает их возникновение. Важно, что распространение такого подхода позволяет предотвращать инциденты от участников процесса. При таком подходе улучшается культура безопасности и сами сотрудники становятся более заинтересованными к активному выявлению потенциальных опасностей и оповещения о них [73-75].

1.5 Выводы по главе 1

По результатам проведения аналитического обзора литературы и патентной документации современного состояния аффинажного производства, в частности способов растворения золотосодержащего сырья, а также методов моделирования химико-технологических процессов и схем управления ими, можно сделать следующие выводы:

1. В настоящее время активно ведутся исследования по применению кислотных методов в аффинаже с использованием современных информационных технологий и методов анализа информации [13]. В целом химические технологии аффинажа золота, по сравнению с большинством ранее описанных, являются более перспективными за счет снижения количества золота в незавершенном производстве и существенного уменьшения количества используемого оборотного золота [16,17].

2. По извлечению золота в раствор более эффективным методом является царсководочное, т.е. кислотное выщелачивание. Для катодного осадка извлечение

золота составило 99,9 %, для шлихового золота - только 86,4 % за одну стадию выщелачивания и 94,8 % - за две стадии [1]. Выщелачивание золота с помощью царскородного раствора — это эффективный метод, позволяющий извлекать золото из различных источников. Однако данная технология требует строгого соблюдения регламентов для исключения возможности возникновения опасных ситуаций, что значительно повышает требования к квалификации операторов, контролирующих протекание процесса.

3. Нейросетевое моделирование является перспективным подходом в части описания сложных нелинейных зависимостей, позволяющий строить модели аппроксимации процессов без необходимости явного задания уравнений. Работа с большими объемами данных без необходимости явного аналитического решения — основное преимущество данного подхода, обуславливающее рост применения нейросетевого моделирования в промышленности.

4. Автоматизированное управление, предусматривающее применение элементов искусственного интеллекта при управлении химико-технологическими процессами демонстрирует стремительный рост. Его доля увеличивается с 15% до 40% за последнее десятилетие, что подтверждает глобальную тенденцию постепенного перехода к автономным системам управления производственными процессами. [59]. Данный вид управления, минимизируя участие человека и риски, достигает максимальной производственной эффективности, однако его высокая стоимость и сложность внедрения ограничивают использование преимущественно сложными и опасными технологическими процессами.

5. Проактивное управление, то есть управление с использованием прогнозных моделей, является более надежным способом организации аффинажного производства, так как позволяет предусматривать возникновение инцидента. Исходными данными для организации процесса являются результаты мониторинга всех ключевых показателей. Важно, что применение такого подхода позволяет предотвращать проблемы субъективного характера, повышая технологическую культуру и заинтересованность сотрудников в активном выявлении потенциальных опасностей в производстве [73-75].

ГЛАВА 2. Эмпирический анализ кинетики процессов технологии химического аффинажа золота

2.1 Имитационное моделирование процессов

В начале главы кратко описывается процедура оценки средней продолжительности технологических операций химического аффинажа золота на производстве с использованием имитационной модели.

Начальным этапом в технологии химического аффинажа золота на производстве является приемка лигатурного золота на склад. По результату приемки оформляется приёмный акт (приходной ордер), в котором указывается фактическое количество, масса поступивших драгоценных металлов и расхождения с данными сопроводительных документов (при наличии).

Полученное сырье передается на приемную плавку. Приемная плавка лигатурного золота осуществляется на участке плавильного цеха, находящемся на аффинажном производстве. Режимы приемной плавки, отбор проб на проведение химанализа, отливку и зачистку слитка, клеймение, переплавку шлаков проводят согласно МК № 110-1-16 (в плавильном цехе в режимной части завода).

Результаты приемной плавки разделяют на фракции удобные для загрузки в тигель марки МПГ 7 (графитовый). Плавку гранул проводят на установке ИТД 0,12 (ТПЧ 320). Масса плавки до 10,0 кг, температура расплава перед разливкой 1020-1100°C.

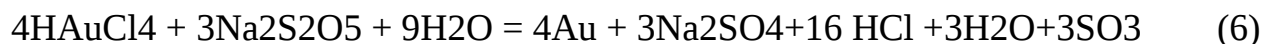
Время одной плавки гранул 2-3 минуты. Температура воды в баке должна быть не более 70°C. После отливки гранул осуществляется откачка воды из бака с помощью насоса, гранулы извлекаются и загружаются в титановые гофты. Затем перегружаются в титановые поддоны для сушки в электропечи НК 6.6.6/3,5. Время сушки 120-150 минут при температуре 220-250°C. По окончании сушки поддоны с гранулами извлекаются из электропечи и охлаждаются на воздухе. Время охлаждения 20-25 минут. После охлаждения гранулы передают из режима на аффинажное производство для получения золотого порошка.

В зависимости от содержания серебра в сырье применяются две различные

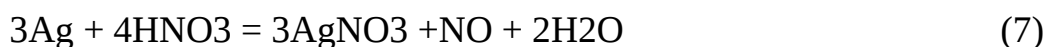
схемы переработки: при содержании серебра менее 10% используется схема с прямым царскowodочным выщелачиванием гранул. При этом золото переходит в раствор, а серебро в виде хлорида остается в нерастворимом остатке. Растворение золота проходит по реакциям (4,5) [2,3]:



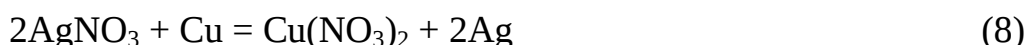
Нерастворенные остатки гранул отделяют от хлорида серебра на сите и возвращают на плавку гранул. Хлорид серебра направляют на линию кислотного обогащения серебра. Золото из раствора осаждают в виде металлического порошка с помощью метабисульфита натрия по реакции (6):



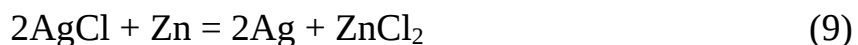
При содержании серебра более 10% проводится предварительная плавка с добавлением серебра или меди до 60% содержания металлов, растворимых в азотной кислоте. Полученные гранулы выщелачивают в азотной кислоте. Растворение серебра идет по реакции (7) [2,3]:



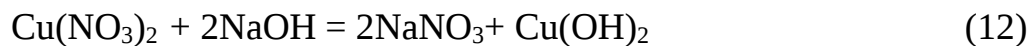
Серебросодержащий раствор направляют на линию обогащения серебра, а нерастворимый осадок - на линию аффинажа золота. Серебро из раствора осаждают цементацией на медной стружке по реакции (8):



Хлорид серебра восстанавливают до металлического серебра цинком по реакции (9):



Полученное по технологии кислотного обогащения цементное серебро направляют на плавку анодов, и затем на линию электрохимического рафинирования серебра. Отработанные растворы, содержащие менее 0.001 г/л золота и серебра, направляют на участок нейтрализации и очистки сбросных вод. Нейтрализация кислот и осаждение гидроокиси меди едким натром происходит в ванне нейтрализации из полипропилена объемом 2м³ по реакциям [2,3] (10-13):



Восстановление и осаждение порошка золота проводят при перемешивании без подогрева. Золото осаждают в виде металлического порошка раствором метабисульфита натрия по реакции (14):



Раствор метабисульфита натрия подают в реактор из аппарата, открывая вентиль подачи раствора в реактор и закрывая вентиль обратной циркуляции. Скорость подачи раствора – 1-2 л/мин. Раствор подают до прекращения бурного выделения окислов азота. После этого контролируют полноту разложения нитросоединений, добавляя мочевины до прекращения реакции. Затем подачу раствора метабисульфита возобновляют.

В процессе осаждения контролируют величину ОВП раствора и, при достижении значения 650-700 мВ, подачу реагента прекращают. Полноту осаждения контролируют качественной реакцией с хлорным оловом. По окончании процесса осаждения раствор отстаивают в течении 20-30 минут.

После отстоя осветленную часть раствора с помощью насоса декантируют практически досуха. В аппарат наливают 50 л воды, соляную кислоту и нагревают до 70 °С. Нагретый раствор в количестве 30л перекачивают в реактор, где в течении 1 часа при перемешивании проводят промывку порошка золота.

Промытый соляной кислотой порошок золота смывают из реактора водой на нутч-фильтр, раствор фильтруют и с помощью насоса перекачивают в реактор. Промывают порошок на фильтре сначала холодной деионизованной водой, а затем горячей деионизованной водой при температуре 80- 90°С, перемешивая порошок совком. Заливку порошка водой повторяют 7 раз.

Порошок золота выгружают с фильтра, сушат в электропечи при температуре 150 – 170°С в течении 8 часов. Сухой порошок взвешивают и направляют на плавку для получения слитков. Полученные слитки упаковывают, маркируют и передают

на склад готовой продукции для дальнейшей реализации.

2.1.1 Разработка имитационной модели

На основании описания, изложенного в п. 2.1 разработана имитационная модель процессов исследуемой технологии кислотного аффинажа. Блок-схема имитационной модели представлена на рисунке 5.

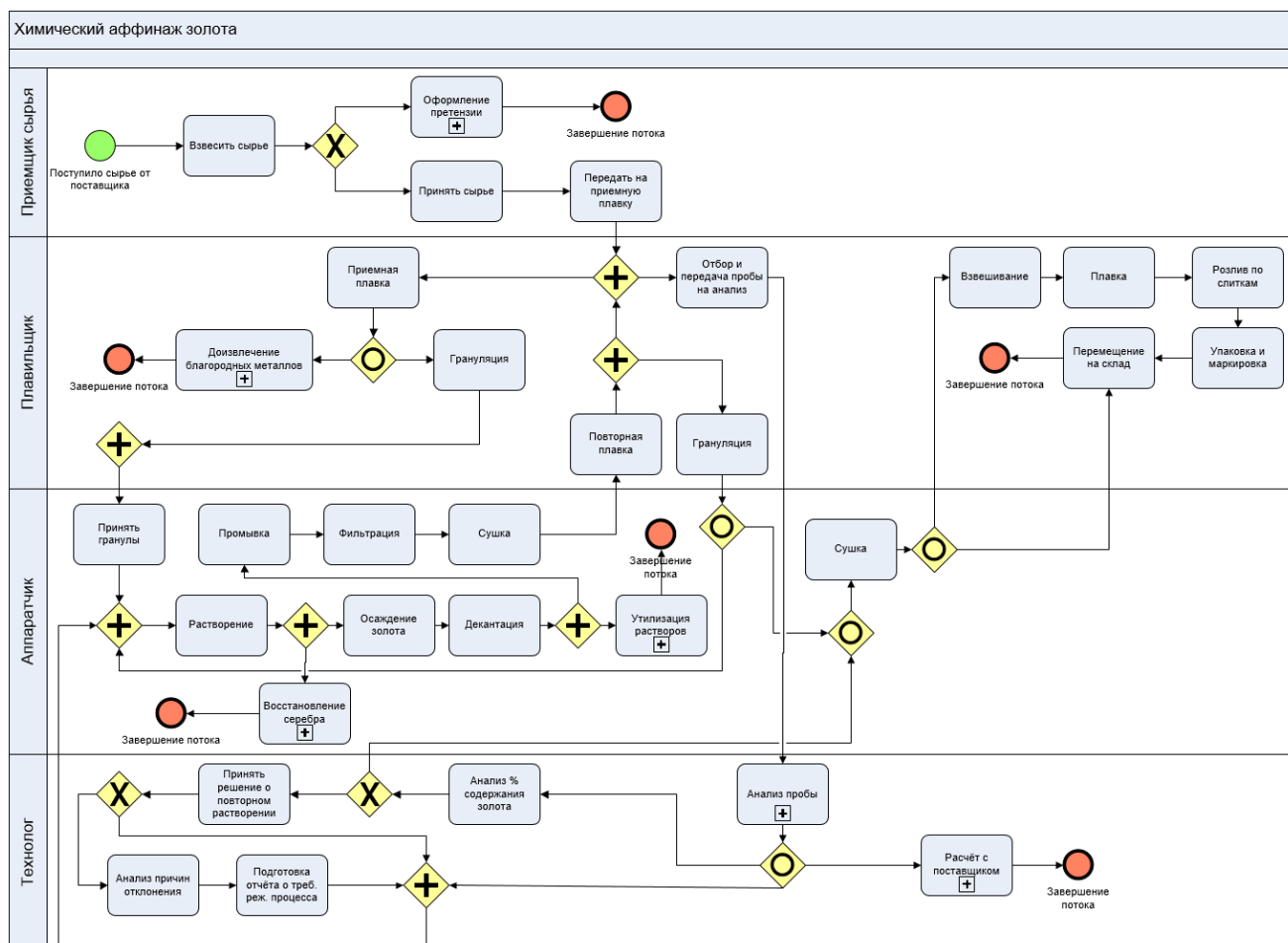


Рисунок 5 – Блок-схема имитационной модели исследуемой технологии кислотного аффинажа золота

Алгоритм выполнения процесса представленный на рисунке 5 выполнен в нотации моделирования BPMN с помощью объектов потока (событий, процессов, шлюзов), связанными между собой потоками управления, которые определяют ход выполнения процесса. Описание используемых на блок-схеме объектов приведено в таблице 7.

Таблица 7. Описание используемых объектов моделирования

Объект моделирования	Обозначение	Описание
Стартовое событие		Триггер, инициирующий запуск процесса.
Конечное событие		Определяет завершение процесса или отдельного потока управления.
Задача		Выполняемая в процессе операция.
Подпроцесс		Смежные процессы, запускаемые в ходе исполнения исследуемой технологии.
Эксклюзивный оператор (XOR, «Исключающее ИЛИ»)		При использовании оператора можно продолжить выполнение процесса только по одному из возможных условных потоков управления.
Параллельный оператор (AND, «И»)		Используется, если запускаются или сливаются несколько потоков управления, каждый из которых должен дожидаться остальных.
Неэксклюзивный оператор (OR, «ИЛИ»)		Каждое из указанных условий является независимым, и дальнейшее выполнение процесса может продолжиться сразу по нескольким потокам управления, если условия будут выполнены.

Исходя из большого количества случайных факторов, возникающих на каждой из операций, будем предполагать, что распределение времени реализации подчиняется нормальному закону распределения. Цель использования имитационной модели заключается в оценке средней продолжительности технологических процессов химического аффинажа. Задаются допустимые временные границы операций согласно блок-схеме (рисунок 5).

2.1.2 Запуск имитации технологических процессов

Запуск имитационной модели выполнен в программном продукте Business Studio 6 Professional. Исходя из описания операций для непрерывного распределения будет использоваться нормальный закон со следующими параметрами (рисунок 6):

- нижняя граница;
- верхняя граница;
- математическое ожидание;
- стандартное отклонение.

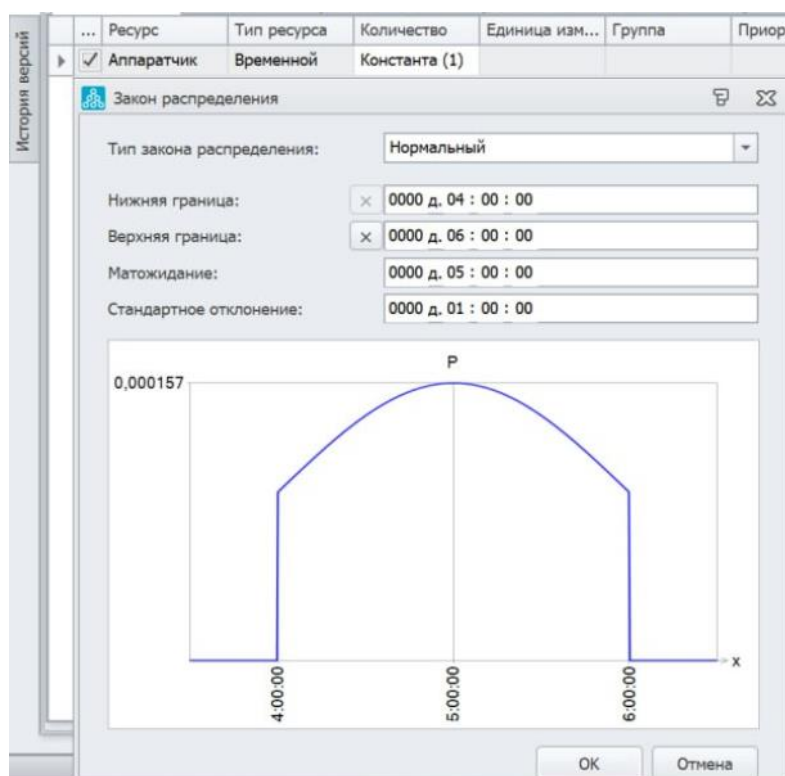


Рисунок 6 - Настройка закона распределения на примере операции растворения

Параметры запуска имитации приведены в таблице 8.

Таблица 8. Параметры запуска имитации

Наименование параметра	Время выполнения
Время начала	01.01.2024 00:00:00
Время окончания	31.12.2024 00:00:00
Длительность	365 д. 00:00:00

Настройка периодичности запуска имитационной модели представлена на

рисунке 7.

Интервалы '0:00:00 — 0:00:00'

Интервал возникновения экземпляров события

☒ Сутки Время возникновения:

☐ Год ☒ Задать: начало 00 : 00 : 00 окончание 00 : 00 : 00 длительность 24 : 00 : 00

☐ Рабочее время по календарю: ☒ Базовый календарь ...

Повторять

☐ Нет

☒ Ежедневно ☒ каждый 1 рабочий день

☐ Еженедельно по календарю ☒ Базовый календарь ...

☐ Ежемесячно ☐ каждый 1 день

☐ Ежегодно ☐ скользящий график: Рабочие дни: 1 Выходные дни: 1

Пределы повторения

Начало: 01.01.2024 Окончание: ☐ нет конечной даты

☐ завершить после 1 повторений

☒ дата окончания 31.12.2024

Сохранить Закрыть

Рисунок 7 – Настройка интервалов возникновения экземпляров события

Результаты запуска имитационной модели представлены в таблице 9.

Таблица 9. Результаты имитационного моделирования технологических операций

Процесс	Время выполнения
Взвесить сырье	00:30:42
Принять сырье	00:40:01
Передать на приемную плавку	00:30:23
Приемная плавка	02:15:00
Грануляция	00:25:12

Процесс	Время выполнения
Отбор и передача пробы на анализ	00:45:00
Принять гранулы	00:25:00
Растворение	08:35:12
Осаждение золота	05:10:10
Декантация	00:30:15
Промывка	00:20:05
Фильтрация	02:06:20
Повторная плавка	01:30:00
Анализ % содержания золота	00:05:00
Сушка	00:30:06
Взвешивание	01:30:00
Плавка	00:10:00
Розлив по слиткам	03:00:00
Упаковка и маркировка	02:10:00
Передать слитки на склад готовой продукции	00:30:06
Принять решение о повторном растворении	00:20:00
Анализ причин отклонения	01:00:40
Подготовка отчета о требуемых режимах процесса	00:30:40

Результаты имитационного моделирования технологии представлены в виде диаграммы Ганта на рисунке 8.

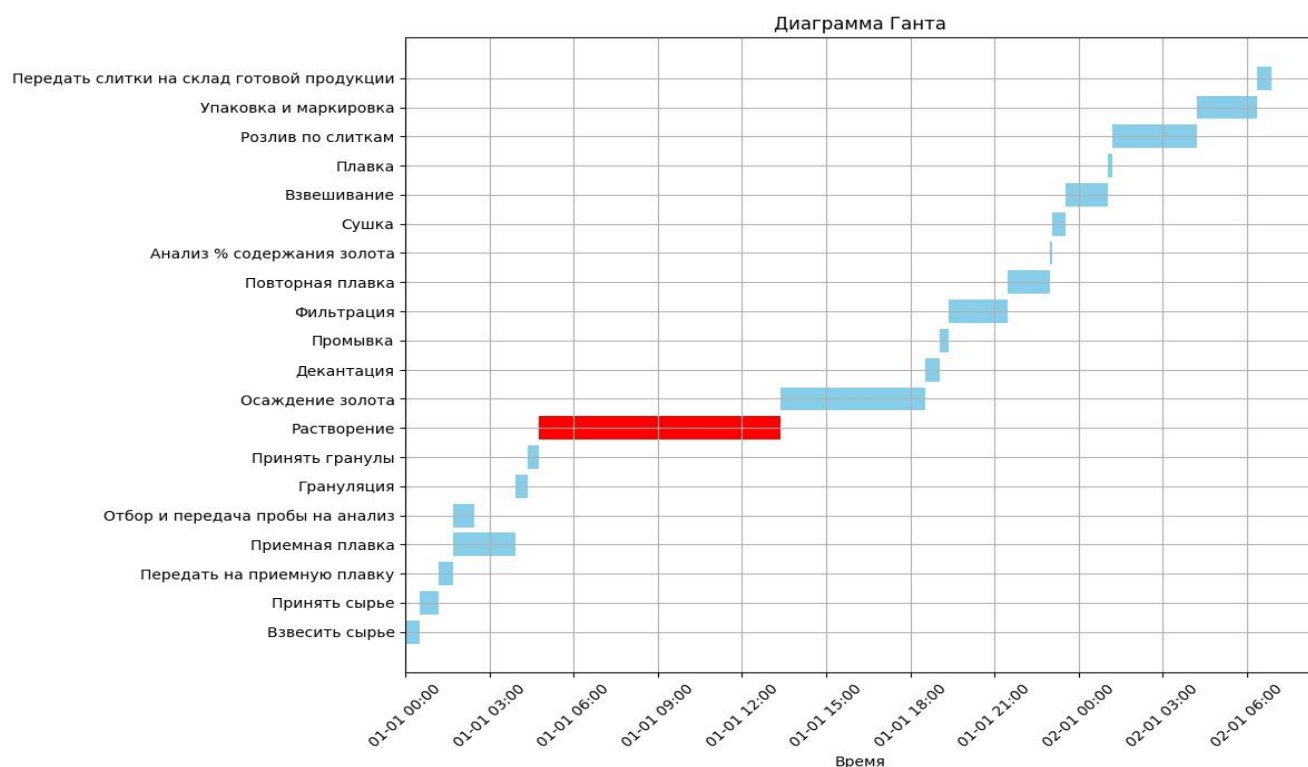


Рисунок 8 – Диаграмма Ганта технологии кислотного аффинажа на производстве

Полученные результаты имитационного моделирования сопоставлены с регламентными значениями продолжительности операций. На основании анализа выявлено, что длительность растворения гранул (08:35:12) превышает верхнюю границу времени по регламенту (06:00:00) более, чем на 2 часа.

Данный факт обуславливает наличие проблемного участка кислотной технологии аффинажа золота в операции по выщелачиванию золотосодержащих гранул.

2.2 Анализ операции растворения золотосодержащих гранул

Исходным сырьем для выщелачивания являются гранулы Зл б/пр разной крупности, мм: длина - 15 ± 5 ; ширина - $10 \pm 2,5$; толщина – $1,5 \pm 0,8$. Содержание золота в грануле составляет 40-70%. Основные примеси: серебро (5-15%) и медь (15-40%). Гранулы подаются в реактор объемом 1 м^3 , находящимся под уклоном в 30° . Внутри крутящегося реактора 4 ребра, обеспечивающих перемешивание при вращении. Масса 1 партии выщелачивания гранул не более 75 кг. Скорость вращения: 10-20 оборотов/минуту. Первой дозируется азотная кислота (Т:Ж 1:1),

HNO_3 – техническая с концентрацией 57%. Аппаратчик дозирует азотную кислоту постепенно (не более 5 л/мин), поддерживая объем отходящего газа (NO_2) в диапазоне 8,8 – 11,5 кг/м³. На рисунке 9 представлена зависимость цвета отходящего газа от его концентрации.

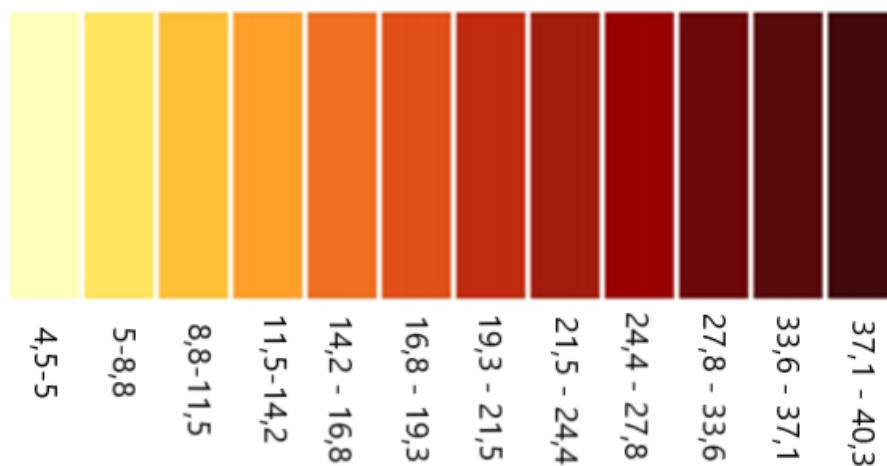
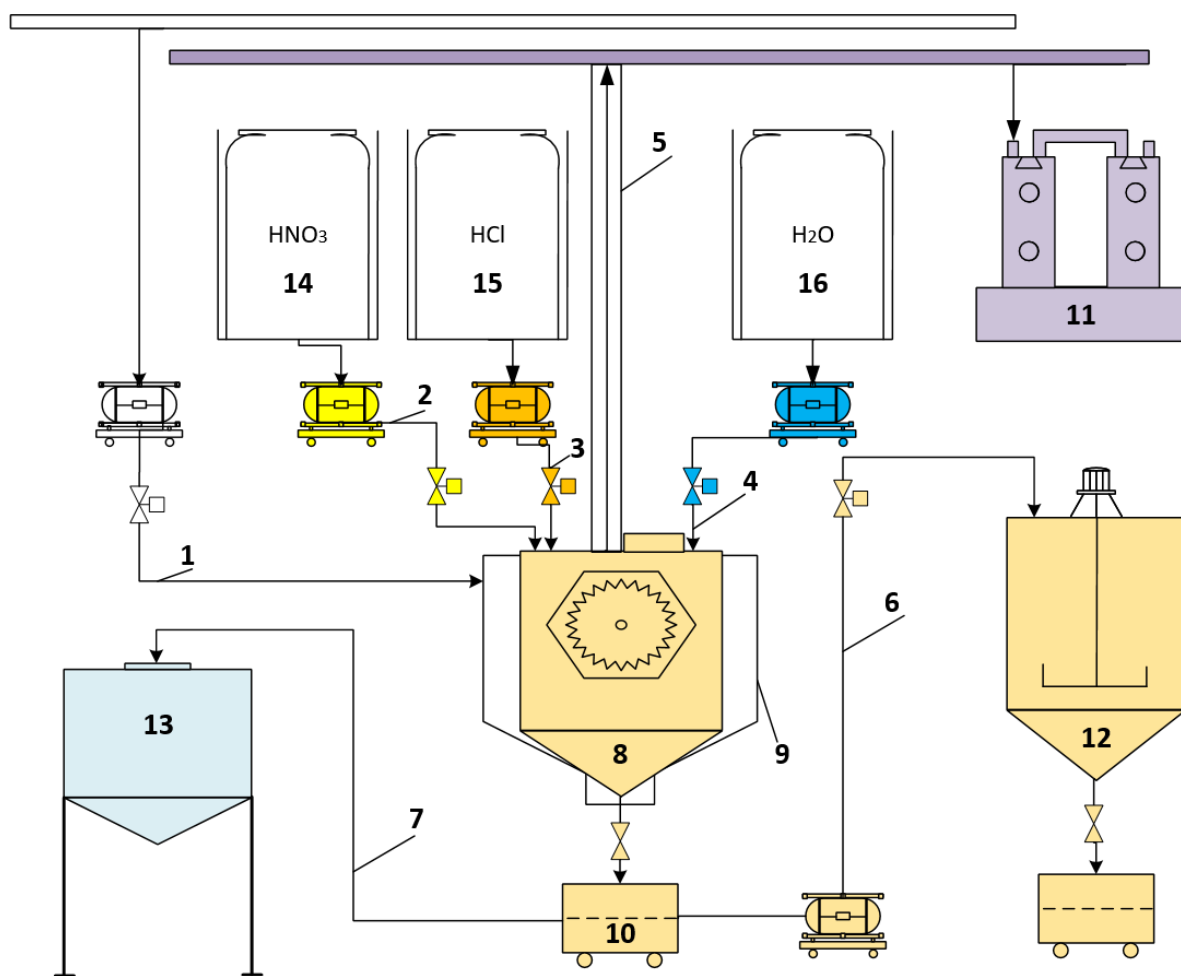


Рисунок 9 - Зависимость цвета газа от его концентрации, кг/м³

Спустя 30 минут после добавления азотной кислоты дозируется соляная кислота (Т:Ж 1:3). HCl - химически чистая с концентрацией 36%. Соляную кислоту дозируют постепенно (скорость не более 5 л/мин), удерживая цвет отходящего газа на том же уровне. Температурный интервал взаимодействия с кислотами 20-90°C, полипропиленовый реактор выдерживает температуру до 130°C. После дозирования соляной кислоты реактор вращается на протяжении 5 часов.

По окончании реакции выщелачивания в реактор добавляется деионизированная вода в объеме 1:1 к царсководочному раствору, после чего продолжается вращение реактора на протяжении 15 минут. Длительность отстаивания раствора составляет 5 часов. Полученный раствор сливается через сито на нутч-фильтр. На сите остаётся нерастворимый осадок, а на тканевой поверхности нутч-фильтра – хлорид серебра. Нерастворимый осадок сушат, переплавляют в гранулы и повторно растворяют со следующей партией.

Схема растворения золотосодержащего сырья представлена на рисунке 10.



1 – линия подачи горячего пара; 2 – линия подачи азотной кислоты; 3 – линия подачи соляной кислоты; 4 – линия подачи деионизированной воды; 5 – сбор отходящих газов; 6 – линия передачи раствора на осаждение; 7 – линия передачи AgCl на восстановление; 8 – реактор растворения; 9 – рубашка реактора; 10 – нутч-фильтр; 11 – скруббер; 12 – реактор осаждения; 13 – емкость восстановления Ag; 14 – емкость хранения азотной кислоты; 15 – емкость хранения соляной кислоты; 16 – емкость хранения деионизированной воды

Рисунок 10 – Технологическая схема растворения золотосодержащих гранул

Анализ и оптимизация исследуемой технологии будут проводиться по следующим критериям:

- % извлечения золота в раствор;
- объем нерастворимого осадка, %;
- % брака золотого порошка;
- объем хлорида серебра после первичного растворения, %;

- длительность выщелачивания, ч;
- объем гранул, добавляемый к новой партии растворения, %.

На основе накопленной статистики предприятия с 2020 по 2024 г.г. посчитаны текущие значения вышеперечисленных показателей эффективности исследуемой технологии, а также определены корневые причины выявленных недостатков, результаты приведены в таблице 10.

Таблица 10. Ключевые показатели эффективности исследуемой технологии

Наименование KPI	Описание KPI	Текущее значение KPI, %	Причина
Извлечения золота в раствор, %	Расчет показателей на 2236 партий в период с 01.01.2020 – 31.12.2024	91 – 95	Низкая адаптивность процесса под меняющиеся условия входных параметров
Объем нерастворимого осадка, %		7,2 – 9,1	Высокое влияние человеческого фактора
Брак золотого порошка, %		8 – 10	Попадание мелких фракций хлорида серебра в раствор, поступающий на осаждение
Объем хлорида серебра после первичного растворения, %		1,15 – 2,10	
Длительность операции выщелачивания, ч		5 – 9	Отсутствие контроля за изменением динамических параметров химических реакций в режиме реального времени
Объем гранул, добавляемый к новой партии растворения, %		5 – 7	Рост объема переплавленного в гранулы нерастворимого осадка

Результаты анализа показателей эффективности исследуемой технологии царсководочного выщелачивания показали недостатки применяемой методики растворения гранул на предприятии и подчеркнули необходимость в исследовании данной тематики с целью дальнейшей оптимизации.

2.3 Кинетика царсководочного выщелачивания золотосодержащих гранул

Изучение кинетики растворения золотосодержащих гранул заключается в подборе оптимальных режимов царсководочного выщелачивания. В качестве

параметров, оказывающих влияние на процесс, рассмотрены: соотношение Т:Ж, температурный режим, скорость вращения реактора, крупность гранул, химический состав исходного сырья. Исследования проводились в условиях аффинажного производства на базе АО «МЗСС». Опыты проводились на уменьшенной модели производственного реактора с максимальной загрузкой 1 кг лигатурного золота и диапазоном вращений 10-20 оборотов/минуту.

Для проведения исследований по выщелачиванию гранул 3л б/пр в качестве реагентов выбраны концентрированные кислоты HCl - 36% и HNO₃ - 57%. В качестве исходного сырья использованы гранулы крупностью, мм: длина - 15±5; ширина - 10±2,5; толщина – 1,5±0,8.

Количество растворенного золота из сплава рассчитывали по массе золота (г\л), перешедшего в царскowodочный раствор, которое определяли в отбираемых пробах атомно-абсорбционным методом. Исследования выполнены с точностью 5,0 %, вероятностью 0,95.

2.3.1 Кинетика царскowodочного выщелачивания в зависимости от температуры реакции

Для оценки влияния температуры на извлечение золота в раствор были взяты образцы, состав которых описан в таблице 11.

Таблица 11. Состав образца гранул для оценки влияния температуры, %

№ партии	Au	Ag	Cu	Pd	Sn	Zn	Ni	Cd	Pb	Прочие
1	70	15,41	3,54	0,01	0,02	0,03	0,002	0,01	0,04	10,93
2	70	15,12	3,08	0,01	0,01	0,03	0,001	0,01	0,04	11,699
3	70	14,9	4,62	0,01	0,02	0,03	0,002	0,01	0,04	10,368
4	70	15,9	4,61	0,01	0,02	0,03	0,002	0,02	0,04	10,248

Исследование влияния температуры на извлечение золота проводились при скорости вращения реактора 10 об\мин, соотношении Т:Ж = 1:4 в диапазоне температур 30-80°C.

Масса исходного сырья — 1 кг, объём раствора: 5 л.

Степень извлечения (α) определяем по формуле (15):

$$\alpha = \frac{m(Au)_i}{m(Au)_{исх}} \times 100\% \quad (15)$$

Результаты экспериментальных растворов партий лигатурного золота при разных температурах приведены в таблицах 12 - 15.

Таблица 12. Степень извлечения Au при T = 30°C

τ (мин)	$m_{(Au)i}$	α (%)
10	70	10
20	100	14,29
30	150	21,43
40	200	28,57
50	250	35,71
60	300	42,86
70	330	47,14
80	340	48,57
90	380	54,29
100	440	62,86
110	500	71,43
120	540	77,14
130	570	81,43
140	580	82,86
150	590	84,29
160	600	85,71
170	610	87,14
180	620	88,57
190	630	90
200	640	91,43
210	650	92,86
220	660	94,29

230	670	95,71
240	680	97,14
250	690	98,57
260	700	100

Таблица 13. Степень извлечения Au при T = 40°C

τ (мин)	$m_{(Au)i}$	α (%)
10	90	12,86
20	150	21,43
30	200	28,57
40	250	35,71
50	320	45,71
60	350	50
70	380	54,29
80	420	60
90	450	64,29
100	530	75,71
110	580	82,86
120	600	85,71
130	630	90
140	640	91,43
150	650	92,86
160	660	94,29
170	670	95,71
180	680	97,14
190	690	98,57
200	700	100

Таблица 14. Степень извлечения Au при T = 60°C

τ (мин)	$m_{(Au)i}$	α (%)
10	120	17,14
20	190	27,14
30	240	34,29
40	300	42,86
50	360	51,43
60	400	57,14
70	450	64,29
80	500	71,43
90	550	78,57
100	600	85,71
110	630	90
120	650	92,86
130	670	95,71
140	680	97,14
150	690	98,57
160	700	100

Таблица 15. Степень извлечения Au при T = 80°C

τ (мин)	$m_{(Au)i}$	α (%)
10	160	22,86
20	200	28,57
30	250	35,71
40	310	44,29
50	370	52,86
60	440	62,86
70	500	71,43
80	560	80

90	620	88,57
100	670	95,71
110	680	97,14
120	690	98,57
130	700	100

Строим график в координатах $\alpha - \tau$ (рисунок 11).

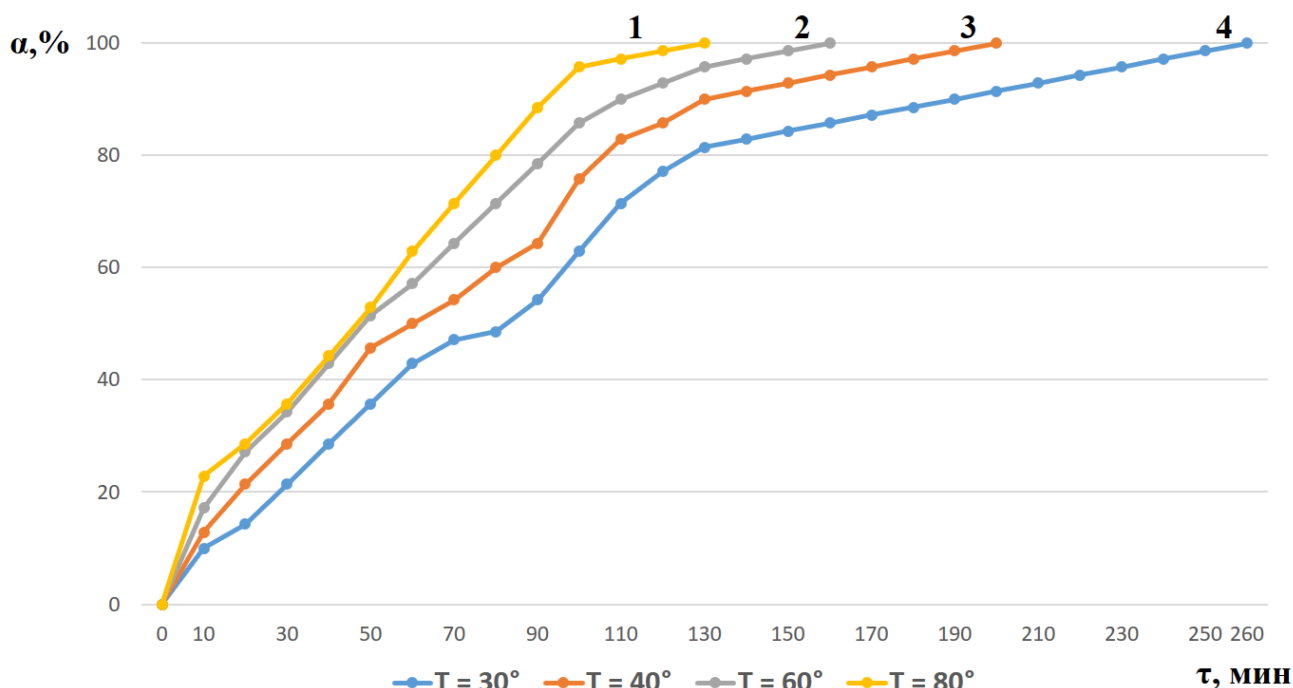


Рисунок 11 – Степень извлечения золота при разной температуре

На основе полученных данных можно сделать вывод, что максимальное извлечение золота в раствор для 1 случая достигается через 130 минут, 2 – 160 минут, 3 – 200 минут, 4 – 260 минут. Таким образом, снижение температуры с 80°C до 30°C приводит к увеличению продолжительности выщелачивания Au в 2 раза.

Строим график скорости растворения золота ($da/d\tau - \tau$), рисунок 12. В рамках исследования интерес представляют экспериментальные данные, полученные до образования сплошного слоя хлорида серебра, далее ход реакции осложняется влиянием диффузии через слой твердого продукта, график скорости построен в интервале 10 минут от начала процесса.

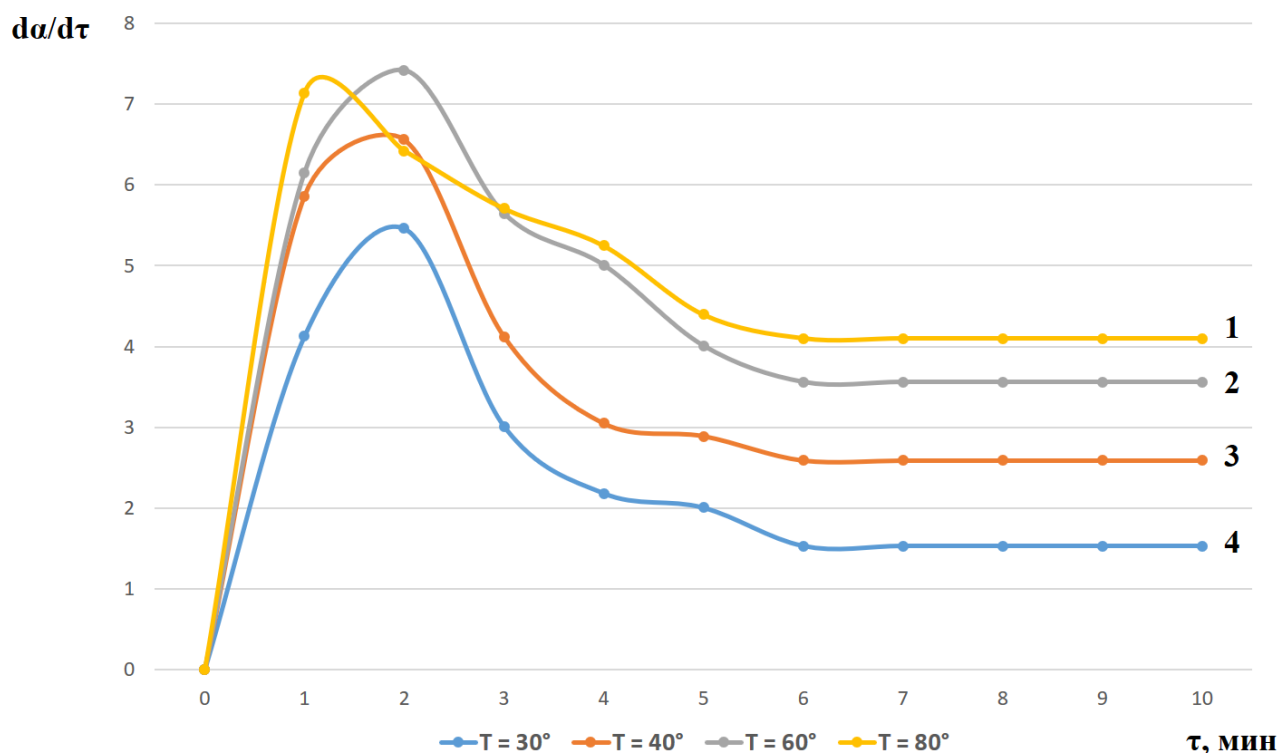


Рисунок 12 – Кинетика растворения золота при разной температуре

Из графика можно заметить, что скорость растворения золота возрастает по мере повышения температуры. Причем при 80°C сплошной слой хлорида серебра образуется быстрее, поэтому максимальная скорость зафиксирована на 1 минуте процесса, для случаев 2, 3, 4 на 2 минуте.

Для расчёта кажущейся энергии активации (E) используем уравнение (16):

$$\lg\left(\frac{d\alpha}{d\tau}\right) = -\left(\frac{E}{2,3 * R}\right) \cdot \frac{1}{T} \quad (16)$$

Определяем начальные скорости выщелачивания ($da/d\tau$).

Таблица 16. Расчет начальных скоростей выщелачивания

T (°C)	da/dτ (%/мин)	lg(da/dτ)	1/T · 10 ⁻³
30	4,13	0,62	3,3
40	5,86	0,77	3,19
60	6,15	0,79	3
80	7,14	0,85	2,8

Строим график (рисунок 13) в координатах: $\lg\left(\frac{d\alpha}{d\tau}\right) = -\frac{1}{T}$

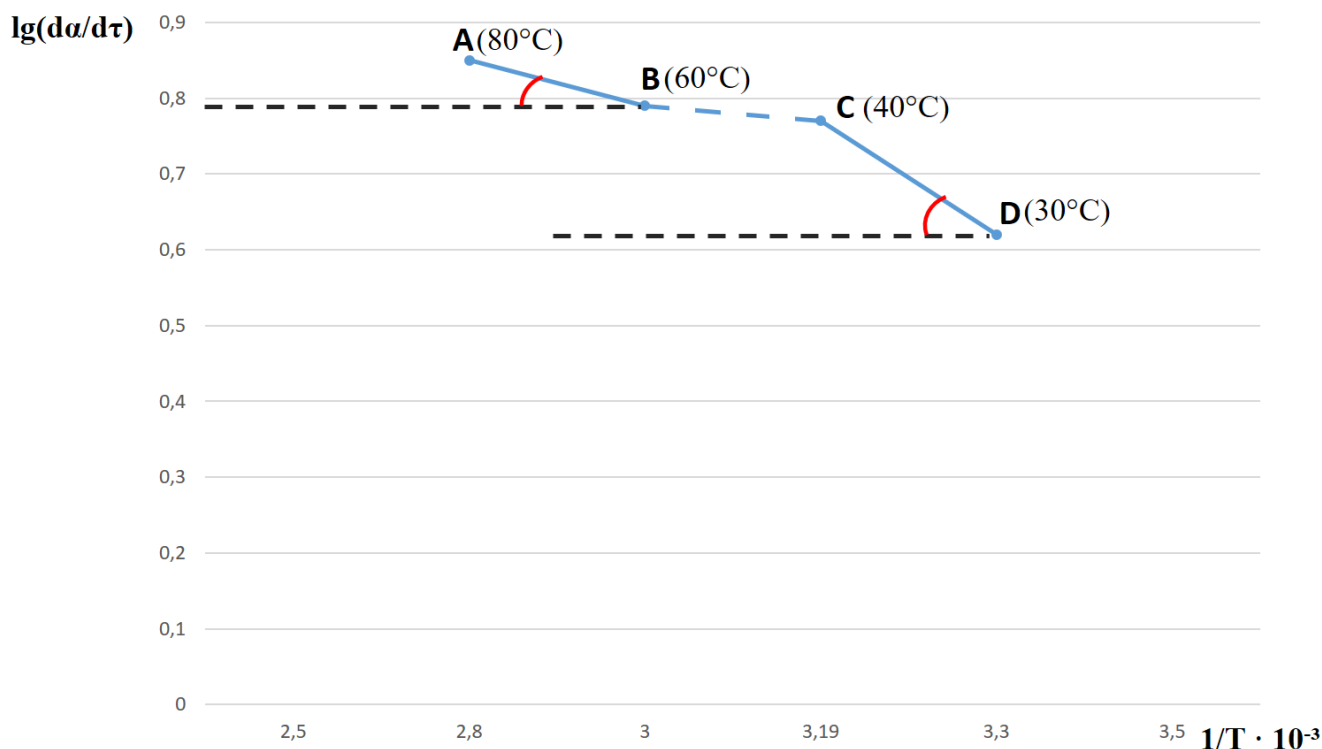


Рисунок 13 – График зависимости $\lg \left(\frac{d\alpha}{d\tau} \right)$ от $-\frac{1}{T}$

По графику определяем тангенс угла наклона прямых (A-B) и (C-D). Исходя из формулы (16), тангенс угла наклона прямых равен $-E/R$:

$$\operatorname{tg}(A - B) = -1 \cdot 10^3$$

$$\operatorname{tg}(C - D) = -3,27 \cdot 10^3$$

Кажущаяся энергия активации при температурах (60–80°C) и (30–40°C) будет равна:

$$\text{для (A-B): } -1 \times 10^3 = -\frac{E}{8,31}, E = 8,31 \cdot 10^3 \text{ Дж (A - B)}$$

$$\text{для (C-D): } -3,27 \times 10^3 = -\frac{E}{8,31}, E = 27,13 \cdot 10^3 \text{ Дж (C - D)}$$

Из полученных данных можно сделать вывод:

- при более высоких температурах (60–80 °C) лимитирующей стадией процесса является диффузия;
- при относительно низких температурах (30–40 °C) реакция протекает в промежуточной области.

Для диффузионного режима протекания реакции характерны значения энергии активации $\sim 8\text{--}20$ кДж/моль. Для кинетического режима E находится в интервале $40\text{--}300$ кДж/моль.

Для промежуточной области E принимает значения от 20 до 40 кДж/моль.

Для подтверждения сделанных выводов рассмотрим зависимость степени извлечения (α) золота в раствор от скорости перемешивания (обороты/мин).

2.3.2 Кинетика царсководочного выщелачивания в зависимости от скорости вращения реактора

Исследование влияния скорости вращения реактора на извлечение золота проводилось при соотношении Т:Ж = 1:4, температуре 80°C при разной частоте оборотов. Масса исходного сырья — 1 кг, содержание Au - 70%. Результаты экспериментальных растворов партий лигатурного золота при разной частоте оборотов реактора приведены в таблицах 17-19.

Таблица 17. Степень извлечения Au при $\omega = 0$ об/мин

τ (мин)	$m_{(Au)i}$	α (%)
10	50	7,14
20	80	11,43
30	110	15,71
40	140	20,00
50	170	24,29
60	210	30,00
70	250	35,71
80	290	41,43
90	310	44,29
100	350	50,00
110	390	55,71
120	410	58,57
130	440	62,86

140	470	67,14
150	470	67,14
160	470	67,14
170	470	67,14

Таблица 18. Степень извлечения Au при $\omega = 10$ об/мин

τ (мин)	$m_{(Au)i}$	α (%)
10	160	22,86
20	200	28,57
30	250	35,71
40	310	44,29
50	370	52,86
60	440	62,86
70	500	71,43
80	560	80
90	620	88,57
100	670	95,71
110	680	97,14
120	690	98,57
130	700	100

Таблица 19. Степень извлечения Au при $\omega = 20$ об/мин

τ (мин)	$m_{(Au)i}$	α (%)
10	250	35,71
20	350	50
30	440	62,86
40	520	74,29
50	590	84,29
60	610	87,14
70	630	90

80	650	92,86
90	670	95,71
100	700	100

Строим график зависимости в координатах α — τ (рисунок 14). Проводим касательные для $\tau = 0$, находим тангенс угла наклона, который будет соответствовать начальной скорости ($d\alpha/d\tau$).

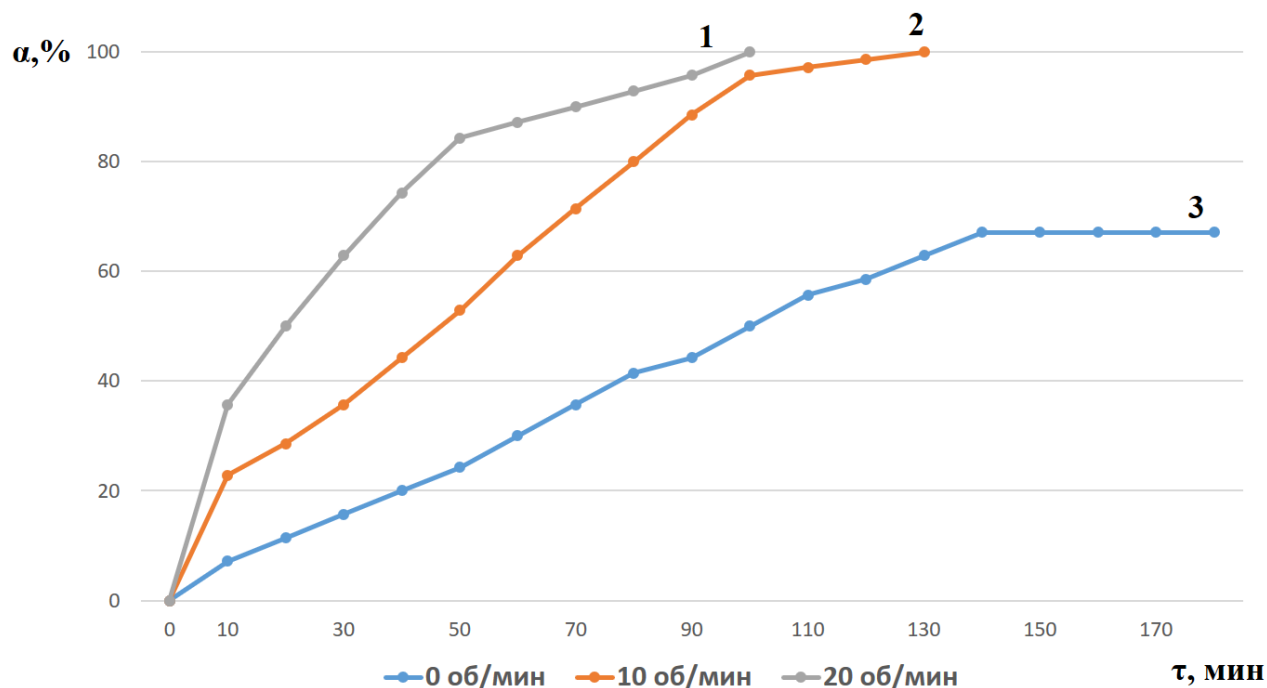


Рисунок 14 - Степень извлечения золота при разной скорости вращения реактора

Из графика можно заметить, что при отсутствии вращения процент извлечения золота в раствор останавливается на 67,14 % на 140 минуте реакции.

Минимальная продолжительность растворения наблюдается при скорости вращения реактора - 20 об/мин и составляет 100 минут.

Строим график скорости растворения золота ($d\alpha/d\tau$ - τ), рисунок 15.

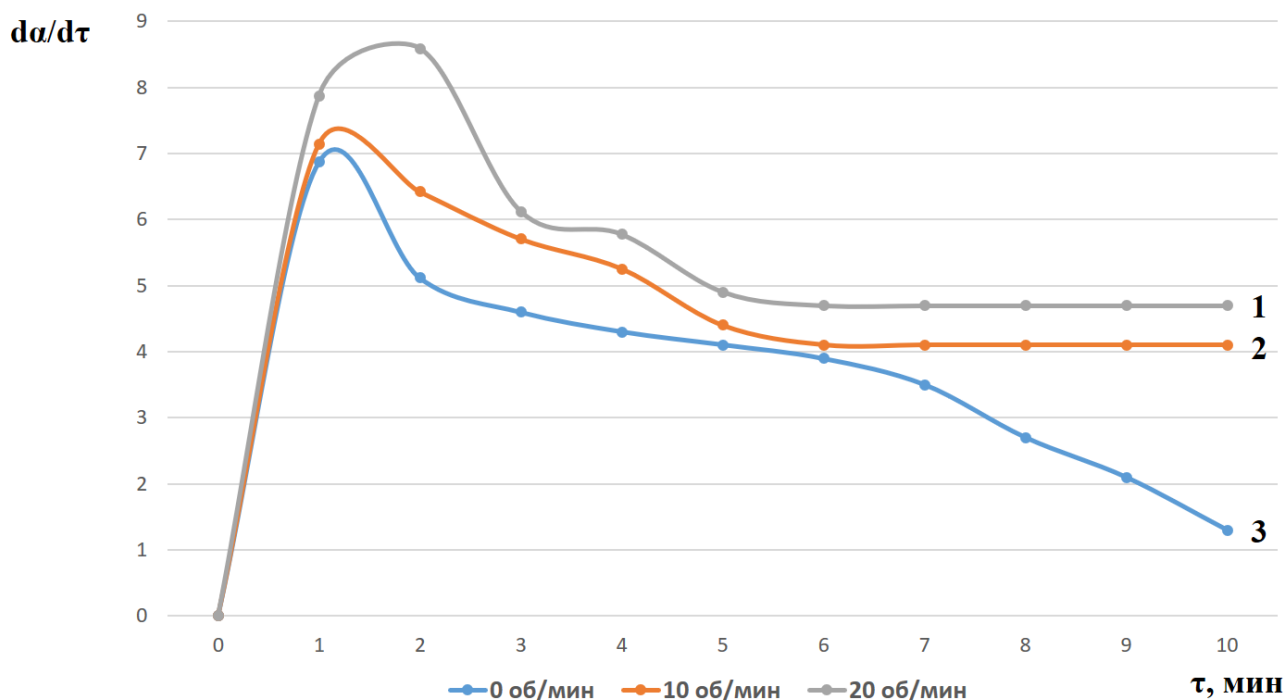


Рисунок 15 - Кинетика растворения золота при разной скорости вращения

Из графика можно заметить, что скорость растворения золота для 1 и 2 случая проходит через максимум на 1 и 2 минуте соответственно и далее устанавливается на одном уровне. В 3 случае скорость выщелачивания после прохождения максимума снижается, так как слой хлорида серебра во времени увеличивается, таким образом скорость обеспечивается только за счет высоких кислотных концентраций. Так же из графика следует, что при увеличении вращения с 10 до 20 об\мин увеличивается продолжительность образования сплошного слоя AgCl . Зависимость скорости выщелачивания от скорости вращения реактора свидетельствует о том, что процесс растворения лимитируется диффузией через слой образовавшегося хлорида серебра на поверхности исходных частиц минерала, что подтверждает вывод, полученный в ходе исследования влияния температуры на степень извлечения Au в раствор, о том, что лимитирующей стадией исследуемого процесса является диффузия.

2.3.3 Кинетика царского водочного выщелачивания в зависимости от крупности гранул

Исследование влияния крупности гранул на скорость извлечения золота

проводились при соотношении Т:Ж = 1:4, температуре 80°C, при скорости вращения реактора 20 об/мин. Масса исходного сырья — 1 кг, содержание Au - 70%. Для исследования влияния крупности гранул на скорость выщелачивания золота отобраны образцы следующих размеров (таблица 20).

Таблица 20. Крупность гранул, мм

№ партии	Длина	Ширина	Толщина
1	20	12	2,1
2	15	10	1
3	10	8	0,7

1. Фракции крупных размеров:

- $20 \times 12 \times 2 = 480 \text{ мм}^2 = 4,8 \text{ см}^2$
- $20 \times 2,1 \times 2 = 84 \text{ мм}^2 = 0,84 \text{ см}^2$
- $12 \times 2,1 \times 2 = 50,4 \text{ мм}^2 = 0,505 \text{ см}^2$

Суммарная площадь: 6,145 см²

2. Фракции средних размеров:

- $15 \times 10 \times 2 = 300 \text{ мм}^2 = 3 \text{ см}^2$
- $15 \times 1 \times 2 = 30 \text{ мм}^2 = 0,3 \text{ см}^2$
- $10 \times 1 \times 2 = 20 \text{ мм}^2 = 0,2 \text{ см}^2$

Суммарная площадь: 3,5 см²

3. Фракции мелких размеров:

- $10 \times 8 \times 2 = 160 \text{ мм}^2 = 1,6 \text{ см}^2$
- $10 \times 0,7 \times 2 = 14 \text{ мм}^2 = 0,14 \text{ см}^2$
- $8 \times 0,7 \times 2 = 11,2 \text{ мм}^2 = 0,112 \text{ см}^2$

Суммарная площадь: 1,852 см²

Результаты экспериментальных растворов партий лигатурного золота при разной крупности гранул приведены в таблицах 21-23.

Таблица 21. Степень извлечения Au гранул крупного размера

τ (мин)	$m_{(Au)i}$	α (%)
10	200	28,57

20	250	35,71
30	300	42,86
40	340	48,57
50	400	57,14
60	450	64,29
70	500	71,43
80	540	77,14
90	600	85,71
100	620	88,57
110	640	91,43
120	660	94,29
130	670	95,71
140	680	97,14
150	690	98,57
160	700	100

Таблица 22. Степень извлечения Au гранул среднего размера

τ (мин)	$m_{(Au)i}$	α (%)
10	250	35,71
20	350	50
30	440	62,86
40	520	74,29
50	590	84,29
60	610	87,14
70	630	90
80	650	92,86
90	670	95,71
100	700	100

Таблица 23. Степень извлечения Au гранул мелкого размера

τ (мин)	$m_{(Au)i}$	α (%)
10	310	44,29
20	440	62,86
30	510	72,86
40	590	84,29
50	630	90
60	650	92,86
70	670	95,71
80	700	100

Строим график зависимости α (%) от τ (время, мин) для гранул разной крупности. К полученным кривым на графике проводим касательные к точке, соответствующей начальному моменту времени. По тангенсу угла наклона касательных находим скорость реакции ($d\alpha/d\tau$).

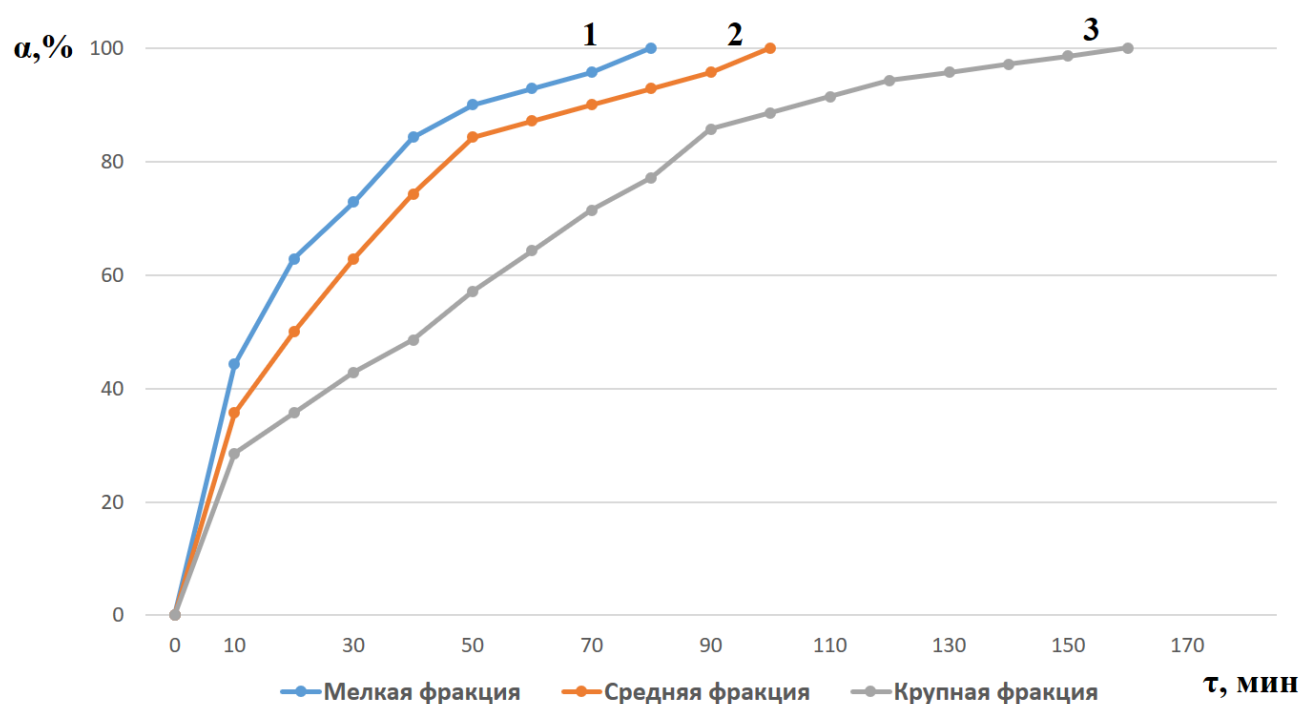


Рисунок 16 - Степень извлечения золота при разной крупности гранул

Основываясь на полученных результатах можно сделать вывод, что с уменьшением крупности исходного сырья с $S = 11,84 \text{ см}^2$ до $1,852 \text{ см}^2$ уменьшается продолжительность процесса растворения на 80 минут.

Строим график скорости растворения золота ($d\alpha/d\tau$ - τ), рисунок 17.

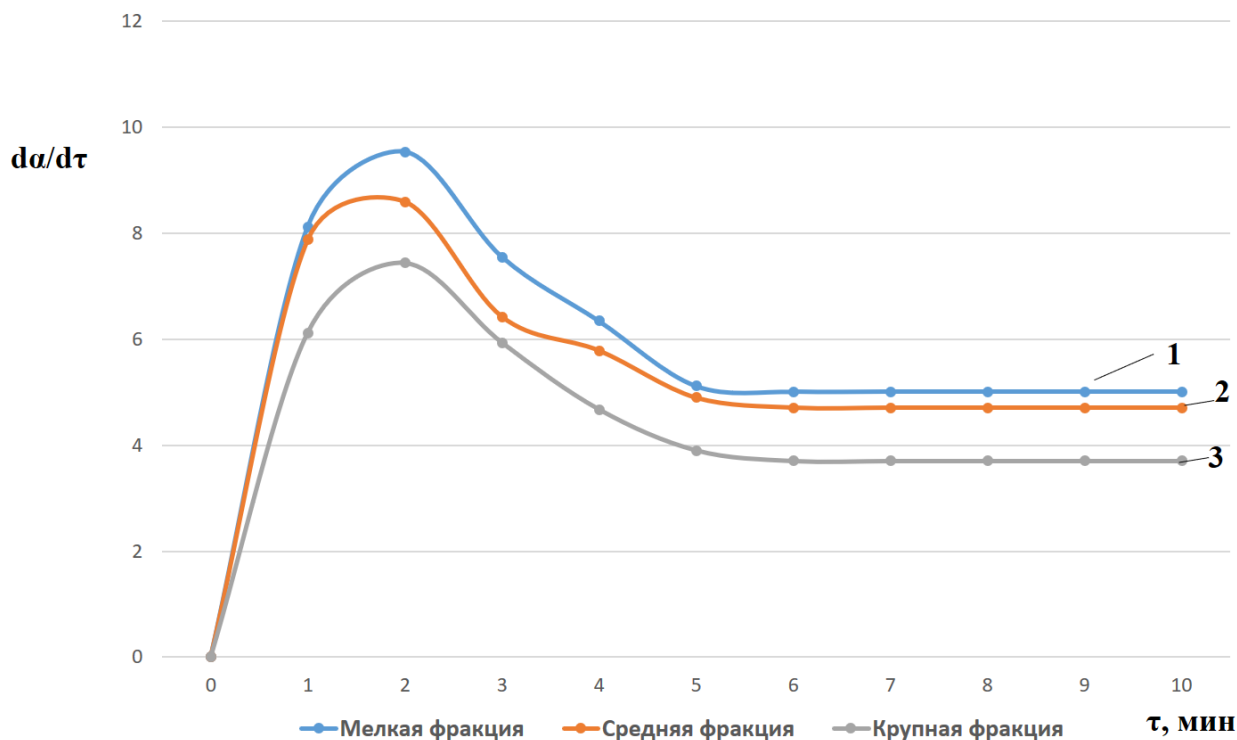


Рисунок 17 - Кинетика растворения золота при разной крупности гранул

График подтверждает, что с практической точки зрения целесообразно использовать более мелкие гранулы, размером, мм: длина - 10 ± 3 , ширина - 8 ± 1 , толщина $0,7 \pm 0,1$. Это позволит перевести в раствор больше золота в количественном отношении.

Для построения графика зависимости скорости растворения от площади гранул необходимо выполнить расчет зависимости $d\alpha/d\tau$ от S .

Партия гранул №1: $\frac{d\alpha}{d\tau} = \frac{18,5}{1} = 18,5 \frac{\%}{\text{мин}}$ $0,185 \frac{1}{\text{мин}}$

Партия гранул №2: $\frac{d\alpha}{d\tau} = \frac{27}{1} = 27 \frac{\%}{\text{мин}}$ $0,27 \frac{1}{\text{мин}}$

Партия гранул №3: $\frac{d\alpha}{d\tau} = \frac{35}{1} = 35 \frac{\%}{\text{мин}}$ $0,35 \frac{1}{\text{мин}}$

Таблица 24. Расчет $d\alpha/d\tau$ и $\sqrt{\omega}$

$d\alpha/d\tau$, 1/мин	S , см ²
0,185	6,145
0,27	3,5
0,35	1,85

График зависимости da/dt от S представлен на рисунке 18.

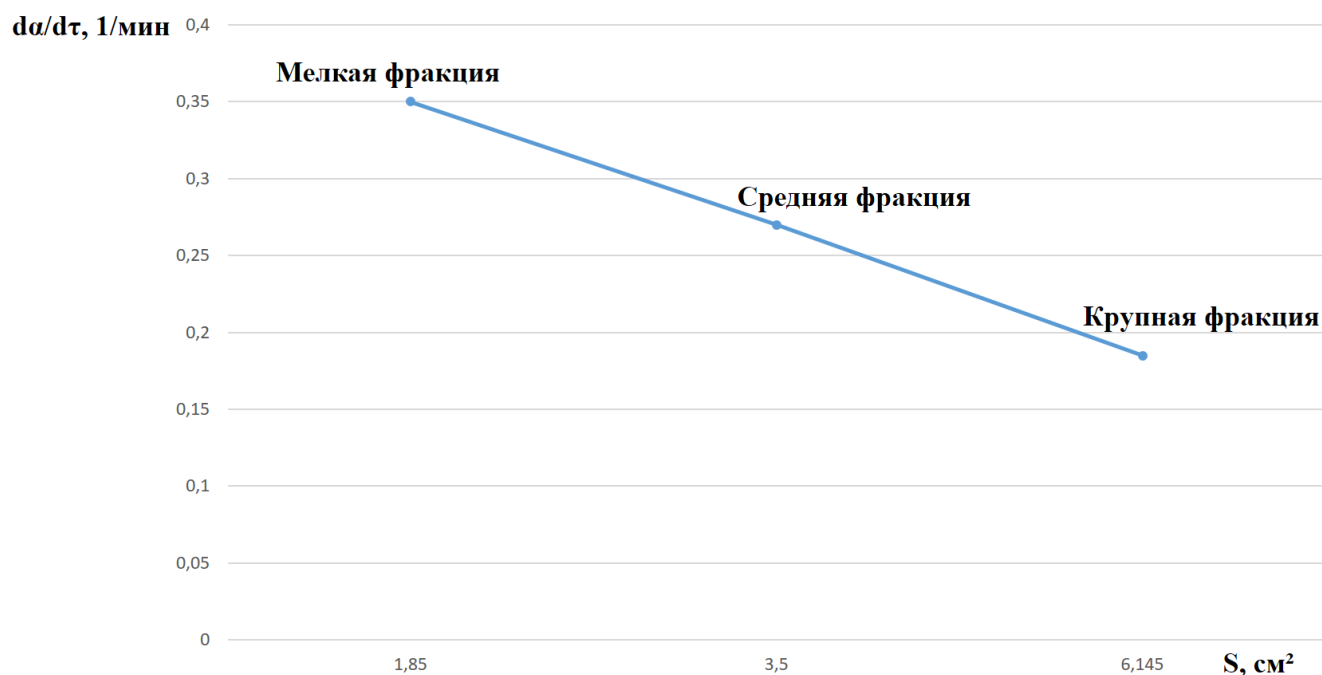


Рисунок 18 – График зависимости da/dt от S

Из графика видно, что при данной температуре увеличение скорости реакции наблюдается с уменьшением площади гранул менее 3 см^2 .

2.3.4 Кинетика царсководочного выщелачивания в зависимости от химического состава сырья

Для оценки влияния меди на извлечение золота в раствор были взяты образцы, состав которых описан в таблице 25.

Таблица 25. Состав образца гранул для оценки влияния Cu , %

№ партии	Au	Ag	Cu	Pd	Sn	Zn	Ni	Cd	Pb	Прочие
1	70	15,41	1,54	0,01	0,02	0,03	0,002	0,01	0,04	24,69
2	70	15,12	3,08	0,01	0,01	0,03	0,001	0,01	0,04	21,38
3	70	14,9	4,62	0,01	0,02	0,03	0,002	0,01	0,04	21,25
4	70	15,67	6,16	0,01	0,01	0,04	0,001	0,01	0,04	17,76

Исследование влияния содержания меди на скорость извлечения золота проводились при соотношении $\text{T:Ж} = 1:4$, температуре 80°C , при скорости вращения реактора 20 об/мин.

Результаты экспериментальных растворов партий лигатурного золота при разном содержании Cu, % приведены в таблице 26.

Таблица 26. Степень извлечения золота (α , %) при различном содержании Cu

t, мин	Извлечение Au в раствор (%)			
Cu =	1,54%	3,08%	4,62%	6,16%
10	17,14	22,86	28,57	35,71
20	22,86	28,57	35,71	44,29
30	30	35,71	42,86	52,86
40	38,57	44,29	51,43	62,86
50	47,14	52,86	57,14	71,43
60	55,71	62,86	67,14	80
70	64,29	71,43	78,57	88,57
80	72,86	80	87,14	91,43
90	78,57	88,57	92,86	97,14
100	82,86	95,71	98,57	100
110	85,71	97,14	100	-
120	87,14	98,57	-	-
130	87,14	100	-	-
140	87,14	-	-	-
150	87,14	-	-	-

Строим график зависимости α (%) от τ (время, мин). К полученным кривым на графике проводим касательные к точке, соответствующей начальному моменту времени. Полученные результаты представлены на рисунке 19.

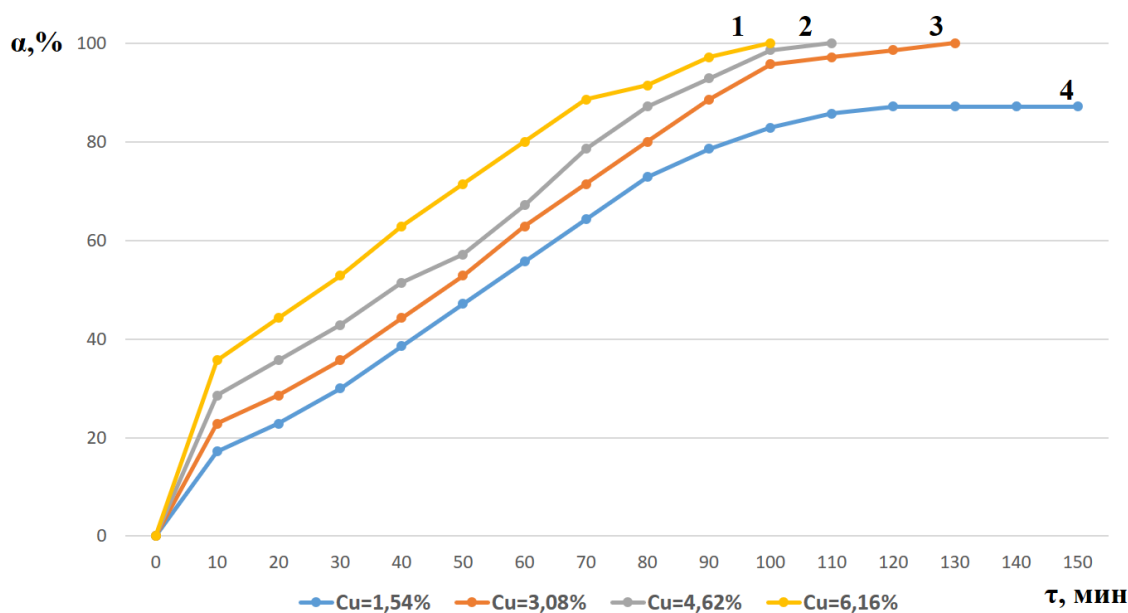


Рисунок 19 - Степень извлечения золота при разном содержании меди в исходном сырье

Полученные результаты позволяют утверждать, что увеличение процентного содержания меди относительно серебра с 10 до 40% позволяет: сократить длительность процесса растворения на 29 минут и достичь максимального извлечения золота в раствор с 87,14 % до 100 %.

Строим график скорости растворения золота ($da/d\tau$ - τ), рисунок 20.

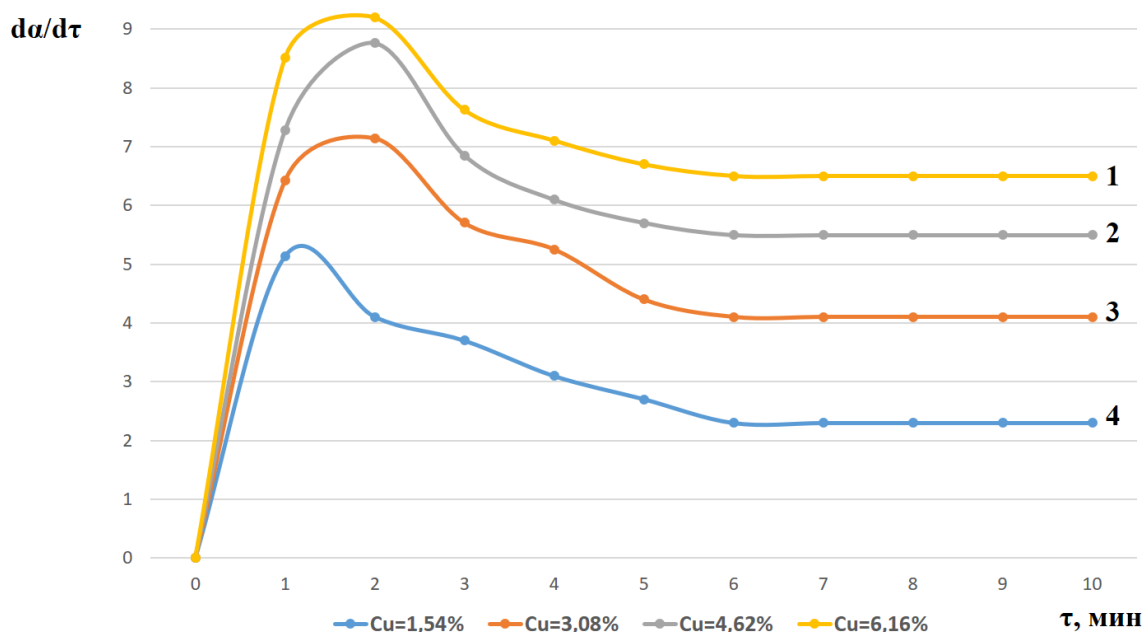


Рисунок 20 - Кинетика растворения золота при разном содержании меди

Диаграмма (рисунок 20) наглядно демонстрирует положительное влияние меди на скорость извлечения золота в раствор. Можно заметить, что максимальная скорость для кривых 2,3,4 фиксируется на 2 минуте реакции. Катализацию процесса медью можно объяснить тем, что при растворении Cu у кислот появляется доступ к раскрывающейся поверхности золота. Выделяющиеся оксиды азота способствуют уменьшению пленки хлорида серебра.

С практической точки зрения выщелачивание целесообразно проводить с добавлением в сплав меди (20-40% от массы серебра).

По тангенсу угла наклона касательных определяем скорость реакции ($d\alpha/d\tau$).

$$\text{№1: } \frac{d\alpha}{d\tau} = 14 / 0,7 = 20 \text{ \%/мин} = 0,2 \frac{1}{\text{мин}}$$

$$\text{№2: } \frac{d\alpha}{d\tau} = 12 / 0,5 = 24 \text{ \%/мин} = 0,24 \frac{1}{\text{мин}}$$

$$\text{№3: } \frac{d\alpha}{d\tau} = 18 / 0,6 = 30 \text{ \%/мин} = 0,3 \frac{1}{\text{мин}}$$

$$\text{№4: } \frac{d\alpha}{d\tau} = 20 / 0,5 = 40 \text{ \%/мин} = 0,4 \frac{1}{\text{мин}}$$

Строим графики в координатах $d\alpha/d\tau$ (1/мин) - Cu (%) (рисунок 21).

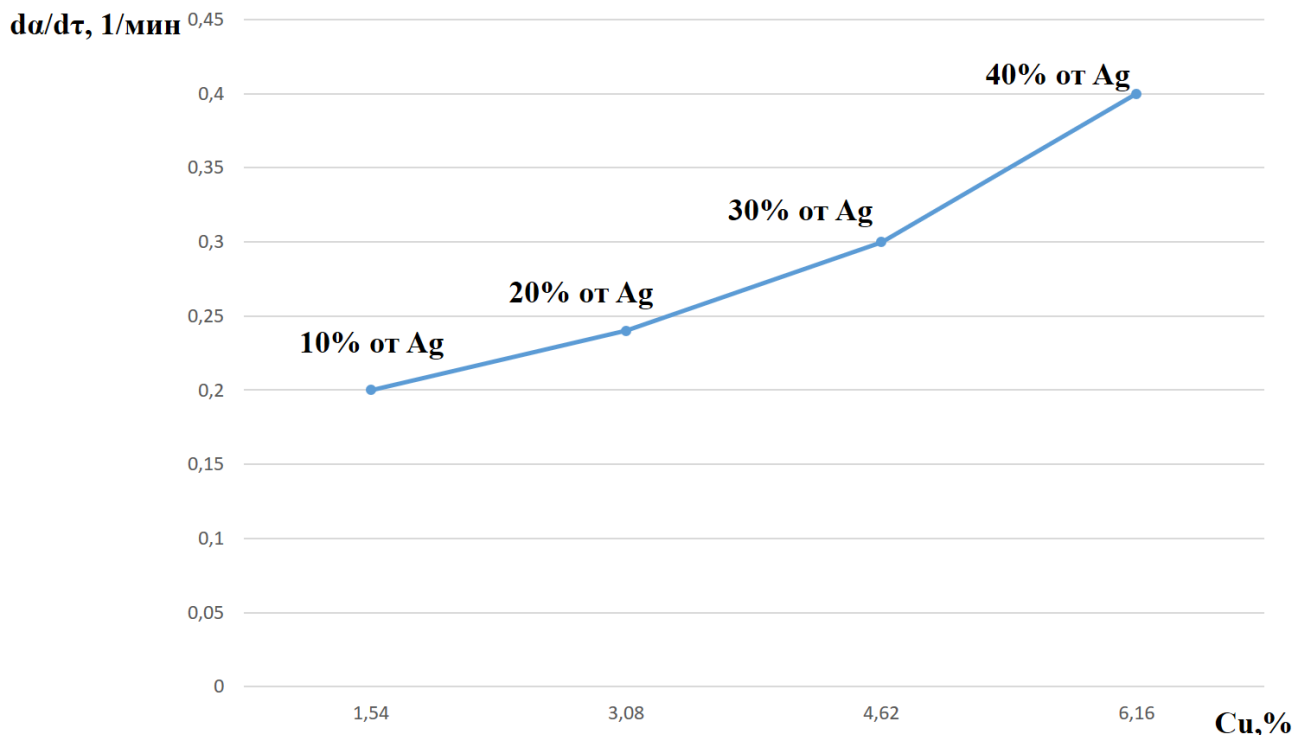


Рисунок 21 - График зависимости $d\alpha/d\tau$ от содержания Cu

Из графика видно, что чем больше меди в исходном сырье, тем выше степень извлечения золота в раствор. Дальнейшее увеличение процентного содержания Cu в исходном составе сырья значительно не повлияло на скорость растворения Au.

Необходимо оценить влияние серебра на скорость растворения золота в растворе. Состав анализируемого образца приведен в таблице 27.

Таблица 27. Состав образца гранул для оценки влияния Ag, %

№ партии	Au	Ag	Cu	Pd	Sn	Zn	Ni	Cd	Pb	Прочие
1	70	5,41	2,164	0,01	0,01	0,03	0,001	0,01	0,04	20,085
2	70	10,62	4,248	0,01	0,02	0,03	0,002	0,01	0,04	9,9
3	70	15,45	6,18	0,01	0,01	0,04	0,001	0,01	0,04	5,099

Исследование влияния содержания серебра на скорость извлечения золота проводились при соотношении Т:Ж = 1:4, температуре 80°C, при скорости вращения реактора 20 об/мин. Результаты экспериментальных растворов партий лигатурного золота при разном содержании Ag, % приведены в таблице 28.

Таблица 28. Степень извлечения золота (α , %) при различном содержании Ag

t, мин	Извлечение Au в раствор (%)		
Ag =	5,41%	10,62%	15,45%
10	35,71	28,57	21,43
20	44,29	35,71	28,57
30	52,86	42,86	35,71
40	62,86	50	42,86
50	71,43	57,14	50
60	80	64,29	57,14
70	88,57	71,43	62,86
80	91,43	77,14	68,57
90	97,14	82,86	74,29
100	100	87,14	78,57
110	-	90	82,86

120	-	92,86	87,14
130	-	95,71	90
140	-	98,57	92,86
150	-	100	94,29
160	-	-	95,71
170	-	-	97,14
180	-	-	98,57
10	-	-	100

Строим график зависимости α (%) от τ (время, мин). К полученным кривым на графике проводим касательные к точке, соответствующей начальному моменту времени. Полученные результаты представлены на рисунке 22.

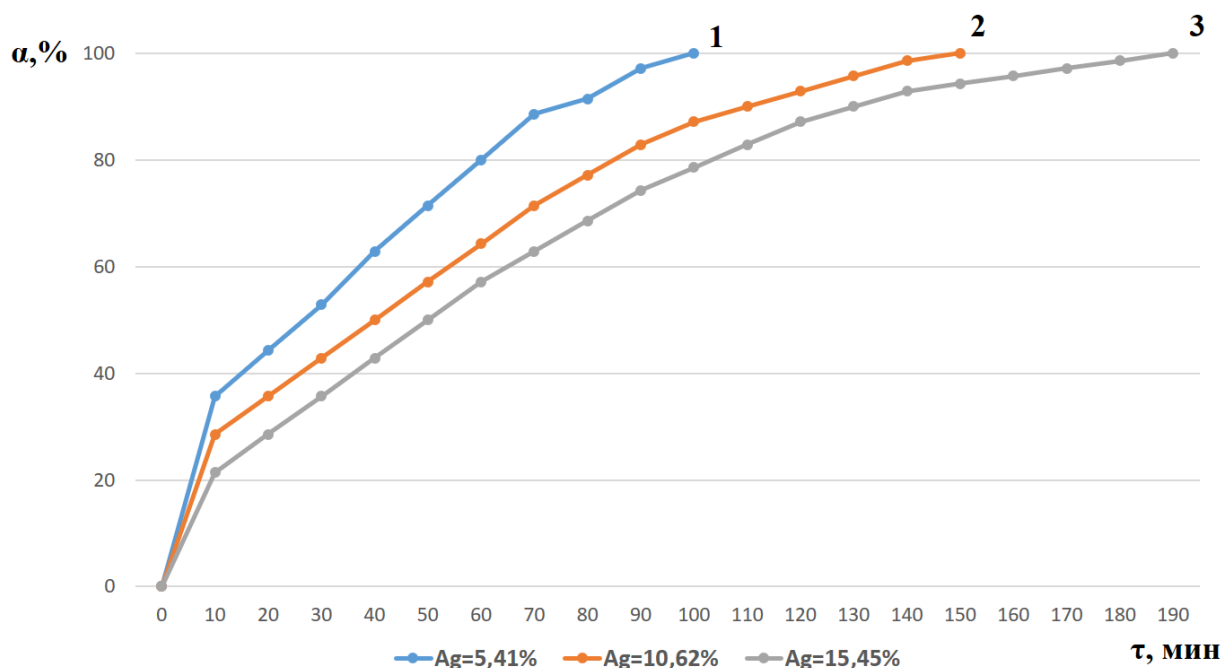


Рисунок 22 - Степень извлечения золота при разном содержании серебра в исходном сырье

Полученные результаты свидетельствуют о том, что увеличение содержания серебра в исходном составе с 5,41 % до 15,45 % увеличивает продолжительность процесса растворения на 90 %. Строим график скорости растворения золота ($d\alpha/d\tau$ - τ), рисунок 23.

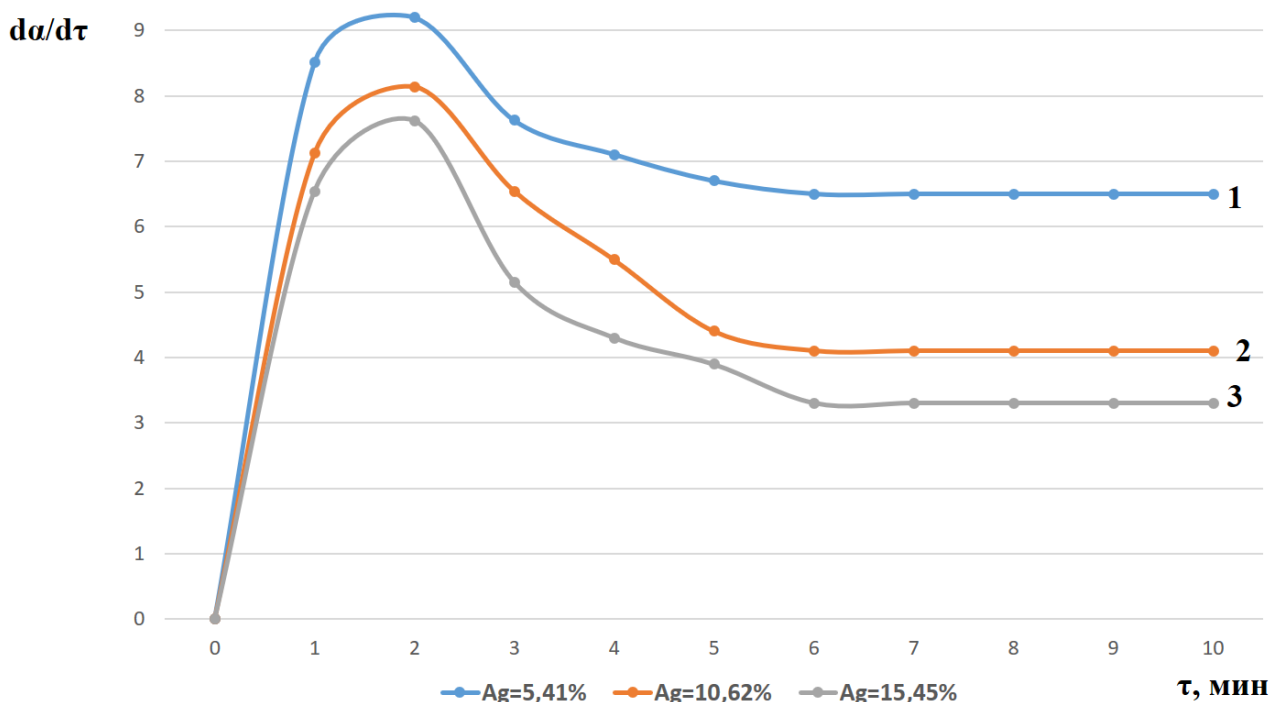


Рисунок 23 - Кинетика растворения золота при разном содержании серебра

Из диаграммы (рисунок 23) следует, что в начальный период времени на поверхности гранулы происходит растворение золота и образование хлорида серебра, толщина которого растет во времени. Скорость растворения золота из сплава вначале возрастает до максимального значения, которое соответствует образованию сплошного слоя твердого продукта, далее скорость растворения золота снижается за счет увеличения толщины твердого продукта.

В практическом отношении для эффективного царского выщелачивания целесообразно использовать гранулы с небольшим содержанием серебра (не более 8-10 %).

По тангенсу угла наклона касательных в точке $\tau=0$ находим отношение $d\alpha/d\tau$ (начальную скорость) и строим зависимость $d\alpha/d\tau$ от содержания серебра в исходном сырье.

$$\text{№1: } \frac{d\alpha}{d\tau} = 30 / 0,35 = 85,71 \text{ \%/мин} = 0,857 \text{ 1/мин}$$

$$\text{№2: } \frac{d\alpha}{d\tau} = 30 / 0,55 = 54,45 \text{ \%/мин} = 0,54 \text{ 1/мин}$$

$$\text{№3: } \frac{d\alpha}{d\tau} = 25 / 0,9 = 27,77 \text{ \%/мин} = 0,277 \text{ 1/мин}$$

Строим графики в координатах $d\alpha/d\tau$ (1/мин) - Ag (%) (рисунок 24).

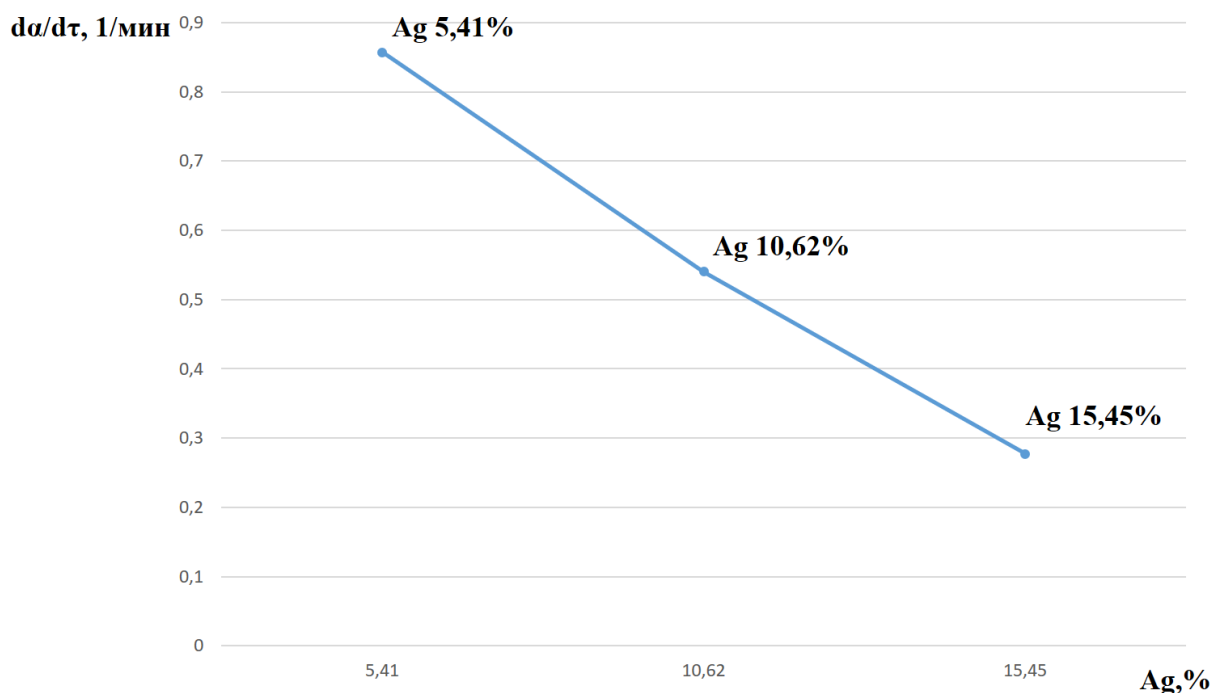


Рисунок 24 - График зависимости $d\alpha/d\tau$ от содержания Ag

Из графика видно, что с увеличением содержания серебра в исходном сырье снижается скорость реакции извлечения золота в раствор. Данный факт объясняется ростом образующегося малорастворимого хлорида серебра в виде плёнки на поверхности исходных частиц, препятствующего диффузии ионов Au.

2.3.5 Кинетика царсководочного выщелачивания в зависимости от соотношения Т:Ж

Для подбора оптимальных параметров выщелачивания проведены исследования зависимости извлечения золота в раствор при разном соотношении Т:Ж (1:3,4,5). Гранулы подбирали с разным содержанием золота (25 – 90%). Масса одной партии гранул – 1 кг, при скорости вращения реактора 10 об/мин, температуре 60 °С. Длительность продолжения выщелачивания – 2ч.

В таблице 29 представлены результаты оценки зависимости извлечения золота в раствор (%) при разном соотношения Т:Ж и количестве золота в гранулах.

Таблица 29. Извлечение золота в раствор при разном соотношении Т:Ж

№ партии	Содержание Au, %	Т:Ж	Извлечение золота в раствор, %
1	25,14	1:3	98,5
		1:4	98,7
		1:5	98,9
2	31,15	1:3	97,8
		1:4	98,6
		1:5	98,9
3	40,12	1:3	96,8
		1:4	98,5
		1:5	98,8
4	55,23	1:3	87,8
		1:4	98,6
		1:5	98,7
5	64,56	1:3	71,7
		1:4	98,6
		1:5	98,8
6	74,19	1:3	67,7
		1:4	96,6
		1:5	98,6
7	82,67	1:3	65,6
		1:4	95,3
		1:5	98,6
8	85,13	1:3	60,4
		1:4	89,2
		1:5	98,7
9	90, 12	1:3	49,3
		1:4	80,5
		1:5	98,7

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- для гранул с содержанием золота до 40% при соотношении Т:Ж = 1:3 достигается процент извлечения золота в диапазоне 96,8 - 98,5.
- для гранул с содержанием золота 40 – 75% достигается процент извлечения золота в диапазоне 96,6 - 98,6 при соотношении Т:Ж = 1:4.
- для гранул с содержанием золота 75% и выше достигается процент извлечения золота в диапазоне 98,6 - 98,7 при соотношении Т:Ж = 1:5.

Последующее увеличение объема добавляемых кислот для каждого случая

незначительно влияет на результативность извлечения.

Результаты средней оценки извлечения золота в раствор при разном соотношении Т:Ж и содержании Au представлены на рисунке 25.

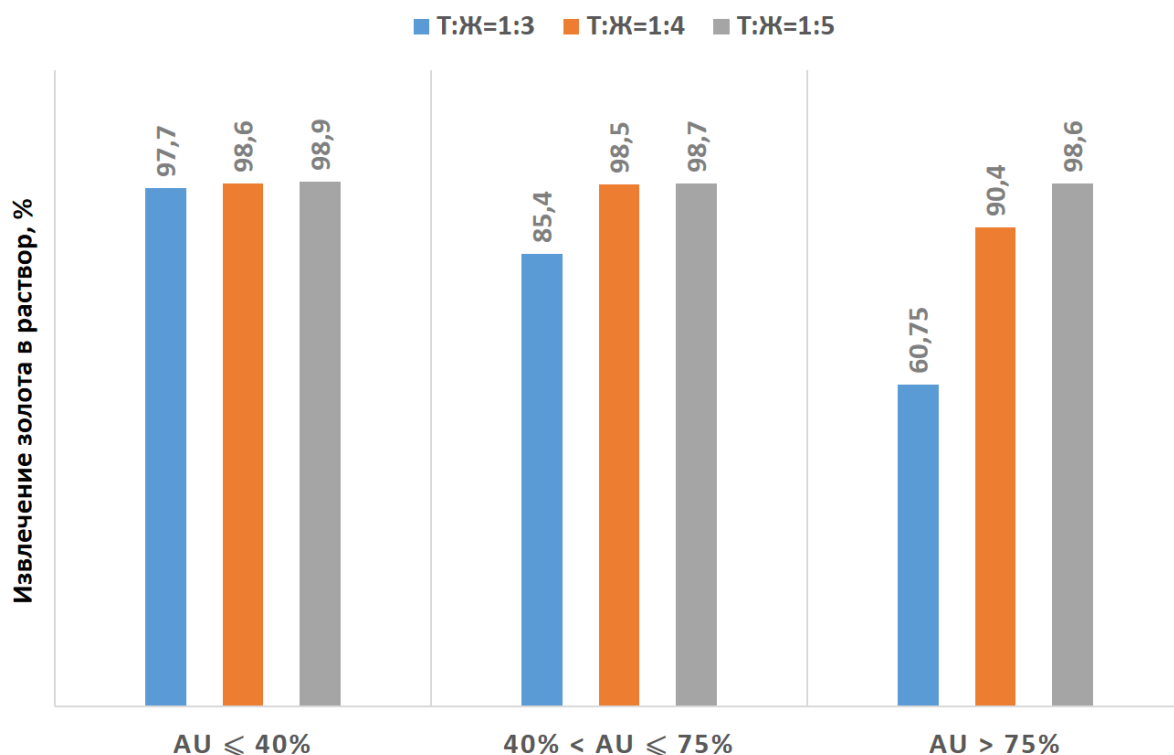


Рисунок 25 - Зависимость извлечения золота в раствор (%) при разном соотношении Т:Ж и содержании Au

В ходе исследования особое внимание уделялось отделению серебра от золота, так как Ag занимает существенную долю среди примесей и напрямую оказывает влияние на качество золотого порошка, получаемого при осаждении. Для подбора оптимальных параметров выщелачивания проведено исследование влияния объема добавляемой в конце реакции растворения деионизированной воды на крупность фракции твердого остатка хлорида серебра. Для расчета объема воды отталкивались от суммарного объема азотной и соляной кислоты.

Исследования проводились на гранулах массой 1кг с одинаковым содержанием серебра (15-16%) и золота (65-70%), при разной скорости и длительности вращения реактора (0-20 об/мин), в диапазоне температур (30-60°C), при разном соотношении Т:Ж (1:3,4,5) и длительности продолжения выщелачивания – 2ч. Результаты представлены на рисунках 26-30.

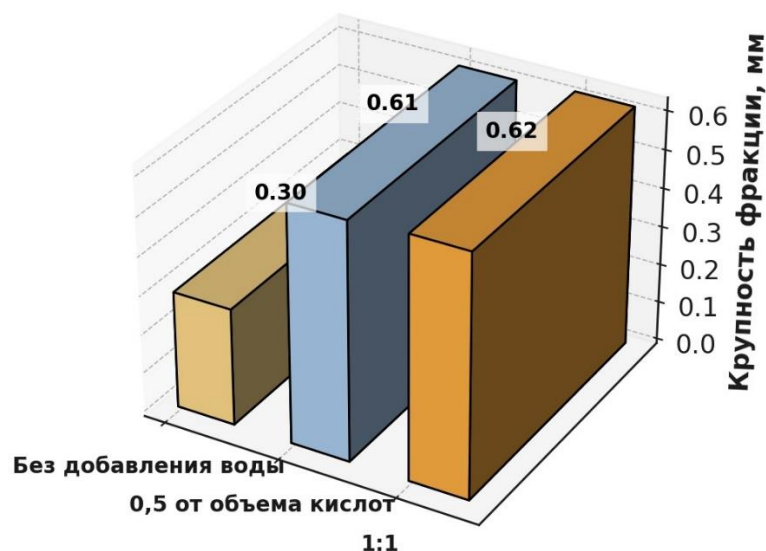


Рисунок 26 – Зависимость крупности фракции AgCl от объема деионизированной воды ($T=30^{\circ}\text{C}$, 10 об/мин, $T:Ж = 1:4$, длительность вращения – 15 минут)

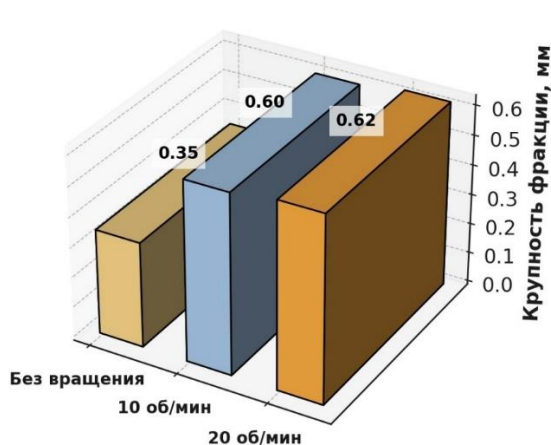


Рисунок 27 – Зависимость крупности фракции AgCl от скорости вращения реактора ($T=30^{\circ}\text{C}$, $T:Ж = 1:4$, длительность вращения – 15 минут, объем воды – 0,5 от объема кислот)

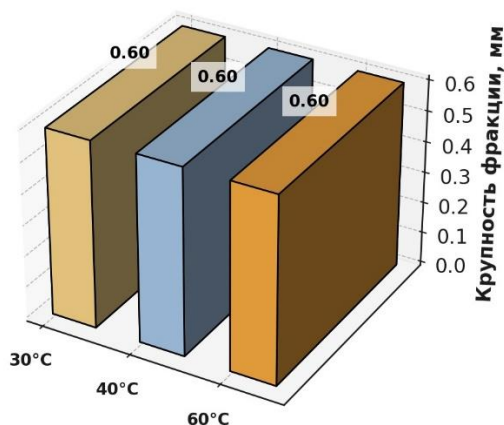


Рисунок 28 – Зависимость крупности фракции AgCl от температуры раствора (скорость вращения -10 об/мин, $T:Ж = 1:4$, длительность вращения – 15 минут, объем воды – 0,5 от объема кислот)

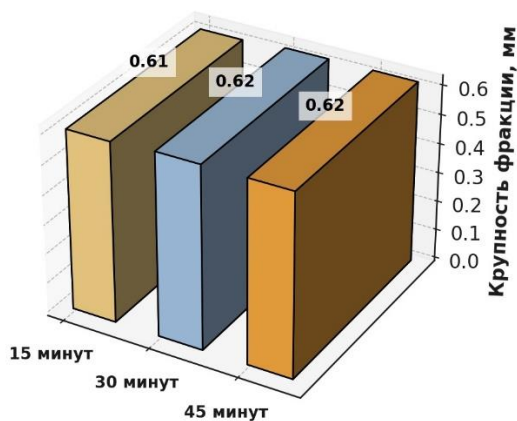


Рисунок 29 – Зависимость крупности фракции AgCl от длительности вращения (скорость вращения -10 об/мин, Т:Ж = 1:4, Т=30°C, объем воды – 0,5 от объема кислот)

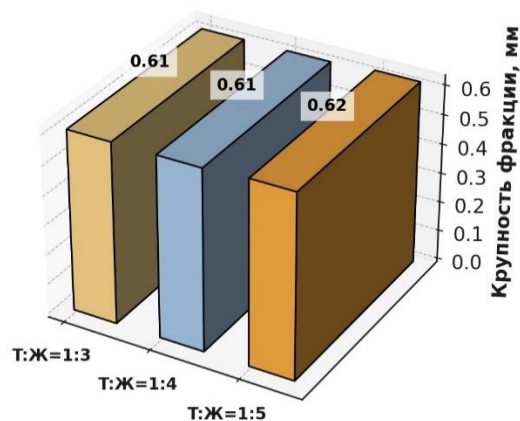


Рисунок 30 – Зависимость крупности фракции AgCl от соотношения Т:Ж (скорость вращения -10 об/мин, продолжительность вращения 15 мин, Т=30°C, объем воды – 0,5 от объема кислот)

Результаты проведенных исследований позволяют утверждать, что на крупность хлорида серебра преимущественно оказывают влияние 2 фактора: объем деионизированной воды и скорость вращения реактора. Соотношение Т:Ж, температура и длительность вращения реактора не оказывают существенного влияния на рост твердого остатка AgCl.

Увеличение роста фракции хлорида серебра с 300 мкм до 600 мкм наблюдается при добавлении воды в объеме 0,5 от объема царского раствора и скорости вращения реактора – 10 об/мин. Ускорение вращения до 20 об/мин, а также увеличение объема подаваемой воды незначительно сказывается на крупности фракций - прирост наблюдается на 10 мкм.

После разбавления водой царского раствора происходит его охлаждение и осаждение серебра за счет разложения комплексов AgCl_4^{3-} и AgCl_3^{2-} до AgCl и частично до AgCl_2^- . Доосажденный из раствора хлорид серебра концентрируется с основным количеством AgCl в кеке выщелачивания [1].

С практической точки зрения увеличение роста твердого остатка AgCl имеет важное значение в момент фильтрации полученного раствора. Фракции меньшей

крупности 300 – 400 мкм просачиваются сквозь тканевую поверхность нутч-фильтра и попадают на дальнейшее осаждение, что в конечном итоге приводит к браку золотосодержащего порошка.

2.4 Математическое моделирование процесса растворения золота

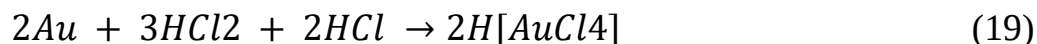
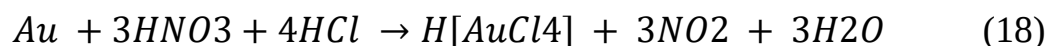
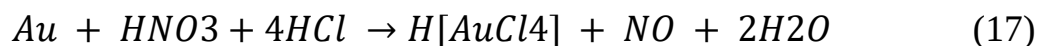
В ходе проведения натурных экспериментов определен набор параметров, оказывающих влияние на результат выщелачивания золота в процессе кислотного растворения, а именно:

1. Состав сырья - золото (%).
2. Состав сырья - серебро (%).
3. Состав сырья - медь (%).
4. Крупность гранул (мм).
5. Масса гранул (кг).
6. Объем азотной кислоты (л).
7. Объем соляной кислоты (л).
8. Объем деионизированной воды (л).
9. Скорость вращения реактора (оборотов/мин).
10. Длительность реакции (ч).
11. Температура раствора (°C).
12. Скорость подачи азотной кислоты (л/мин).
13. Скорость подачи соляной кислоты (л/мин).
14. Скорость подачи воды (л/мин).

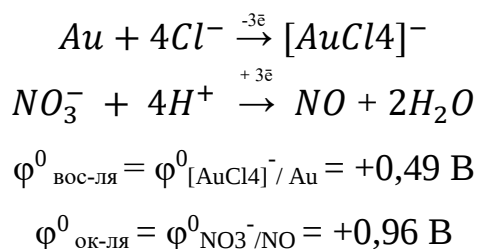
С целью определения оптимальных режимов протекания технологии с максимальным извлечением золота в раствор построена математическая модель процесса с помощью программного комплекса «ReactOp», используемого для оценки динамических характеристик сложных химических реакций, основываясь на экспериментальных данных из п.2.3. Эффективность использования данного продукта продемонстрирована в работе [12], в которой идет речь об автоматизации процесса тиосульфатного выщелачивания золота.

Для построения модели использованы следующие реакции с золотом при

кислотном выщелачивании золотосодержащих материалов.



Расчет константы равновесия для реакции (17):



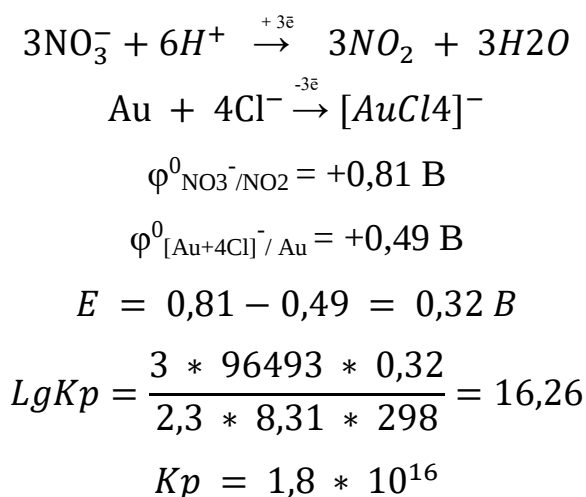
Электродвижущая сила (E) реакции 17:

$$E = \varphi^0_{\text{ок-ля}} - \varphi^0_{\text{вос-ля}} = +0,96 - 0,49 = 0,47 \text{ В}$$

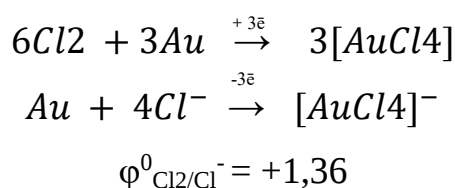
Расчет константы равновесия выполнен по формуле (20):

$$\begin{aligned} \lg Kp &= \frac{n \cdot F \cdot E}{2,3 RT} \quad (20) \\ LgKp &= \frac{3 \cdot 96493 \cdot 0,47}{2,3 \cdot 8,31 \cdot 298} = 23,88 \\ Kp_{298} &= 7,58 \cdot 10^{23} \end{aligned}$$

Расчет константы равновесия для реакции (18):



Расчет константы равновесия для реакции (19):



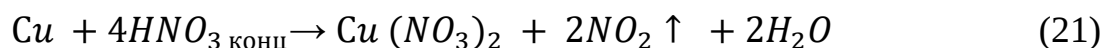
$$\varphi^0_{[\text{AuCl}_4]^-/\text{Au}} = +0,49$$

$$E = 1,36 - 0,49 = 0,87 \text{ В}$$

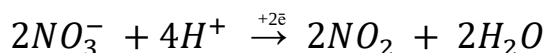
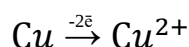
$$LgKp = \frac{3 * 96493 * 0,87}{2,3 * 8,31 * 298} = 41,21$$

$$Kp = 1,6 * 10^{41}$$

Наиболее вероятная реакция для меди в ходе кислотного растворения гранул (21):



Расчет константы равновесия для реакции 21:



$$\varphi^0_{\text{вос-ля}} = \varphi^0_{\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}} = +0,34 \text{ В}$$

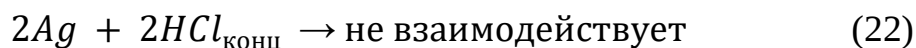
$$\varphi^0_{\text{ок-ля}} = \varphi^0_{\text{NO}_3^-/\text{NO}_2} = +0,81 \text{ В}$$

$$E = \varphi^0_{\text{ок-ля}} - \varphi^0_{\text{вос-ля}} = +0,81 - 0,34 = 0,47 \text{ В}$$

$$LgKp = \frac{2 * 96493 * 0,47}{2,3 * 8,31 * 298} = 15,92$$

$$Kp = 8,32 * 10^{15}$$

Реакция взаимодействия серебра и соляной кислоты (22):



$$\text{PrAgCl} = 1,8 * 10^{-10}$$

$$\text{PrAgCl} = [\text{Ag}^+] * [\text{Cl}^-] = 1,8 * 10^{-11}$$

Низкое значение произведения растворимости свидетельствует о том, реакция $\text{AgCl} \leftrightarrow \text{Ag}^+ + \text{Cl}^-$ смещена влево.

Алгоритмы подбора оптимальных режимов в программе «ReactOp» основываются на кинетических параметрах реакции, описываемых уравнением Аррениуса (23)

$$\begin{cases} K(T) = \exp\left(\ln(K_0) - \frac{E}{RT}\right) \\ K_0 = \exp(\ln(K_0)), \end{cases} \quad (23)$$

где K – константа скорости реакции $[(\text{м}^3/\text{кмоль})^2 * \text{мин}^{-1}]$; K_0 –

предэкспоненциальный множитель $[(\text{м}^3/\text{кмоль})^2 * \text{мин}^{-1}]$; E – энергия активации, $[\text{кДж/моль}]$; R – универсальная газовая постоянная $[\text{кДж}/(\text{моль} * \text{К})]$; T – температура $[\text{К}]$.

Решение системы уравнений (23) выполнялось в подпрограмме Experiment Wizard, позволяющей использовать данные по кинетике процесса, полученные экспериментальным путем в п. 2.3 для моделирования кислотного выщелачивания технологии с набором параметров, определенных в начале настоящего раздела. Прогнозирование результата химических реакций выполняется в программе, исходя из условия минимального рассогласования экспериментальных и расчетных данных, полученных путем численного интегрирования дифференциальных кинетических уравнений.

Запуск модели осуществлялся на примере 5 реакций, исходные данные и режимы которых определены в таблице 30 при условиях соблюдения следующих режимов: $T:Ж = 1:5$, $T = 80^\circ\text{C}$, скорость вращения реактора - 20 об/мин, продолжительность растворения бч, скорость подачи азотной кислоты – 4 л/мин, соляной – 5 л/мин, воды – 30 л/мин.

Таблица 30 – Исходные данные для запуска модели

№ реакции	Состав гранул, %			Размер гранул, мм			Масса гранул, кг
	Золото	Серебро	Медь	Длина	Ширина	Толщина	
1	59,63	5,93	3,3	10,47	7,85	0,68	65,823
2	59,28	3,67	4,44	10,61	7,64	0,66	62,37
3	59,82	4,66	4,64	9,98	7,47	0,74	59,478
4	59,41	4,27	3,89	10,3	8,08	0,75	62,203
5	59,73	3,93	3,86	10,02	8,79	0,71	64,646

Объем прогнозируемого программой извлечения золота в раствор, массы нерастворимого осадка и содержания в нем Au приведен в таблице 31.

Таблица 31 – Прогнозные значения математической модели

№ реакции	Прогнозные значения		
	Масса нерастворимого осадка, кг	Содержание Au в осадке, г	Извлечение Au в раствор, %
1	0,729	10,27	99,4121779
2	0,627	5,35	98,24454798
3	0,29	7,01	99,70665769
4	0,326	6,32	98,67001291
5	0,247	10,94	99,33314481

На основании полученных результатов на рисунке 31 представлено сравнение фактических и прогнозных значений, определенных математической моделью.

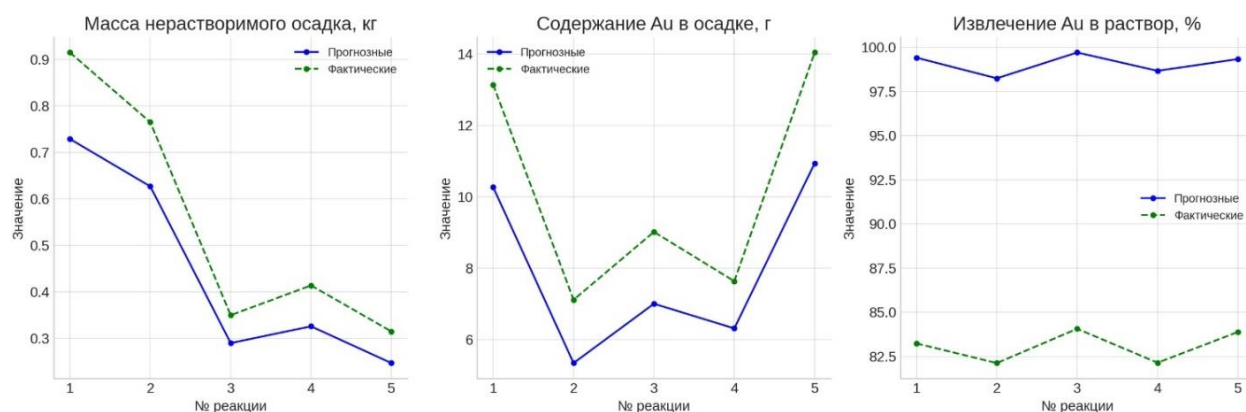


Рисунок 31 - Сопоставление результатов прогноза математической модели и фактических данных

Из рисунка 31 видно, что точность прогноза математического аппарата составляет:

- в части расчета массы нерастворимого осадка: 80,33%;
- в части расчета содержания Au в нерастворимом осадке: 78,33%;
- в части расчета извлечения золота в раствор: 80,77%.

Полученная точность прогноза является достаточно низкой для использования математической модели в автоматизированной системе управления данной технологией. Низкую точность модели можно объяснить большим количеством факторов, влияющих на процесс, наличием скрытых зависимостей

между параметрами и недостаточным объемом химических реакций, используемых при описании процесса.

2.5 Выводы по главе 2

По результатам проведения имитационного моделирования технологии кислотного аффинажа на производстве и эмпирических исследований кинетических зависимостей можно сделать следующие выводы:

1. В результате моделирования технологии кислотного аффинажа была произведена оценка времени выполнения отдельных операций процесса. По результатам 420 имитационных экспериментальных запусков выявлена средняя длительность операции растворения золотосодержащих гранул – 8 ч 35 мин 12 сек. Данное значение превышает верхнюю границу времени по регламенту (6ч) более, чем на 2 часа. Данный факт обуславливает наличие проблемного участка кислотной технологии аффинажа золота в операции по выщелачиванию золотосодержащих гранул.

2. В ходе анализа документации на предприятии АО «МЗСС» по процессу растворения установлены показатели эффективности процесса, а на основе накопленной статистики предприятия с 2020 по 2024 г.г. посчитаны их текущие значения, а именно:

- % извлечения золота в раствор: 91 – 95;
- масса нерастворимого осадка, кг: 7,2 – 9,1;
- % брака золотого порошка: 8 – 10;
- объем хлорида серебра после первичного растворения, %: 1,15 – 2,10;
- длительность выщелачивания, ч: 5 – 9;
- объем гранул, добавляемый к новой партии растворения, %: 5 – 7.

В результате логического анализа причинно-следственных связей установлены корневые причины выявленных недостатков, а именно: низкая адаптивность процесса под меняющийся химический состав исходного материала, высокое влияние человеческого фактора, попадание мелких фракций хлорида серебра в раствор, поступающий на осаждение, отсутствие контроля за изменением

динамических параметров химических реакций в режиме реального времени, рост объема переплавленного в гранулы нерастворимого осадка.

3. На основании проведенных исследований кинетических зависимостей кислотного растворения золотосодержащих гранул установлено:

— скорость выщелачивания зависит от скорости вращения реактора; скорость процесса лимитируется диффузией через слой образовавшегося хлорида серебра на поверхности исходных частиц минерал; с целью увеличения скорости выщелачивания необходимо увеличить частоту вращения реактора;

— анализ результатов исследования по влиянию крупности гранул на скорость растворения золота показал, что с практической точки зрения целесообразно использовать более мелкие гранулы, размером, мм: длина -10 ± 3 , ширина -8 ± 1 , толщина $0,7 \pm 0,1$. Это позволит перевести в раствор больше золота в количественном отношении;

— анализ результатов исследования по влиянию содержания меди в исходном составе на скорость растворения Au показал, что увеличение содержания меди в исходном сырье на 10% относительно содержания серебра увеличивает % извлечения Au в раствор. Катализация процесса медью можно объяснить тем, что при растворении Cu у кислот появляется доступ к раскрывающейся поверхности золота. Выделяющиеся оксиды азота способствуют уменьшению пленки хлорида серебра. С практической точки зрения выщелачивание целесообразно проводить с добавлением в сплав меди (20-40% от массы серебра);

— анализ результатов исследования по влиянию содержания серебра в исходном составе на скорость растворения Au показал, что в начальный период времени на поверхности гранулы происходит растворение золота и образование хлорида серебра, толщина которого растет во времени. Скорость растворения золота из сплава вначале возрастает до максимального значения, которое соответствует образованию сплошного слоя твердого продукта, далее скорость растворения золота снижается за счет увеличения толщины твердого продукта. В практическом отношении для эффективного царсководочного выщелачивания

целесообразно использовать гранулы с небольшим содержанием серебра (не более 8-10 %);

— анализ результатов исследования по влиянию соотношения Т:Ж на скорость растворения Au показал, что для гранул с содержанием золота до 40% при соотношении Т:Ж = 1:3 достигается процент извлечения золота в диапазоне 96,8 - 98,5. Для гранул с содержанием золота 40 – 75% достигается процент извлечения золота в диапазоне 96,6 - 98,6 при соотношении Т:Ж = 1:4. Для гранул с содержанием золота 75% и выше достигается процент извлечения золота в диапазоне 98,6 - 98,7 при соотношении Т:Ж = 1:5. Последующее увеличение объема добавляемых кислот для каждого случая незначительно влияет на результативность извлечения;

— анализ результатов исследования по влиянию технологических параметров на рост крупности фракции хлорида серебра показал, что увеличение роста с 300 мкм до 600 мкм наблюдается при добавлении воды в объеме 0,5 от объема царсководочного раствора и скорости вращения реактора – 10 об/мин. Ускорение вращения до 20 об/мин, а также увеличение объема подаваемой воды незначительно сказывается на крупности фракций - прирост наблюдается на 10 мкм. Соотношение Т:Ж, температура и длительность вращения реактора не оказывают существенного влияния на рост твердого остатка AgCl.

4. Прогноз целевых параметров процесса с применением математической модели, построенной на основе кинетических данных, показал точность на уровне 78,33 – 80,77%. Низкую точность модели можно объяснить большим количеством факторов, влияющих на процесс и недостаточным объемом химических реакций, используемых для описания взаимодействия компонентов гранул и реагентов.

С целью выявления скрытых зависимостей между параметрами процесса необходимы обработка и анализ информации с применением моделей, обеспечивающих получение достоверных прогнозов при отсутствии аналитических моделей, адекватно описывающих связь между физико-химическими параметрами. В качестве таких моделей могут быть использованы

классические нейросетевые модели или их ансамбли. Данный подход позволит расширить первоначальный реестр влияющих на результат процесса факторов, выявить аномалии в ходе кислотного выщелачивания золота и создать основу для предиктивного управления производственным процессом. Переход к проактивному управлению будет достигаться за счет анализа неочевидных тенденций в данных, которые будут поступать с промышленных датчиков в модель обученной нейросети с целью заблаговременного выявления отклонений и предупреждения ответственного сотрудника в режиме реального времени.

В ходе проведения натурных экспериментов сформирована совокупность примеров реакций, обогащающих dataset, сформированный на основе анализа ретроспективных данных и используемый для дальнейшего обучения нейросетевой модели прогнозирования целевых параметров процесса в объеме 3000 записей.

Глава 3. Разработка нейросетевой модели прогнозирования целевых параметров и определения технологических режимов растворения золотосодержащих гранул

3.1 Постановка задачи нейросетевого моделирования

В ходе проведения натурного исследования в главе 2, а также сбора исторических данных из контрольных свидетельств и журналов по контролю растворения золота в период с 2018 по 2024 г.г., имеющихся на предприятии, сформирован dataset с описанием исходных данных, показателями протекания реакций и полученными в итоге результатами. Дополнительно проведена экспертная оценка выхода каждого процесса (неудовлетворительный, приемлемый и отличный). Анализируемый dataset состоит из 3000 записей, которые были традиционно разбиты на обучающую, валидационную и тестовую выборки в соотношении 80, 10 и 10% соответственно.

Первая выборка использована для обучения модели с учетом настройки параметров и выявления закономерностей в данных. Валидационная выборка применяется в качестве промежуточного теста для настройки гиперпараметров модели и проверки её производительности во время обучения. Данные тестовой выборки используются для контроля и оценки производительности нейронной сети.

В ходе исследования проанализированы показатели состава сырья, а также параметры протекания реакции и их степень влияния на процент полезного выхода. Первоначальный состав входных параметров для обучения нейросетевой модели:

1. Состав сырья - золото (%).
2. Состав сырья - серебро (%).
3. Состав сырья - медь (%).
4. Крупность гранул (мм).
5. Масса гранул (кг).
6. Объем азотной кислоты (л).
7. Объем соляной кислоты (л).

8. Объем деионизированной воды (л).
9. Скорость вращения реактора (оборотов/мин).
10. Длительность реакции (ч).
11. Температура раствора (°C).
12. Скорость подачи азотной кислоты (л/мин).
13. Скорость подачи соляной кислоты (л/мин).
14. Скорость подачи воды (л/мин).

Прогнозирование результатов протекания реакций является инструментом для оценки ее эффективности и целесообразности. Схема обработки данных в прогнозной модели представлена на рисунке 32.

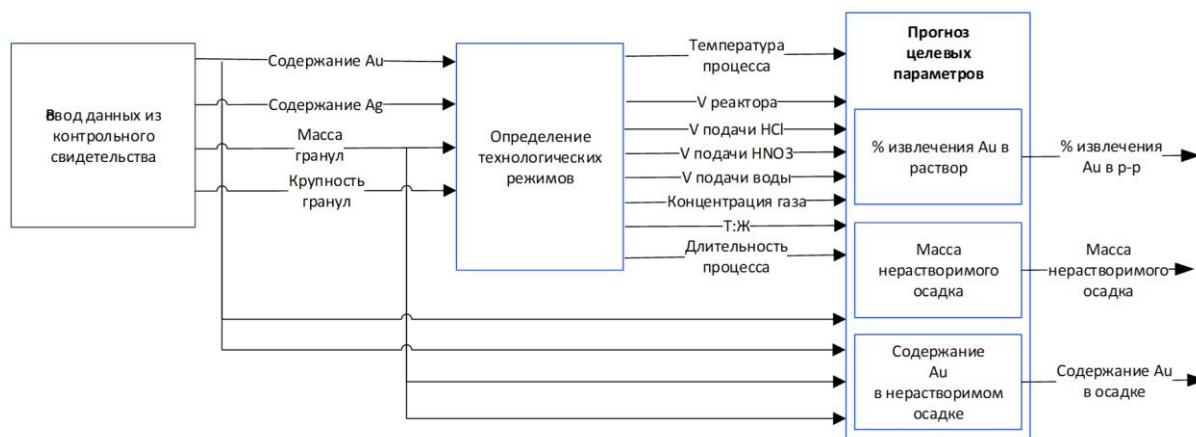


Рисунок 32 – Схема обработки данных в прогнозной модели

Алгоритм работы предложенной модели сводится к следующему: аппаратчик указывает входные данные (массу партии, крупность гранул, химический состав) для определения технологических режимов из контрольного свидетельства, поступившего вместе с партией на растворение, а именно: температура процесса, скорость подачи реактивов, концентрация газа, соотношение Т:Ж, длительность операции. Следующим этапом, на основании полученных режимов и исходных данных свидетельства, прогнозируются целевые параметры процесса: степень извлечения золота в раствор, масса нерастворимого осадка и содержание в нем золота.

В качестве инструмента, помогающего специалисту оценить качественный и количественный выход реакций в зависимости от состава сырья, а также от

ключевых факторов, влияющих на протекание самой реакции, предлагается использовать ансамбль искусственных нейронных сетей (ИНС) прямого распространения (Feed-Forward Neural Network). В ходе исследования сравнивались два состава ансамблей, состоящих из двух и трех ИНС.

В обеих вариациях предполагалось наличие ИНС, формирующей общую экспертную оценку протекания реакции. В качестве такой оценки использовался метод присвоения статуса результата «красный» (неудовлетворительный) - «желтый» (приемлемый) – «зеленый» (отличный) – ("red-amber-green" - RAG). В зависимости от полученной оценки алгоритмом работы ансамбля определялась необходимость выполнения дальнейших расчетов по прогнозированию результатов реакции.

Для оценки выхода в ансамбле используются ИНС, предсказывающие массу нерастворимого осадка (кг) и содержание (%) Au в нерастворимом осадке. Исследовались два варианта реализации модели, а именно: с использованием одной ИНС, вычисляющей оба параметра, и двух независимых ИНС для вычисления каждого выходного параметра. Алгоритмы функционирования моделей при решении задачи поддержки принятия решений на основе прогнозных значений параметров представлены на рисунках 33 и 34. Исходя из полученной обобщающей способности предсказывающих ИНС будет выбрана их ансамблевая компоновка.

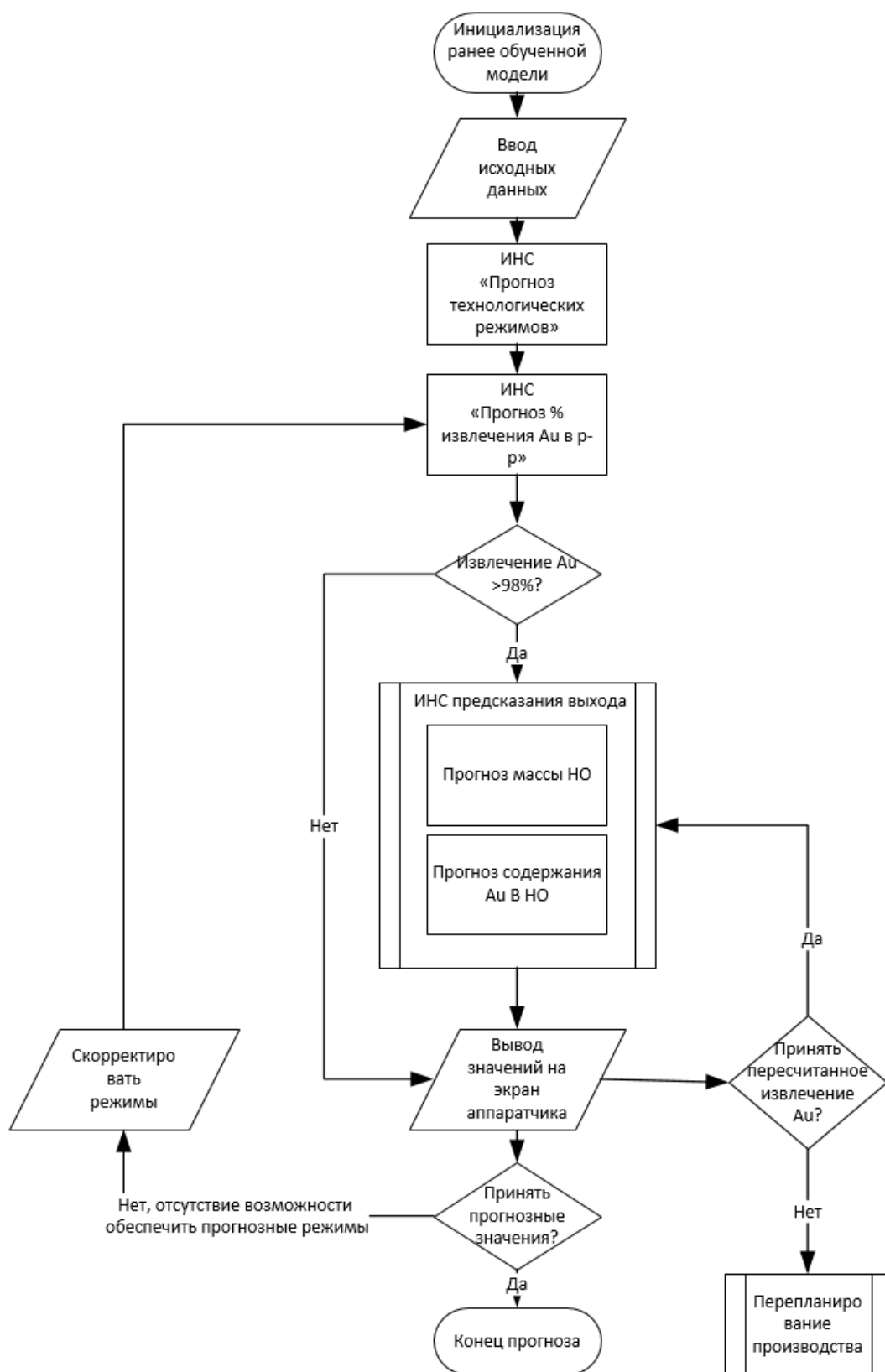


Рисунок 33 – Алгоритм поддержки принятия решения с ИНС, прогнозирующей оба выходных параметра

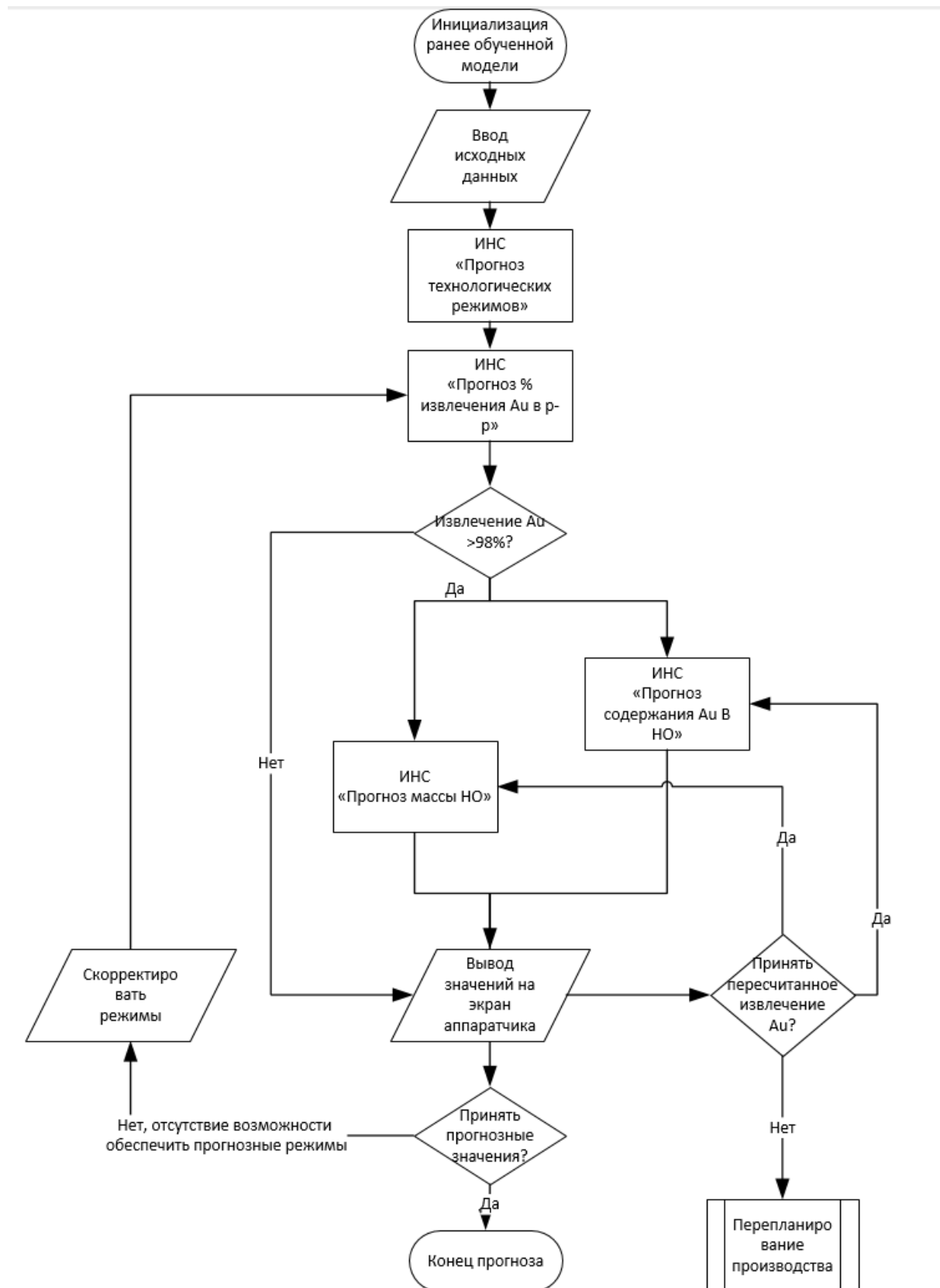


Рисунок 34 - Алгоритм поддержки принятия решения с двумя ИНС для прогнозирования каждого выходного параметра по отдельности

Описание представленных на рисунках 33 и 34 алгоритмов поддержки принятия решения в процессе подбора оптимальных режимов растворения исходного сырья приведено в формате сценария вариантов использования в таблице 32.

Таблица 32 – Сценарий варианта использования

Идентификатор и название	УС_1. Подбор оптимальных режимов растворения гранул
Действующее лицо	Аппаратчик
Условие-триггер	Поступила партия Зл б/пр на кислотное растворение
Предварительные условия	– сотрудник имеет доступ к системе; – сотрудник имеет контрольное свидетельство с описанием исходных данных.
Выходные условия	– режимы, спрогнозированные ИНС, приняты; – режимы, спрогнозированные ИНС, приняты с учетом корректировки сотрудника; – режимы, спрогнозированные ИНС, не приняты из-за отсутствия возможности производственного обеспечения.
Нормальное направление	1. Режимы, спрогнозированные ИНС, приняты. 1.2 Сотрудник осуществляет ввод исходных данных на основании контрольного свидетельства. 1.3 ИНС определяет технологические режимы. 1.4 ИНС прогнозирует % извлечения золота в раствор.

	1.5 ИНС прогнозирует массу нерастворимого осадка и содержание в нем золота. 1.6 Сотрудник подтверждает прогнозные значения на экране.
Альтернативное направление №1	2. Режимы, спрогнозированные ИНС, приняты с учетом корректировки сотрудника. 2.1 Сотрудник осуществляет ввод исходных данных на основании контрольного свидетельства. 2.2 ИНС прогнозирует технологические режимы. 2.3 ИНС прогнозирует % извлечения золота в раствор. 2.4 ИНС прогнозирует массу нерастворимого осадка и содержание в нем золота. 2.5 Сотрудник корректирует технологические режимы, предложенные ИНС. 2.6 ИНС прогнозирует % извлечения золота в раствор. 2.7 Если объем извлечения удовлетворяет требованиям производства сотрудник подтверждает прогнозные значения на экране.
Альтернативное направление №2	3. Режимы, спрогнозированные ИНС, не приняты из-за отсутствия возможности производственного обеспечения 3.1 Сотрудник осуществляет ввод исходных данных на основании контрольного свидетельства.

	3.2 ИНС прогнозирует технологические режимы. 3.3 ИНС прогнозирует % извлечения золота в раствор. 3.4 ИНС прогнозирует массу нерастворимого осадка и содержание в нем золота. 3.5 Сотрудник корректирует технологические режимы, предложенные ИНС. 3.6 ИНС прогнозирует % извлечения золота в раствор. 3.7 Если объем извлечения не удовлетворяет требованиям производства сотрудник запускает процесс корректировки производственного плана.
Исключения	1. В нормальном направлении: если прогнозное извлечение золота менее 98% дальнейшие вычисления ИНС в части прогноза выходных параметров реакции не осуществляются. 2. В альтернативных направлениях №1,2: если прогнозное значение извлечения золота в раствор менее 98%, сотруднику необходимо подтвердить результат на экране для запуска ИНС прогноза объема нерастворимого осадка и содержания в нем золота. 3. Ручной режим подбора оптимальных режимов необходим в случае возникновения внештатной ситуации на производстве.

3.2 Анализ обучающей выборки

Анализ обучающей выборки выполнялся с точки зрения наличия

зависимостей между выявленными признаками, а также наличия влияния независимых входных признаков-переменных на зависимый выходной. Для качественной характеристики тесноты связи между факторами в массиве данных использовался коэффициент ранговой корреляции Кендалла, одним из основных преимуществ которого является устойчивость к выбросам и лучшая производительность на небольших выборках. Коэффициент Кендалла является непараметрической оценкой, то есть не требует каких-либо предположений относительно распределения значений набора данных и его параметров.

Количественное определение коэффициента ранговой корреляции Кендалла, а также его графическая визуализация с использованием тепловой карты (рисунок 35) выполнялось на языке Python.

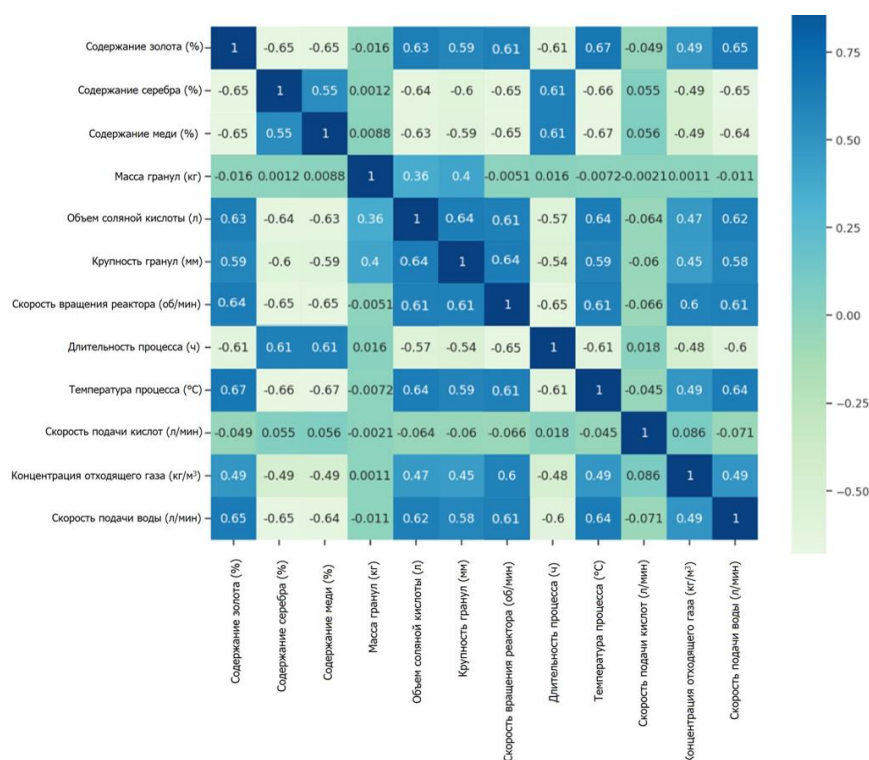


Рисунок 35 - Тепловая карта для коэффициента ранговой корреляции Кендалла

Количественная мера тесноты связи оценивались по шкале Чеддока, в соответствии с которой значение коэффициента в диапазоне от 0,1 до 0,3 говорит о слабой, в диапазоне от 0,3 до 0,5 об умеренной связи, а в диапазоне от 0,5 до 0,7 о заметной связи. Из тепловой карты видно, что в основном между параметрами умеренная или заметная связь (значение коэффициента находится в диапазоне 0,45-0,65).

В ходе исследования была обнаружена высокая зависимость (0,85) между входными параметрами: «масса гранул (кг)» и «объем азотной кислоты (л)», так как кислота берется в соотношении Т:Ж =1:1. Зависимость (0,87) между параметрами «объем азотной кислоты (л)» и «объем деионизированный воды (л)», а так же зависимость (0,88) между «объем соляной кислоты (л)» и «объем деионизированный воды (л)», так как на производстве объем воды берется в объеме 0,5 от общего объема кислот.

С целью повышения обучаемости нейронной сети из первоначального числа входных параметров были исключены: «объем азотной кислоты (л)» и «объем деионизированный воды (л)».

Качество обучаемой выборки оценивалось и с точки зрения наличия выбросов. С этой целью для всех 12 входных параметров строились диаграммы разброса. При этом единичные выбросы наблюдались только для параметра «состав сырья - серебро (%)». На рисунках 36, 37 приведены диаграммы разброса для массы гранул исходного материала и процентного содержания серебра.

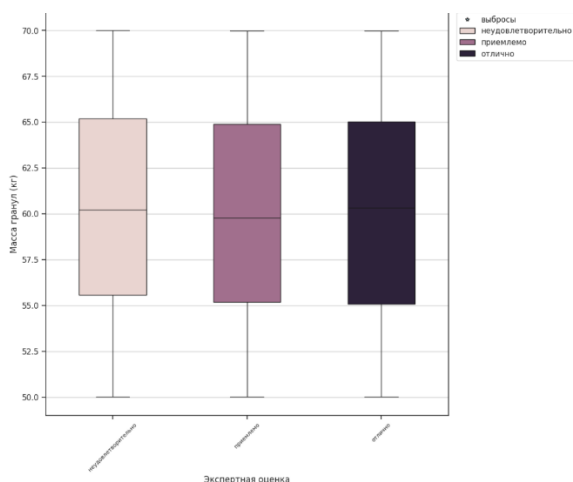


Рисунок 36 - Диаграмма разброса для входного параметра «Масса гранул (кг)»

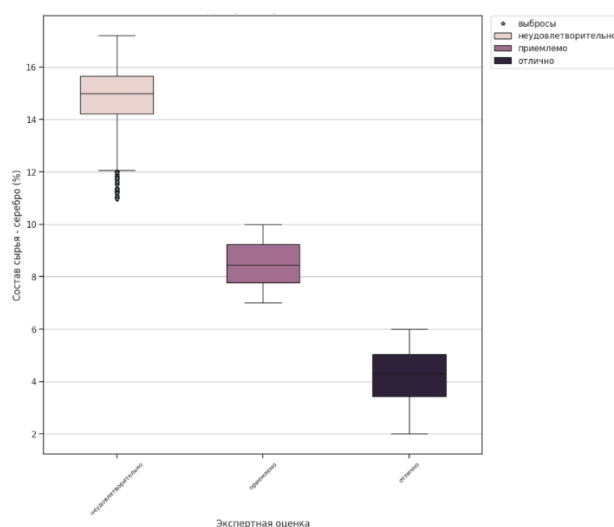


Рисунок 37 - Диаграмма разброса для входного параметра «Состав сырья - серебро (%)»

На диаграмме (рисунок 37) точки данных, отмеченные как выбросы, не являются сильным отклонением от общего распределения величин, так как они не попадают в интервал сторонней экспертной оценки, поэтому решено не рассматривать их как выбросы.

3.3 Моделирование архитектуры нейросети

В качестве моделей ИНС при исследовании эффективности обучения изучались возможности использования ИНС с одним скрытым слоем, а также многослойного персептрона с двумя скрытыми слоями.

Для ИНС экспертной оценки реакции рассматривались архитектуры с одним скрытым слоем 12- m -3, и, в соответствии с общими эвристическими рекомендациями, m (число нейронов в скрытом слое) принималось равным $m = 16, 20, 24$, а также двумя скрытыми слоями 12- m - m -3 и соответствующие архитектуры 12-12-12-3, 12-12-8-3, 12-12-6-3 и 12-16-8-3. Большее число слоев и нейронов в них не рассматривалось из-за имеющегося ограничения со стороны обучающей выборки, размер которой должен порядка в 10 раз превышать число настраиваемых параметров.

Для предсказания результатов реакции сравнивались два случая: в первом

случае для каждого параметра обучалась своя нейронная сеть (рисунок 33), во втором случае все выходные параметры предсказываются одной сетью (рисунок 34).

Поскольку ИНС предсказания выходов реакций обучались на той же обучающей выборке, соответственно, целесообразно рассматривать аналогичные архитектуры, т.е. с тем же количеством скрытых слоев и нейронов в слоях. Отличие заключается в числе нейронов в выходном слое. Для предсказания одного выходного параметра в выходном слое только один нейрон, а сеть, предсказывающая два параметра, имеет два нейрона выходного слоя, т.е. рассматривались архитектуры вида $12-m-1$, $12-m-m-1$ и $12-m-2$, $12-m-m-2$ соответственно.

Моделирование нейронных сетей и их обучение проводились с использованием высокоуровневой библиотеки Keras на языке Python. В качестве оптимизатора использовались SGD, RMSprop, Adam, реализованный в программной библиотеке Keras. В качестве функции активации скрытого слоя исследовались функции sigmoid (сигмоид), tanh (гиперболический тангенс), relu (полулинейная), а в качестве функции активации выходного слоя ИНС экспертной оценки – softmax. Совместно с оптимизатором использовались функции потерь categorical_crossentropy (категориальная кроссэнтропия) для ИНС экспертной оценки и MSE (среднеквадратичная ошибка) для остальных ИНС. Обучение производилось на генеральной выборке, разбитой на обучающую выборку, которая составила 80% от общего числа обучающих наборов (2400 наборов), валидационную и тестовую выборки, составляющие по 10%.

3.4 Обучение нейросетевых моделей

Согласно эмпирическим наблюдениям, помимо самой архитектуры ИНС, на обобщающую способность при обучении влияет масштаб разброса данных. Учитывая, что алгоритм градиентного спуска, используемый для обучения, чувствителен к разбросу данных, были проведены вычислительные эксперименты с различной шкалой масштабирования, в том числе, с нормализацией данных, т.е. приведением

данных к диапазону от 0 до 1.

С точки зрения масштаба данных, параметры, описывающие протекание реакции, имеют значительный интервальный разброс, особенно это касается времени протекания реакции (в часах), которое было приведено к секундам. Для изучения влияния масштаба данных на обобщающую способность ИНС было решено проводить обучающие эксперименты для описанных ранее архитектур на трех модификациях данных, а именно: без нормализации, с нормализацией только входных параметров и с нормализацией как входных, так и выходных параметров.

Приведенные в таблице 33 показатели точности обучения были получены при размере набора примеров, после которых обновляются весовые коэффициенты, $batch_size = 32$. Увеличение и уменьшение размера партий обновления весовых коэффициентов приводили к снижению точности. При этом эффекта переобучения не наблюдалось.

Для определения оптимальной структуры сети проведены обучающие эксперименты для сетей прямого распространения с различным числом скрытых слоев и нейронов в скрытом слое. Результаты сведены в таблицу 33, приведенную ниже.

Таблица 33 - Точность обучения ИНС с разными архитектурами

		Точность обучения ИНС											
Выходные параметры		% извлечения Au в р-р				масса НО, кг				содержание Au в НО, %			
Архитектура ИНС		Acc.	Valid.	Test	MSE (Test)	Acc.	Valid.	Test	MSE	Acc.	Valid.	Test	MSE (Test)
1 скрытый слой	12-16-3	96,65	92,22	92,54	0,04	98,14	93,0	94,03	0,04	94,1	93,13	91,54	0,03
	12-20-3	98,33	93,74	92,54	0,04	98,4	93,48	94,4	0,04	92,18	92,14	92,54	0,03
	12-24-3	98,35	94,37	93,66	0,03	98,46	94,33	95,9	0,043	93,15	94,8	94,66	0,031
2 скрытых слоя	12-12-12-3	95,86	91,78	92,91	0,04	98,7	94,07	96,64	0,032	93,17	95,75	94,91	0,032
	12-12-8-3	98,23	93,48	92,16	0,036	98,74	95,7	94,4	0,033	92,17	93,2	93,26	0,032
	12-12-	98,88	94,59	94,03	0,033	99,21	95,7	94,5	0,038	94,8	94,15	95,01	0,021

	6-3												
	12-16-8-3	99,12	95,85	95,81	0,021	99,45	96,9	97,8	0,019	97,1	96,9	97,12	0,015

Из результатов проведенных циклов обучения (таблица 33) видно, что сети с одним скрытым слоем и числом нейронов меньше 16 в первом скрытом слое либо показывали меньшую сходимость с большей ошибкой, либо вообще не демонстрировали обобщающей способности. Значение среднеквадратичной ошибки, полученной в ходе обучения нейросети на тестовом наборе, значительно уменьшилось с 0,03 - 0,04 до 0,015 - 0,021 по мере увеличения количества скрытых слоев и содержания в них нейронов. Лучшие показатели точности имела ИНС с двумя скрытыми слоями по 16 нейронов в первом слое и 8 нейронами во втором, архитектура которой представлена на рисунке 38.

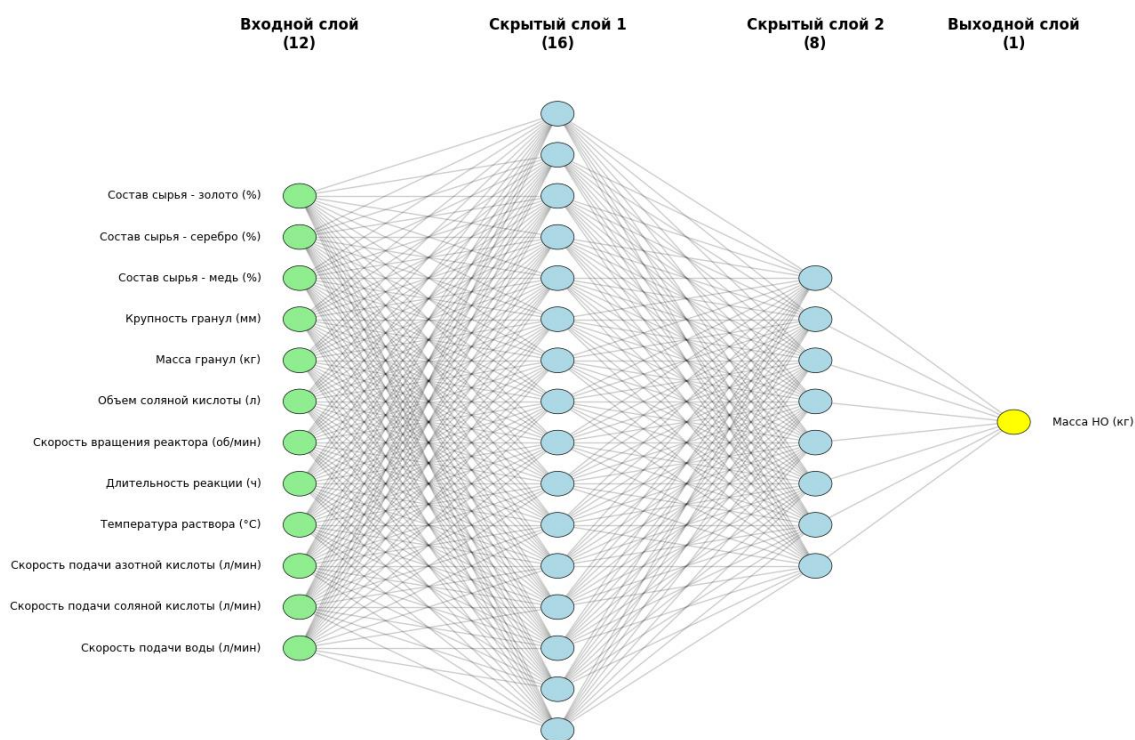


Рисунок 38 – Архитектура ИНС для предсказания массы осадка с архитектурой 12-16-8-1

При этом лучшая обобщающая способность была при обучении с использованием оптимизатора Adam и функции активации relu. Графики кривых обучения приведены на рисунках 39 - 41.

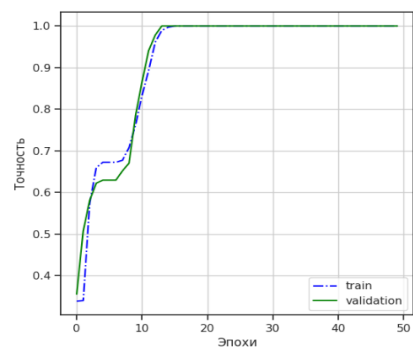
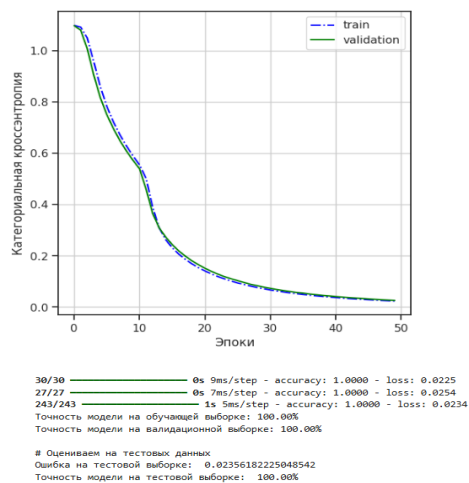


Рисунок 39 - Кривые обучения ИНС для экспертной оценки качества реакции с архитектурой 12-16-8-3

Из графика (рисунок 38) видно, что значение категориальной кроссэнтропии и точности предсказания параметров достигают плато на 50 эпохе. Кривые при обучении и проверке ведут себя одинаково, что позволяет говорить об отсутствии эффекта переобучения. Отсутствие шумов на графике свидетельствует о том, что набор данных, используемый для валидации и обучения, репрезентативный. Для сокращения разрыва при оценке точности между кривыми обучения и проверки со 2 по 6 эпоху размер пакета обучающих данных был увеличен до 40 примеров, после чего кривые вели себя аналогично.

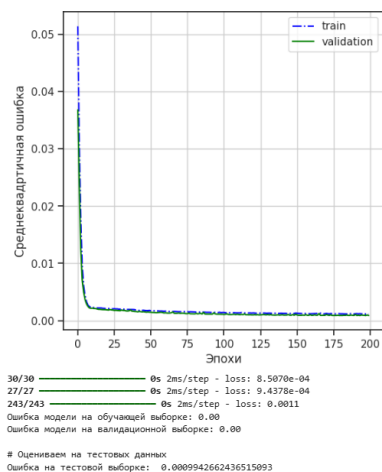


Рисунок 40 - Кривые обучения ИНС для предсказания массы осадка с архитектурой 12-16-8-1

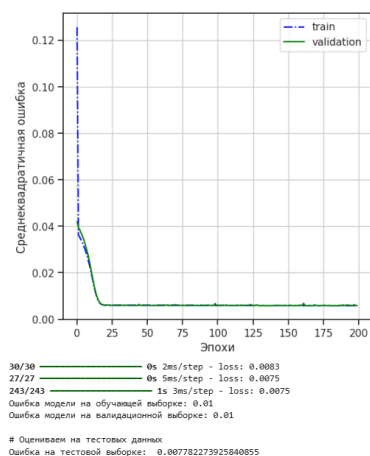


Рисунок 41 - Кривые обучения ИНС для предсказания % содержания Au в осадке с архитектурой 12-16-8-1

Основываясь на графиках (рисунок 40, 41) можно сделать вывод, что потери уменьшаются и достигают плато на 200 эпохе, что свидетельствует о достаточности обучения разрабатываемых ИНС. Увеличение числа эпох не приводило к повышению точности сети, значение MSE оставалось в диапазоне 0,000994 - 0,007782. Данные валидационной и обучающей выборки репрезентативны. Разрывов при обучении ИНС не выявлено, поэтому объёмы пакетов не менялись ($batch_size = 32$). Кривые ведут себя одинаково, переломные моменты отсутствуют, следовательно, эффекта переобучения не наблюдается.

Точность в 95, 12% обучения нейронной сети, определяющей технологические режимы процесса, архитектура которой представлена на рисунке 42, получена при использовании оптимизатора Adam и функции активации скрытого слоя $relu$. Обучение на тестовой выборке проводилось в течение 200 эпох.

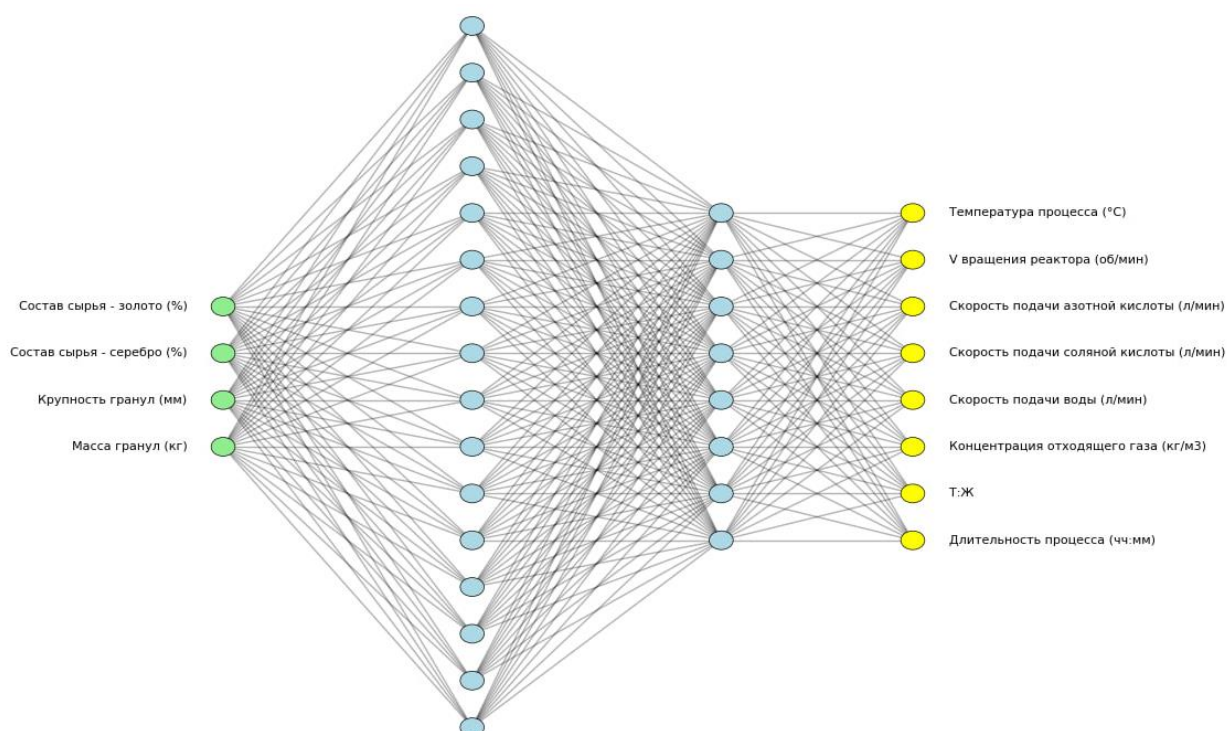


Рисунок 42 – Архитектура ИНС для предсказания режимов процесса с архитектурой 4-16-8-8

Что касается числа предсказываемых параметров одной ИНС, то сети, прогнозирующие только один параметр, показали более точное предсказание параметра (таблица 34).

Таблица 34. Результаты прогноза ансамблей ИНС

№	Значения для 1 ИНС		Значения для 2 ИНС		Реальные значения с производства	
	Масса НО, кг	Au в НО, %	Масса НО, кг	Au в НО, %	Масса НО, кг	Au в НО, %
1	0,305	4,85	0,321	5,1	0,315	5
2	0,47	8,26	0,496	8,48	0,486	8,39
3	0,737	6,05	0,761	6,23	0,753	6,17
4	0,277	6,73	0,289	7,07	0,284	6,94
5	0,108	6,06	0,112	6,25	0,111	6,18
6	0,734	10,01	0,771	10,49	0,765	10,41
7	0,569	9,87	0,604	10,18	0,599	10,08
8	0,405	6,82	0,426	7,18	0,418	7,04
9	0,156	9,24	0,166	9,6	0,163	9,5
10	0,201	5,42	0,21	5,57	0,207	5,53

Результаты сравнения прогноза ансамблей с 1 и 2 ИНС представлены в виде графика (рисунок 43).

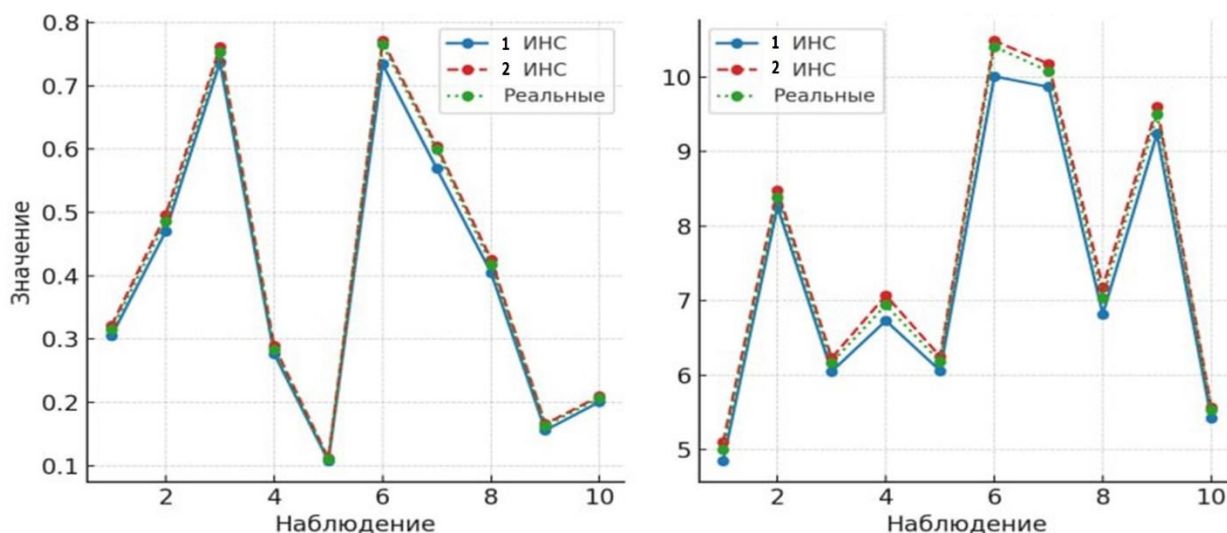


Рисунок 43 – Сопоставление результатов прогноза ансамблей ИНС

Расхождение в прогнозе массы НО составило 3,3 % против 1,4 % , в прогнозе содержания Au в НО – 2,52 % против 1,2%, в прогнозе % извлечения Au в раствор – 2,55% против 0,5%.

С точки зрения влияния масштаба данных на обобщающую способность

сетей выяснилось, что лучшие результаты были получены при нормализации только входных параметров для ИНС, прогнозирующей массу нерастворимого осадка. При предсказании % содержания золота в осадке и определении технологических режимов лучшие результаты были получены при нормализации всего набора данных.

3.5 Выводы по главе 3

По результатам разработки и обучения нейросетевых моделей прогнозирования целевых параметров процесса кислотного аффинажа золота можно сделать следующие выводы:

1. В ходе анализа корреляции в массиве первоначально отобранных параметров была обнаружена высокая зависимость (0,85) между: «масса гранул (кг)» и «объем азотной кислоты (л)», так как кислота берется в соотношении Т:Ж = 1:1. Зависимость (0,87) между параметрами «объем азотной кислоты (л)» и «объем деионизированной воды (л)», а так же зависимость (0,88) между «объем соляной кислоты (л)» и «объем деионизированной воды (л)», так как на производстве объем воды берется в объеме 0,5 от общего объема кислот. С целью повышения обучаемости нейронной сети из первоначального числа входных параметров были исключены: «объем азотной кислоты (л)» и «объем деионизированной воды (л)». Таким образом, финальный объем анализируемых факторов сократился до 12.

2. Для оценки выхода в ансамбле использовались ИНС, предсказывающие массу нерастворимого осадка (кг) и содержание (%) Au в нерастворимом осадке. Исследовались два варианта реализации ИНС, а именно одна ИНС, определяющая оба параметра и две отдельные ИНС для каждого выхода. В обеих вариациях предполагалось наличие ИНС, формирующую общую экспертную оценку протекания реакции. Расхождение в прогнозе массы нерастворимого осадка составило 3,3 % для одной ИНС против 1,4 % для 2 ИНС, в прогнозе содержания Au в НО – 2,52 % против 1,2%, в прогнозе % извлечения Au в раствор – 2,55% против 0,5%. Таким образом, оптимальным решением является

фреймворк, в рамках которого ИНС прогнозируют выход реакции для каждого параметра в отдельности.

3. При анализе выбросов установлено, что единичные отклонения параметра «состав сырья - серебро (%)» незначительны от общего распределения величин, так как они не попадают в интервал сторонней экспертной оценки, поэтому решено не рассматривать их как выбросы.

4. Приведенные результаты циклов обучения получены при обучении в течение 50 эпох для ИНС экспертной оценки и 200 эпох для ИНС прогнозирования массы нерастворимого осадка, содержание в нем золота и определения технологических режимов. Увеличение числа эпох обучения не приводило к повышению точности сети. Показатели точности обучения были получены при размере пакета примеров, после которых обновляются весовые коэффициенты, `batch_size = 32`. Данные обучающей, валидационной и тестовой выборок репрезентативны. Разрывов при обучении ИНС не выявлено, поэтому объёмы пакетов не менялись. Кривые обучения ИНС ведут себя одинаково, переломные моменты отсутствуют, следовательно, эффекта переобучения не наблюдается.

5. В ходе исследования различных вариантов архитектуры ИНС, сети с одним скрытым слоем и числом нейронов меньше 16 в первом скрытом слое либо показывали меньшую сходимость с большей ошибкой, либо вообще не демонстрировали обобщающей способности. Лучшие показатели точности имели ИНС с двумя скрытыми слоями по 16 нейронов в первом слое и 8 нейронами во втором.

6. С точки зрения влияния масштаба данных на обобщающую способность сетей, то она оказалась лучшей при нормализации только входных параметров для ИНС прогнозирующей массу нерастворимого осадка, для предсказания % содержания золота в нерастворимом осадке и определения технологических режимов лучшие результаты были получены при нормализации всего набора данных.

Глава 4. Разработка ПО для поддержки принятия решений оператора при управлении технологическими режимами растворения

Для контроля оптимальных режимов, определенных нейросетью, разработана ЭВМ программа, позволяющая осуществлять мониторинг за изменениями динамических характеристик переделов и, при превышении или снижении нормативных показателей, оперативно уведомлять аппаратчика о необходимости добавления реагента с расчетом требуемого объема. Подобное управление технологическим процессом является проактивным - собранные данные используются для построения прогнозных значений целевой функции. Предиктивный подход позволит выявить отклонение на раннем этапе и принять заблаговременное корректирующее действие со стороны исполнителя процесса, не допуская экстремума операций [75].

4.1 Решение многокритериальной задачи выбора оптимального архитектурного решения

На первом этапе разработки программы необходимо выбрать оптимальное архитектурное решение. Выбор лучшей альтернативы осуществлялся посредством решения задачи многокритериального выбора двумя методами: анализа иерархии и ELECTRE.

Первый метод позволяет провести качественный анализ оцениваемых альтернатив с использованием относительной значимости исследуемых альтернатив для всех критериев, находящихся в иерархии. Относительная значимость выражается численно в виде векторов приоритетов [76].

Метод ELECTRE позволяет количественно оценить подобранные решения путем сопоставления объектов по критериям и устанавливать условие превосходства одной альтернативы над другой.

Постановка задачи: требуется выбрать оптимальное архитектурное решение для программы управления технологическими режимами выщелачивания золота по заданному набору критериев, с учётом количественных и качественных оценок.

В качестве альтернатив (х) для выбора определены следующие архитектурные паттерны:

- микросервисная архитектура (x1);
- многослойная архитектура (x2);
- клиент-серверная архитектура (x3);
- сервис-ориентированная архитектура (x4);
- монолитная архитектура (x5);

Необходимо определить оптимальное решение из вышеперечисленных вариантов, удовлетворяющего большинству критериев (z), а именно:

- оперативность обновления функционала (z1);
- диапазон технологий (z2);
- гибкость разработки (z3);
- оптимизация программы (z4);
- масштабируемость (z5);
- отказоустойчивость (z6);
- простота развёртывания (z7);
- автономность системных модулей (z8).

Согласно методу анализа иерархии, оценка альтернатив ведется по шкале оценивая уровней важности по вышеперечисленным критериям (таблица 35).

Таблица 35. Шкала уровней важности

Уровень важности	Значение
Отсутствует	1
Низкое качество	3
Среднее качество	5
Есть в хорошем качестве	7
Есть в высоком качестве	9

В таблице 36 представлена оценка альтернатив по выработанной шкале уровней важности.

Таблица 36. Оценка исследуемых альтернатив

Критерии \ Альтернативы	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8
X1	7	9	9	5	7	5	5	7
X2	7	7	7	5	9	3	5	7
X3	5	9	7	1	7	1	5	5
X4	3	5	7	3	9	1	5	5
X5	5	5	3	7	5	3	3	7

В рамках решения задачи выбора методом МАИ необходимо определить лучшую альтернативу. Первым этапом определим превосходство архитектур по важности критериев, результаты расчетов представлены в таблице 37.

Таблица 37. Матрица сопоставления альтернатив и их весовых коэффициентов

Zn	z1	z2	z3	z4	z5	z6	z7	z8	Собственный вектор	Весовой вектор
z1	1	0,11	0,14	0,20	0,11	0,14	0,14	0,14	0,178	0,02
z2	9	1	5	3	5	3	7	3	3,789	0,34
z3	7	0,20	1	0,33	3	0,33	5	0,33	0,969	0,09
z4	5	0,33	3	1	5	3	7	1	2,188	0,20
z5	9	0,20	0,33	0,20	1	0,14	5	0,33	0,641	0,06
z6	7	0,33	3	0,33	7	1	0,33	0,20	1,011	0,09
z7	7	0,14	0,20	0,14	0,20	3	1	1	0,602	0,05
z8	7	0,33	3	1	3	5	1	1	1,789	0,16
Сумма									11,17	1

Результаты расчета парных сравнений альтернатив для критерия z1 представлены в таблице 38.

Таблица 38. Результаты парных сравнений для критерия z1

Xn	x1	x2	x3	x4	X5	Собственный вектор	Весовой вектор
x1	1	1	3	5	3	2,14	0,34
x2	1	1	3	5	3	2,14	0,34
x3	0,33	0,33	1	3,00	1	0,80	0,13
x4	0,2	0,2	0,33	1	0,33	0,34	0,05
x5	0,33	0,33	1	3	1	0,80	0,13
Сумма						6,22	1,00

Аналогичным образом произведен расчет парных сравнений для каждого критерия.

Далее необходимо рассчитать количественную оценку качества альтернатив по формуле (24):

$$U(x) = \sum_{i=1}^m \alpha_i \gamma_i(x_k) \quad (24)$$

Результаты проведенных расчетов следующие:

- $U(x_1) = 0,31$,
- $U(x_2) = 0,21$,
- $U(x_3) = 0,19$,
- $U(x_4) = 0,11$,
- $U(x_5) = 0,19$.

Результаты расчетов качества альтернатив представлены в виде диаграммы на рисунке 44.

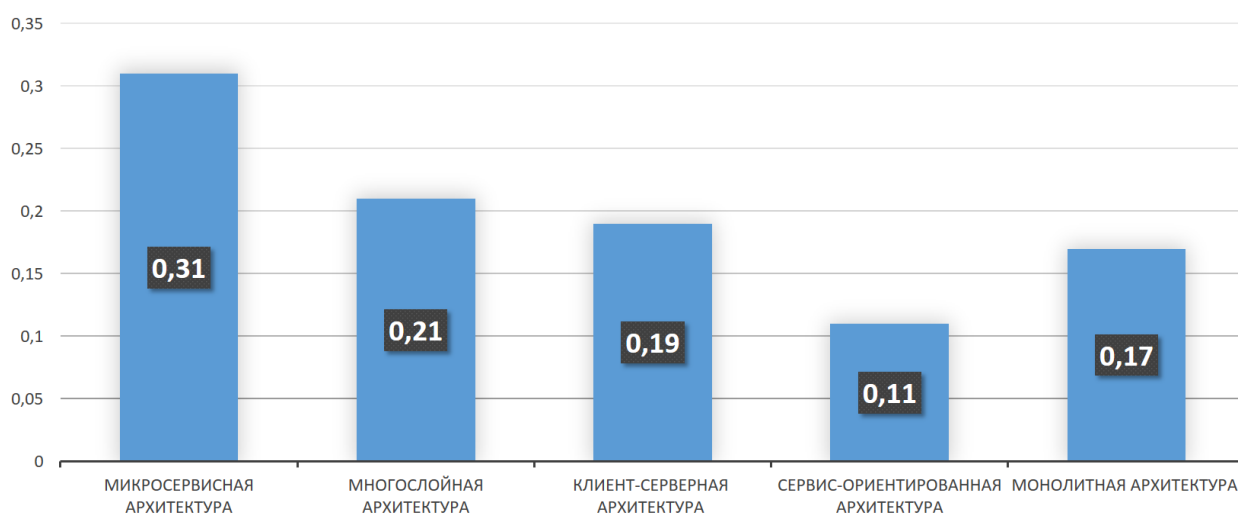


Рисунок 44 - Результаты выбора альтернативы методом МАИ

По итогу решения задачи методом анализа иерархии лучшей альтернативой стала микросервисная архитектура.

Для решения задачи методом ELECTRE будет использоваться также оценка исследуемых альтернатив. Разброс оценок альтернатив от наихудшего до наилучшего значения приведен в таблице 39.

Таблица 39. Диапазон оценки альтернатив

Критерии оценки	Наихудшее значение	Наилучшее значение	Длина шкалы
Z1	3	7	4
Z2	5	9	4
Z3	3	9	6
Z4	1	7	6
Z5	5	9	4
Z6	1	5	4
Z7	3	5	2
Z8	5	7	2

Пусть альтернатива x_1 превосходит альтернативу x_2 . Множество I , состоящее из n критериев, разбивается на 3 подмножества:

- I^+ – подмножество критериев, по которым A предпочтительнее B ;
- $I^=$ – подмножество критериев, по которым A равноценно B ;
- I^- – подмножество критериев, по которым B предпочтительнее A .

Результаты построения множеств I^+ , $I^=$, I^- приведены в таблице 40.

Таблица 40. Таблица множеств

X_n	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
X1	*	{2,3,6}; {1,4,7,8}; {5}	{1,3,4,6,8}; {2,5,7}; $\emptyset$	{1,2,3,4,6,8}; {7}; {5}	{1,2,3,5,6,7}; {8}; {4}
X2	{5}; {1,4,7,8}; {2,3,6}	*	{1,4,5,6,8}; {3,7}; {2}	{1,2,4,6,8}; {3,5,7}; $\emptyset$	{1,2,3,5,7}; {6,8}; {4}
X3	$\emptyset$; {2,5,7}; {1,3,4,6,8}	{2}; {3,7}; {1,4,5,6,8}	*	{1,2}; {3,6,7,8}; {4,5}	{2,3,5,7}; {1}; {4,6,8}
X4	{5}; {7}; {1,2,3,4,6,8}	$\emptyset$; {3,5,7}; {1,2,4,6,8}	{4,5}; {3,6,7,8}; {1,2}	*	{3,5,7}; {2}; {1,4,6,8}
X5	{8}; {4}; {1,2,3,5,6,7}	{4}; {1,2,3,5,7}; {6,8}	{4,6,8}; {2,3,5,7}; {1}	{1,4,6,8}; {3,5,7}; {2};	*

Согласно таблице 34 определены важность критериев: $z_1 = 7$, $z_2 = 9$, $z_3 = 3$, $z_4 = 7$, $z_5 = 5$, $z_6 = 5$, $z_7 = 5$, $z_8 = 7$

Рассчитаем значения индексов согласия по формуле (25):

$$C_{a_x a_y} = \frac{\sum_{i \in I^+, I^= } x_i}{\sum_{i=1}^m x_i} \quad (25)$$

где x_i – вес критерия;

I^+ – критерии, по которым альтернатива x_j предпочтительнее альтернативы x_i ;

I^- – критерии, по которым альтернатива x_j равноценна альтернативе x_i .

Результаты расчетов индексов согласования показаны в таблице 41.

Таблица 41. Результаты расчетов индексов согласия

Xn	X1	X2	X3	X4	X5
X1	*	0,89	1	0,89	0,85
X2	0,65	*	0,82	1	0,85
X3	0,4	0,35	*	0,75	0,6
X4	0,2	0,27	0,67	*	0,46
X5	0,3	0,75	0,85	0,81	*

По ячейке (x_1, x_2) : $I^+ = 2, 3, 6$, $I^- = 1, 4, 7, 8$, $\omega_1=7$, $\omega_2=9$, $\omega_3=3$, $\omega_4=7$, $\omega_6=5$, $\omega_7=5$, $\omega_8=7$,

$$\sum \omega = 48, \text{ следовательно, } \frac{\omega_1 + \omega_2}{\sum \omega} = \frac{7+9+3+7+5+5+7}{48} = 0,89$$

Рассчитаем значения индексов несогласия по формуле (26):

$$d_{a_i a_j} = \max_{i \in I^-} \frac{|I_{a_j}^i - I_{a_i}^i|}{Li} \quad (26)$$

где Li – длина шкалы;

I^- – критерии, по которым вариант α_i доминирует над вариантом α_j .

Результаты расчета индексов несогласия представлен в таблице 42.

Таблица 42. Результаты расчетов индексов несогласия

Xn	X1	X2	X3	X4	X5
X1	*	1	0	1	0,5
X2	0,5	*	0,5	0	0,5
X3	1	1	*	1	1
X4	1	1	1	*	1
X5	1	0	0	0	*

По ячейке (x_1, x_2) : $I^- = 5$; $\Delta_5 = 2$; $L_5 = 2$; $d = 1$.

Обозначим α – заданный уровень согласия и β – заданный уровень несогласия. Если рассчитанный уровень индекса согласия для пары альтернатив А и В $\geq \alpha$ и одновременно рассчитанный индекс несогласия $\leq \beta$, то альтернатива А объявляется доминирующей над альтернативой В. Если А не доминирует В и В не

доминирует А, то альтернативы А и В объявляются несравнимыми на уровне α и β .

В качестве α возьмем наибольший индекс согласия = 1, в качестве β возьмем наименьшее значение из индексов несогласия = 0. Исходя из таблицы 42, условиям удовлетворяет только две пары – (x1, x3) и (x2, x4).

$$c(x1, x3) \geq \alpha, d(x1, x3) \leq \beta \text{ и } c(x2, x4) \geq \alpha, d(x2, x4) \leq \beta$$

Таким образом, по итогу решения задачи выбора методом ELECTRE лучшей альтернативой стала x1 – микросервисная архитектура.

4.2 Проектирование микросервисной архитектуры разрабатываемого решения

Разработанное ПО планируется использовать в стационарном режиме и разворачивается на физических серверах предприятия. Пользователь посредством интерфейса отправляет в ансамбль ИНС исходные данные о массе, крупности и составе гранул. Сервис производит расчет оптимальных режимов и возвращает их на экран пользователя.

Данные с датчиков реактора записываются в базу данных и посредством фонового задания автоматически передаются в микросервис визуализации для построения графиков. Параллельно информация с датчиков поступает в сервис контроля оптимальных режимов для обнаружения возможных отклонений. В случае выявления сбоя на экран ответственного сотрудника поступает системное уведомление о необходимости корректировки технологического режима. Отклонения от оптимальных режимов хранятся в соответствующей базе данных и используются для дальнейшего переобучения нейросети.

Схема архитектуры предлагаемого решения представлена на рисунке 45.

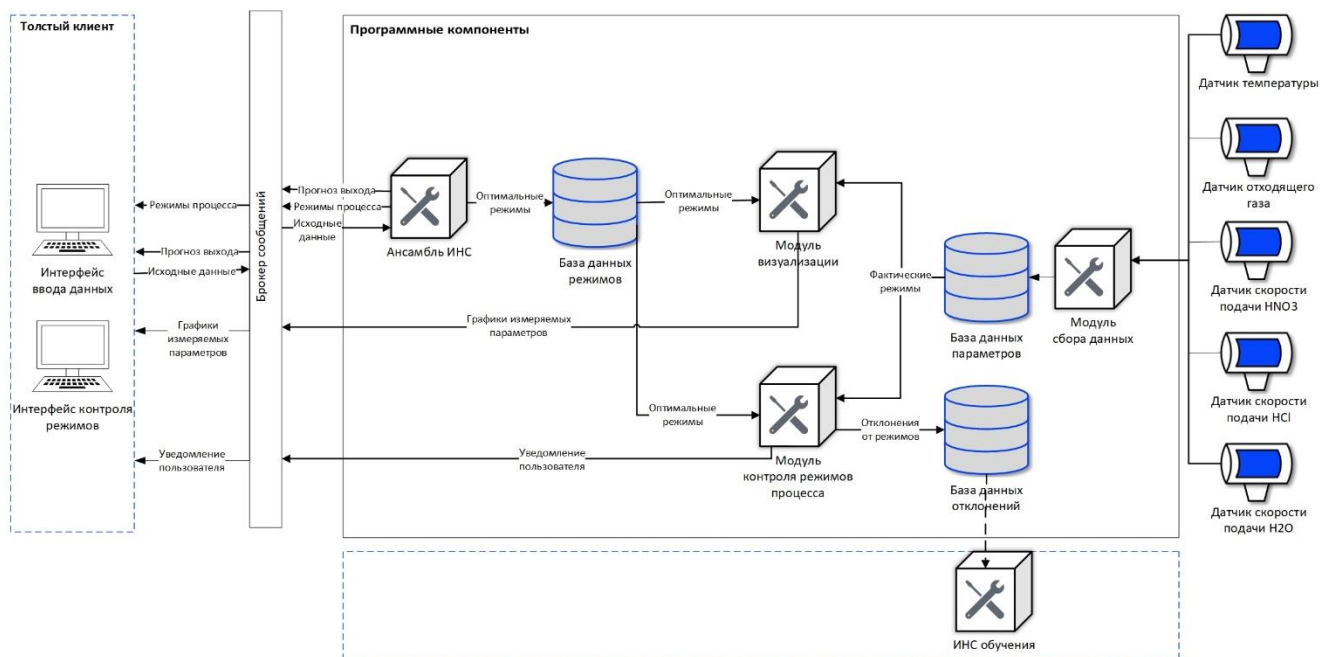


Рисунок 45 – Модель архитектуры предлагаемого решения

Предлагаемый вариант микросервисной архитектуры обладает рядом преимуществ:

- оперативность обновления функционала: скорость обновления микросервисов на порядок выше, так как доработка ведется на конкретном участке программы, не затрагивая работоспособность смежного функционала. Данный факт важен для случая, если предприятие решит анализировать дополнительные параметры технологического процесса;
- диапазон технологий: для каждого сервиса есть возможность применения разных языков программирования, способов хранения данных, необходимых библиотек;
- масштабируемость: микросервисы могут быть легко масштабируемы, поскольку каждый из них работает в рамках отдельной базы данных на сегментированном участке сервера. Данный факт важен для предприятия, если в перспективе планируется расширение функционала на другие технологические операции процесса;
- отказоустойчивость: при отказе одного микросервиса, остальные могут продолжать работу, поскольку они не зависят друг от друга, что является важным фактом при непрерывном растворении гранул;

- простота развёртывания обеспечивается за счет переноса разработок, обновления функционала и масштабирования независимо друг от друга;
- автономность системных модулей: микросервисы работают независимо друг от друга, что позволяет их использовать в смежном функционале, не затрагивая влияния на основной процесс.

Объектом управления является процесс кислотного растворения золотосодержащих гранул, последовательность технологических операций которого следующая:

1. Загрузка гранул в реактор.
2. Дозирование азотной и соляной кислот.
3. Вращение реактора.
4. Разбавление раствора деионизированной водой.
5. Отстаивание раствора.
6. Слив раствора на нутч-фильтр.

Структура разрабатываемой АСУ ТП состоит из трех уровней (рисунок 46).

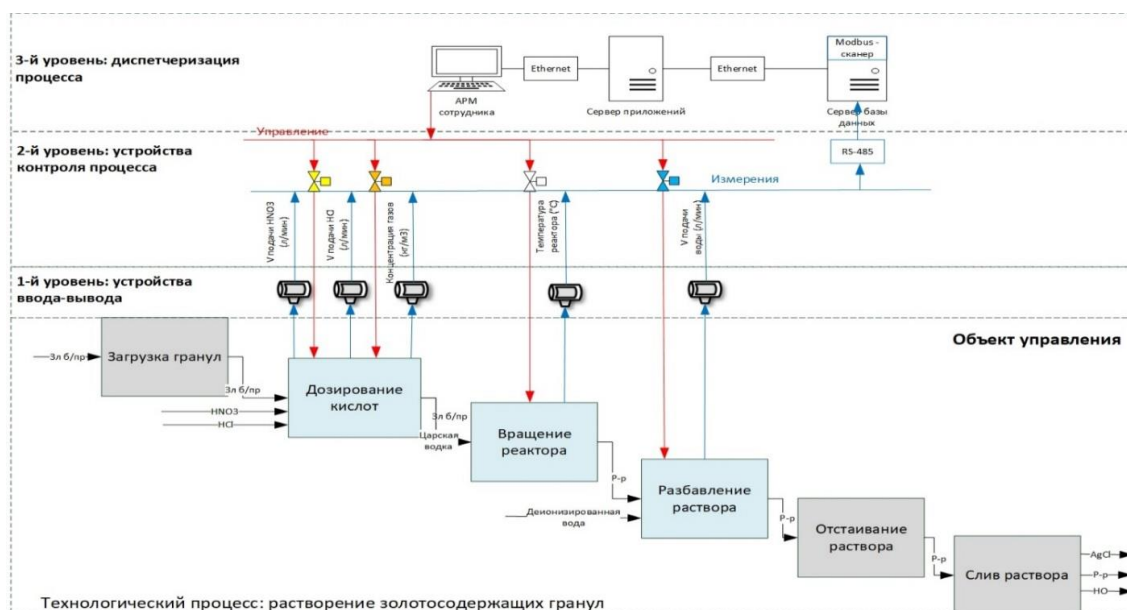


Рисунок 46 - Функционально-структурная схема АСУ ТП растворения золотосодержащих гранул

Первый уровень состоит из датчиков: 1 температуры, 3 расходомера, 1 газоанализатор.

Основным требованием к датчику температуры является интервал

измерения. Температурный диапазон взаимодействия гранул с кислотами составляет 20-90°C, полипропиленовый реактор выдерживает температуру до 130°C. В рамках исследования использовался термопара с коммутационной головкой, материал датчика сделан из стали марки 12X18H10T. Рабочий диапазон измеряемых температур: -40...+600 °C.

Для контроля подачи кислот и деионизированной воды использовался электромагнитный расходомер с выходным сигналом RS-485 с протоколом Modbus RTU. Корпус первичного преобразователя выполнен из фторопласта.

Измерение концентрации отходящего газа (NO₂) выполнялось на стационарном газоанализаторе с цифровым каналом выдачи информации RS-485 с протоколом MODBUS RTU и диапазоне измерения 0 – 150 кг/м³.

Второй уровень представлен вентилями, установленными на трубопроводах и используемыми для контроля подачи реактивов.

Третий уровень состоит из системы серверов, компьютеров и мониторов, на которых визуализируется контроль изменения технологических параметров, формируются системные предупреждения сотрудников и вырабатываются алгоритмы корректировки режимов.

На сервере базы данных установлен Modbus-сканер, используемый для сбора данных с датчиков. На рабочей станции пользователя установлена операционная система windows 10, установлена библиотека MS .Net Framework v.4.7, процессор с тактовой частотой 3 ГГц.

4.3 Описание пользовательских интерфейсов

Программное решение состоит из 3 экранов:

- экран «Выбор операции»;
- экран «Подбор оптимальных режимов»;
- экран «Контроль режимов».

На 1 экране сотрудник имеет возможность выбора требуемой операции технологии кислотного аффинажа по нажатию соответствующей кнопки (рисунок 47).

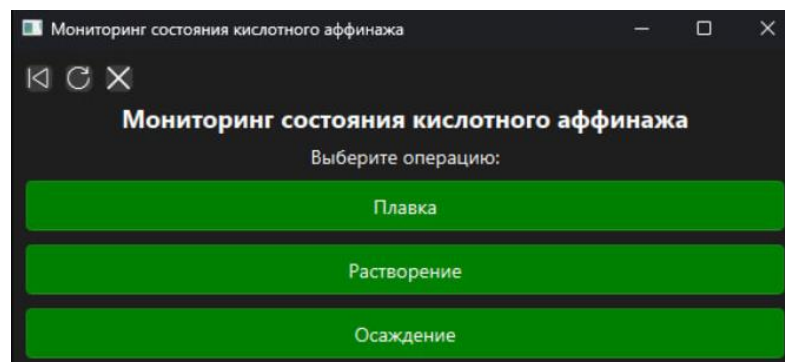


Рисунок 47 – Выбор операции технологии

При выборе операции «Растворение» открывается 2 экран (рисунок 48).

Рисунок 48 – Экран «Подбор оптимальных режимов»

Описание полей экрана приведено в таблице 43.

Таблица 43. Описание полей экрана «Подбор оптимальных режимов»

№	Поле	Тип поля	Описание заполнения
1	Блок «Входные данные»		
1.1	Масса гранул (кг)	Decimal	Обязательность: + Ручной ввод: +
1.2	Размер гранул (мм)	Decimal	Обязательность: + Ручной ввод: +
1.3	Состав гранул (%)	Decimal	Обязательность: + Ручной ввод: +
1.4	Добавить примеси	Button	По нажатию на экран добавляется дополнительное поле для ввода примеси
1.5	Рассчитать оптимальные режимы	Button	По нажатию запускается расчет данных в блоках «Подбор данных» и «Выходные данные»
2	Блок «Подбор данных»		
2.1	Объем HNO ₃ (л)	Decimal	Расчет в зависимости от соотношения в поле 2.6
2.2	Объем HCl (л)	Decimal	Расчет в зависимости от соотношения в поле 2.7
2.3	Объем воды (л)	Decimal	Расчет в зависимости от соотношения в поле 2.8
2.4	Скорость вращения (об/мин)	Decimal	Обязательность: + Ручной ввод: + ИИ расчет: +
2.5	Температура (°C)	Decimal	Обязательность: + Ручной ввод: + ИИ расчет: +
2.6, 2.7	T:Ж	Decimal	Обязательность: + Ручной ввод: + ИИ расчет: +
2.8	1:X	Decimal	Обязательность: + Ручной ввод: + ИИ расчет: +
2.9	Длительность (ч/мин/сек)	TIME	Обязательность: + Ручной ввод: + ИИ расчет: +

2.10	Корректировка данных	Button	По нажатию поля 2.4-2.9 становятся доступны для ввода
2.11	Выполнить пересчет	Button	По нажатию выполняется пересчет значений в блоках «Подбор данных» и «Выходные данные»
3	Блок «Выходные данные»		
3.1	Масса НО (кг)	Decimal	Обязательность: + Ручной ввод: - ИИ расчет: +
3.2	Содержание Au в НО (%)	Decimal	Обязательность: + Ручной ввод: - ИИ расчет: +
3.3	Извлечение Au в раствор (%)	Decimal	Обязательность: + Ручной ввод: - ИИ расчет: +
3.4	Принять	Button	По нажатию открывается экран «Контроль режимов»

По нажатию кнопки «Принять» запускается 3 экран «Контроль режимов» (рисунок 49).



Рисунок 49 - Экран «Контроль режимов»

Описание полей экрана приведено в таблице 44.

Таблица 44. Описание полей экрана «Контроль режимов»

№	Поле	Тип поля	Описание заполнения
1	Дорожка		
1.1	Скорость подачи HNO ₃ (л/мин)	Pandas	Отображение скорости подачи реактива
1.2	Скорость подачи HCl (л/мин)	Pandas	Отображение скорости подачи реактива
1.3	Скорость подачи воды (л/мин)	Pandas	Отображение скорости подачи деионизированной воды
1.4	Температура(°C)	Pandas	Отображение температуры реакции
1.5	Объем отходящего газа (кг/м ³)	Pandas	Отображение объема отходящего газа в стеклянный теплообменник
2	Счетчик	Counter	Выводит актуальную информацию в режиме реального времени
3	Назад	Button	Возвращает экран «Подбор оптимальных режимов»

Алгоритм работы программы: при выборе необходимой операции на экране «Выбор операции» аппаратчику открывается интерфейс подбора оптимальных режимов. Для запуска программы интеллектуального расчета необходимо указать: массу гранул, крупность и химический состав. При необходимости у сотрудника есть возможность добавления примеси, не отображающейся на экране. По нажатию кнопки «Рассчитать оптимальные режимы» запускается расчета данных в блоках «Подбор данных» и «Выходные данные».

При необходимости редактирования посчитанных данных ИИ в блоке «Подбор данных» у аппаратчика есть возможность корректировки по нажатию кнопки «Корректировка данных». Поля 2.4 – 2.9 (таблица 43) становятся доступными для ввода.

Для пересчета оптимальных режимов с учетом новых данных сотруднику необходимо нажать кнопку «Выполнить пересчет». После чего данные в блоках

«Подбор данных» и «Выходные данные» повторно будут пересчитаны ИИ. По нажатию кнопки «Принять» аппаратчик подтверждает выбранные режимы и открывается экран «Контроль режимов».

На данном экране по умолчанию выводится 6 дорожек: скорость подачи азотной кислоты, скорость подачи соляной кислоты, скорость подачи воды, температура, объем пара.

В дорожке зелеными линиями обозначены оптимальные пределы, в рамках которых в режиме реального времени строится бегущий график. При выходе за оптимальные границы система информирует аппаратчика о необходимости выполнения соответствующих корректировок в процессе, подсвечивая дорожку красным цветом и выводя на экран уведомление.

Выполнив необходимые корректировки уведомление пропадает, дорожка становится обычным цветом. По окончании выполнения реакции система информирует сотрудника о необходимости выключения реактора.

4.4 Разработка схемы автоматизации реактора

Растворение золотосодержащих гранул происходит в реакторе, нагрев которого производится паром (поз.1). Температура реакции контролируется датчиком (поз.2-1), который преобразует аналоговый сигнал в дискретный (A/D) и передает его в ЭВМ программу (DI). В случае если фактически переданное значение отличается от оптимального режима, заданного ИНС, программа формирует уведомление на экран ответственного сотрудника (DO) о необходимости уменьшения или увеличения подачи пара (поз. 2-4) в рубашку реактора.

Управление вращением реактора (HSA, поз. 3) осуществляется вручную посредством переключателя на щите (SA). Режимы вращения регулируются ручным нажатием кнопок (SB4 – 10 об/мин, SB5 - 20 об/мин). В случае аварийной ситуации на пульте предусмотрена кнопка аварийного отключения (SB3). Контроль отходящего газа (NO_2) в ходе процессе реализован через стеклянный теплообменник, в котором установлен газоанализатор (поз. 6-1, QI).

Посредством передачи дискретного сигнала программа узнает об отклонении концентрации газа от оптимального интервала (поз. 6-2) и формирует системное уведомление (поз. 6-3) о необходимости уменьшить или увеличить подачу азотной (поз. 6-4) или соляной (поз. 6-5) кислот аппаратчику.

Для начала реакции первой в реактор дозируется азотная кислота (поз. 8). Сотрудник дозирует кислоту со скоростью, определенной ИНС. В случае отклонения от заданного значения программа информирует (поз. 7-3) о необходимости корректировки (поз. 7-4).

Спустя 30 минут после добавления азотной кислоты дозируется химически чистая соляная кислота (поз. 10). Скорость подачи контролируется датчиком расхода (поз. 9, FQIS). Оповещение сотрудника в случае отклонения предусмотрена (поз. 9-3). После дозирования соляной кислоты включают вращение реактора (SA). Продолжительность растворения гранул определяется ИНС. По истечению времени программа информирует аппаратчика о необходимости добавления деионизированной воды (поз. 5) в объеме и скоростью подачи, заданной программой. В случае отклонения аналогичным образом формируется системное предупреждение (поз. 4-3) с возможностью корректировки режима (поз. 4-4).

После добавления воды вращение реактора продолжается до момента появления системного уведомления о необходимости прекращения процесса. В соответствии с которым сотрудник останавливает реактор (SA) и сливает полученный раствор через сито на нутч-фильтр. На сите остаётся нерастворимый осадок, а на тканевой поверхности нутч-фильтра – хлорид серебра. Нерастворимый осадок сушат, переплавляют в гранулы и повторно растворяют со следующей партией.

Предлагаемая схема автоматизации реактора представлена на рисунке 50.

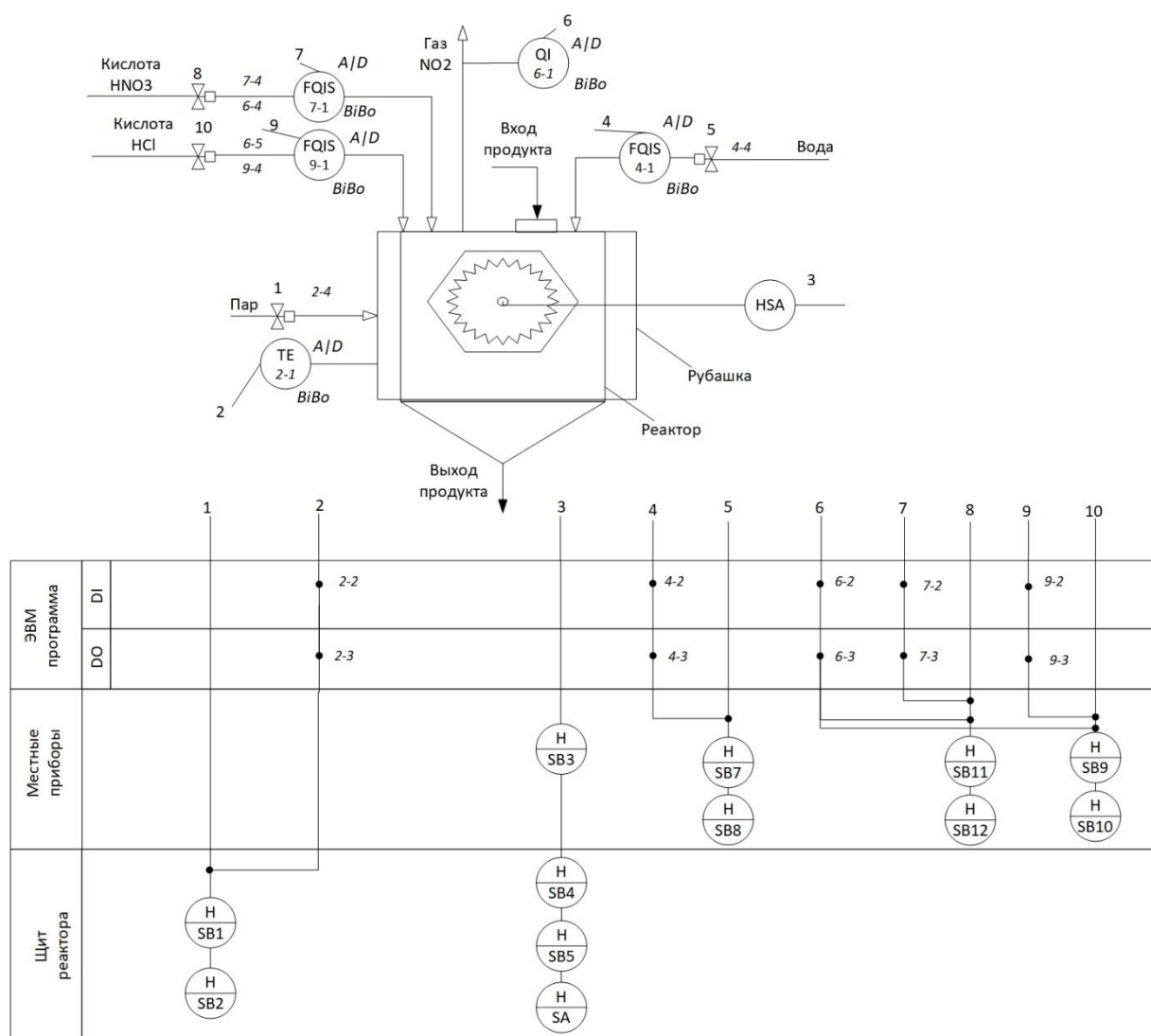


Рисунок 50 – Схема автоматизации реактора кислотного растворения

Представленная схема автоматизации выполнена развернутым способом, при котором место расположения технических средств автоматизации контура контроля и управления указываются на диаграмме, отображая функциональные признаки датчиком и промежуточные операции с сигналами.

4.5 Выводы по главе 4

1. В ходе решения задачи многокритериального выбора методами МАИ и ELECTRE оптимальным решением стала микросервисная архитектура, взятая за основу для проектирования программного обеспечения.

2. Алгоритм работы ПО в рамках предлагаемой микросервисной архитектуры решения описывается следующим образом: данные с датчиков реактора записываются в базу данных и посредством фоновго задания автоматически

передаются в микросервис визуализации для построения графиков. Параллельно информация с датчиков поступает в сервис контроля оптимальных режимов для обнаружения возможных отклонений. В случае выявления сбоя на экран ответственного сотрудника поступает системное уведомление о необходимости корректировки технологического режима. Отклонения от оптимальных режимов хранятся в соответствующей базе данных и используются для дальнейшего переобучения нейросети.

3. Структура разрабатываемой АСУ ТП состоит из трех уровней:

Первый уровень состоит из датчиков: 1 температуры, 3 расходомера, 1 газоанализатор. Второй уровень представлен вентилями, установленными на трубопроводах и используемыми для контроля подачи реактивов.

Третий уровень состоит из системы серверов, компьютеров и мониторов, на которых визуализируется контроль изменения технологических параметров, формируются системные предупреждения сотрудников и вырабатываются алгоритмы корректировки режимов.

4. Разработанная программа для ЭВМ состоит из 3 экранов: экран «Выбор операции», экран «Подбор оптимальных режимов», экран «Контроль режимов». Программное обеспечение позволяет осуществлять мониторинг динамических характеристик переделов и, при превышении или снижении нормативных показателей, оперативно уведомлять аппаратчика о необходимости добавления реагента с расчетом требуемого объема.

5. Согласно предлагаемой схеме автоматизации реактора кислотного растворения, выполненной развернутым способом, мониторинг технологических режимов будет осуществляться посредством передачи дискретных сигналов с датчиков в ЭВМ программу (DI): температуры (TE), объема отходящий газов (QI), расхода кислот и деионизированной воды (FQIS). Корректировка технологических параметров будет выполняться в ручном режиме с учетом предложенных решений разработанной программы (DO) с использованием: вентилях трубопроводов подачи горячего пара, кислот и воды. Управление вращением реактора осуществляется аналогично вручную посредством переключателя на щите.

ГЛАВА 5. Опытнo-промышленные испытания по царскoводoчному выщелачиванию золотосoдержащих гранул

5.1 Опытнo-промышленные испытания выщелачивания золота с применением нейросетевой модели

Испытания прогнозной модели, представленной в виде ансамбля нейронных сетей в разделе 3.1, выполнялись на площадке АО «Московский завод по обработке специальных сплавов». Опыты проводились на производственном реакторе с максимальной загрузкой 70 кг лигатурного золота и диапазоном вращения 10-20 оборотов/минуту.

Для проведения испытаний по выщелачиванию гранул 3л б/пр в качестве реагентов были выбраны концентрированные кислоты HCl - 36% и HNO₃ - 57%. В качестве исходного сырья использованы гранулы крупностью, мм: длина -10±3, ширина - 8±1, толщина 0,7±0,1. Химический состав партий описан в таблице 45.

Таблица 45. Химический состав гранул для полупромышленных испытаний

№ партии	Au, %	Ag, %	Cu, %	Прочее, %	Масса гранул, кг
1	25,14	17,71	45,15	12	59,53
2	31,15	12,42	49,14	7,29	59,77
3	41,12	5,41	38,12	15,35	59,11
4	54,52	9,13	30,75	5,6	59,53
5	65,15	15,67	6,16	13,02	59,84
6	70,12	5,41	20,13	4,34	59,63
7	75,4	9,14	5,45	10,01	59,6
8	80,31	6,67	8,12	4,9	59,71
9	85,54	5,12	3,47	5,87	59,32
10	90,12	4,32	3,15	2,41	59,45

Испытаний проводились при соблюдении технологических режимов процесса, определенные нейросетевой моделью, в таблице 46.

Таблица 46. Технологические режимы выщелачивания

№	T:Ж	T,°C	V, об/мин	t,чч:мм	V HNO ₃ , л/мин	V HCl, л/мин	V воды, л/мин	n NO ₂ (кг/м ³)
1	1:3	80	20	5:56	3	3	20	8,9
2	1:3	80	20	5:21	3	3	20	8,9
3	1:4	80	20	4:10	3	4	10	9,5
4	1:4	60	10	4:51	3	4	10	9,5
5	1:4	60	10	5:18	3	4	20	9,5
6	1:4	60	10	5:21	3	4	10	10,5
7	1:5	40	10	5:03	4	5	15	10,5
8	1:5	40	10	5:51	4	5	10	11
9	1:5	40	10	4:31	4	5	10	11
10	1:5	40	10	5:56	4	5	10	11

Прогнозные значения по выходу процесса, определенные нейросетевой моделью, и фактические значения проведенных испытаний представлены в таблице 47.

Таблица 47. Прогнозные и фактические значения по выходу процесса

№ партии	Прогнозные значения			Фактические значения		
	Масса НО, кг	Au в НО, г	Извлечение Au в раствор, %	Масса НО, кг	Au в НО, г	Извлечение Au в раствор, %
1	0,66	133,2	99,11	0,665	135,27	99,31
2	0,595	97,56	99,47	0,599	99,21	99,68
3	0,415	374,80	98,45	0,418	380,06	98,71
4	0,53	281,72	99,13	0,534	286,27	99,42
5	0,66	170,76	99,56	0,665	173,23	99,76
6	0,233	288,09	99,31	0,235	292,27	99,58
7	0,718	380,63	99,15	0,724	386,37	99,38
8	0,494	292,03	99,39	0,497	296,20	99,66
9	0,649	147,15	99,71	0,653	149,37	99,95
10	0,729	564,69	98,94	0,734	572,86	99,23

На основании результатов таблицы 47 на рисунках 51 - 53 представлено сравнение фактических и прогнозных значений, определенных нейросетевой моделью.

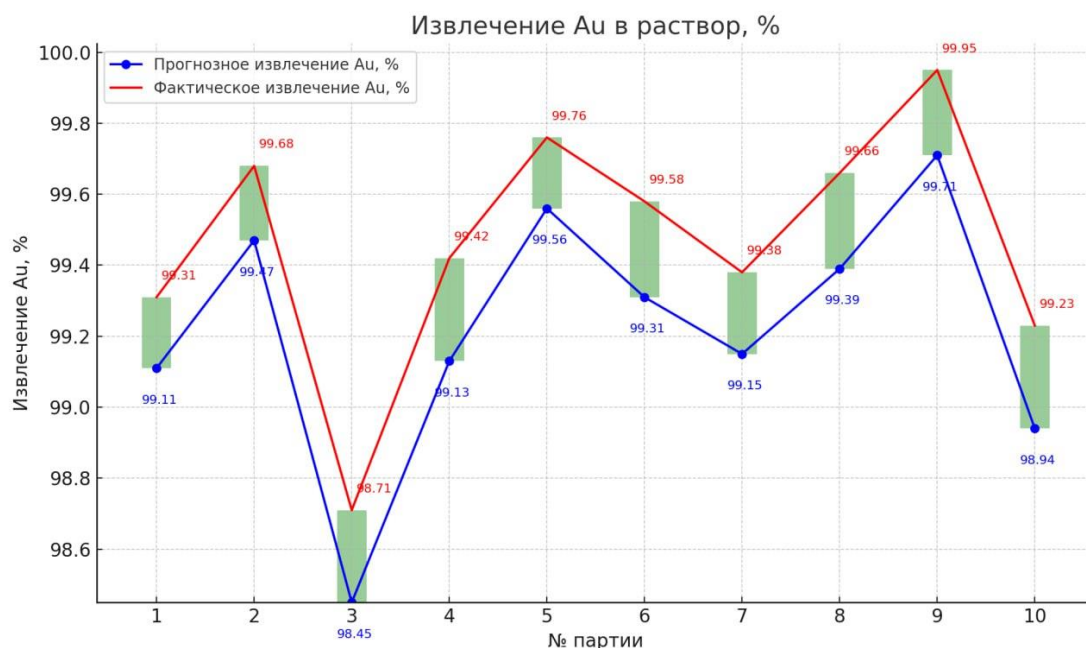


Рисунок 51 – Результаты сопоставления прогнозных и фактических данных, полученных в ходе полупромышленных испытаний по извлечению золота в раствор (%)

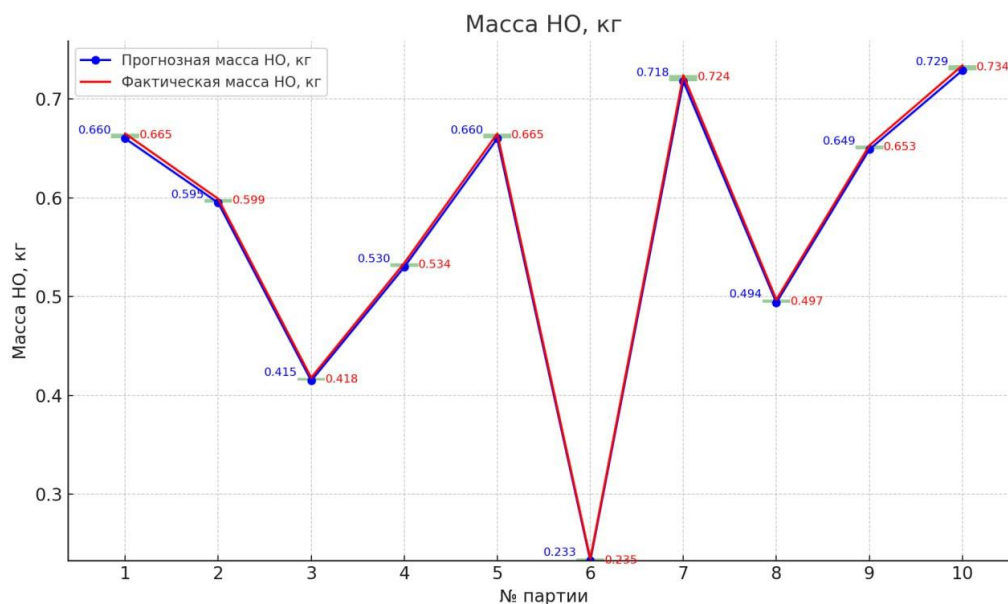


Рисунок 52 – Результаты сопоставления прогнозных и фактических данных, полученных в ходе полупромышленных испытаний по массе нерастворимого осадка (кг)

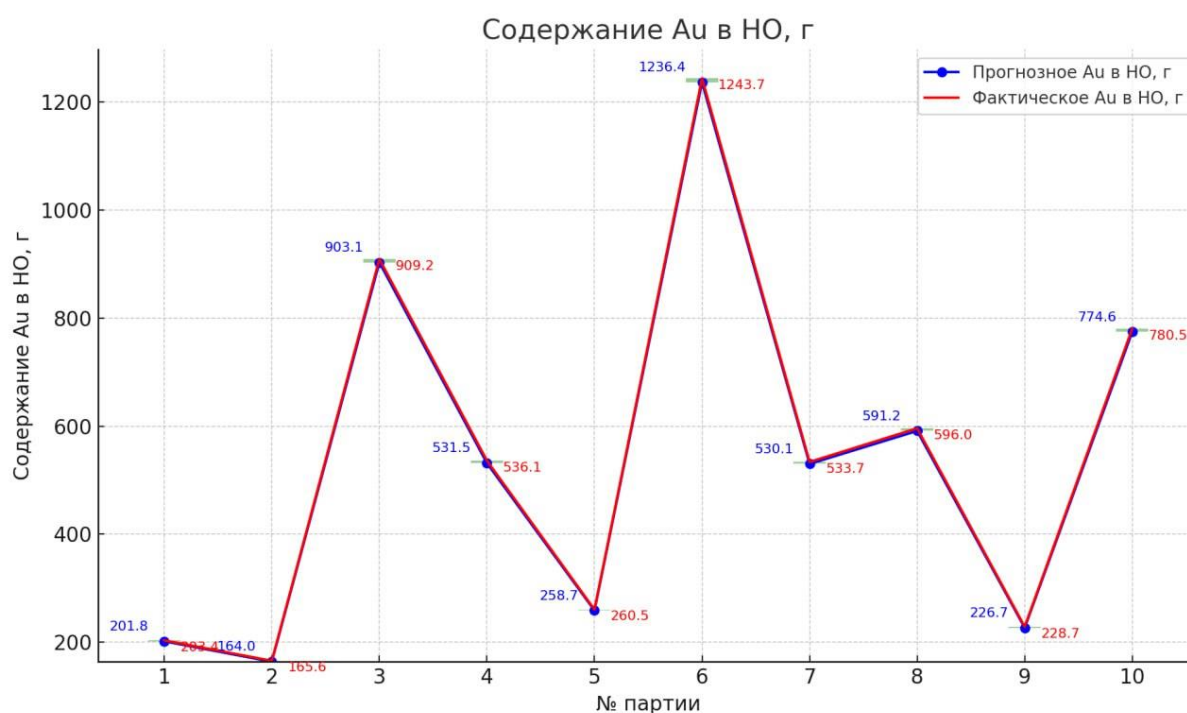


Рисунок 53 – Результаты сопоставления прогнозных и фактических данных, полученных в ходе полупромышленных испытаний по содержанию Au в нерастворимом осадке (г)

Результаты отклонений в процентах прогнозных данных, определенных нейросетевой моделью, представлены в таблице 48.

Таблица 48. Оценка отклонений фактических результатов от прогнозных

№ партии	Отклонение по массе НО, %	Отклонение по содержанию Au в НО, %	Отклонение по извлечению Au в раствор, %
1	0,76	1,56	0,20
2	0,67	1,69	0,21
3	0,72	1,40	0,26
4	0,75	1,62	0,29
5	0,76	1,45	0,20
6	0,86	1,45	0,28
7	0,84	1,51	0,23
8	0,61	1,43	0,28
9	0,62	1,51	0,24
10	0,69	1,45	0,29

По данным таблицы можно отметить точность прогноза нейросетевой модели составляет:

- 99,27% в части расчета массы нерастворимого осадка;
- 98,49 в части расчета содержания золота в нерастворимом осадке;
- 99,75% в части расчета извлечения золота в раствор.

Применение нейросетевой модели подбора технологических режимов обеспечило извлечение золота в раствор на уровне 98,71 – 99,95% при этом выход нерастворимого осадка составил 0,17 – 0,53%, а хлорида серебра 2,28 – 3,15% от веса лигатурного золота, взятого на растворение. Содержание золота в нерастворимом осадке зафиксировано на уровне 0,05 – 1,29 %. Размер фракций хлорида серебра составил 600 – 700 мкм.

5.2 Имитация технологических процессов с оптимальными режимами растворения

На основе данных о продолжительности растворения, полученных в ходе опытно-промышленных испытаний, выполнен повторный запуск имитационной модели в программном продукте Business Studio 6 Professional.

Параметры запуска имитации приведены в таблице 49.

Таблица 49. Параметры запуска имитации

Наименование параметра	Время выполнения
Время начала	01.02.2025 00:00:00
Время окончания	28.02.2025 00:00:00
Длительность	28 д. 00:00:00

Настройка периодичности запуска имитационной модели представлена на рисунке 54.

Интервалы '0:00:00 — 0:00:00'

Интервал возникновения экземпляров события

☒ Сутки Время возникновения:

☐ Год ☒ Задать: начало 00 : 00 : 00 окончание 00 : 00 : 00 длительность 24 : 00 : 00

☐ Рабочее время по календарю: ☒ Базовый календарь ...

Повторять

☐ Нет

☒ Ежедневно ☒ каждый 1 рабочий день

☐ Еженедельно по календарю ☒ Базовый календарь ...

☐ Ежемесячно ☐ каждый 1 день

☐ Ежегодно ☐ скользящий график: Рабочие дни: 1 Выходные дни: 1

Пределы повторения

Начало: 01.02.2025

Окончание: ☐ нет конечной даты

☐ завершить после 1 повторений

☒ дата окончания 28.02.2025

Сохранить Закрыть

Рисунок 54 – Настройка интервалов возникновения экземпляров события

Результаты запуска имитационной модели представлены в таблице 50.

Таблица 50. Результаты повторной имитации технологических процессов

Процесс	Среднее время выполнения операций за 2024 год	Среднее время выполнения операций за февраль 2025 года
Взвесить сырье	00:30:42	00:28:15
Принять сырье	00:40:01	00:35:41
Передать на приемную плавку	00:30:23	00:25:43
Приемная плавка	02:15:00	02:20:10
Грануляция	00:25:12	00:35:12
Отбор и передача пробы на анализ	00:45:00	00:43:15
Принять гранулы	00:25:00	00:24:30
Растворение	08:35:12	05:14:08
Осаждение золота	05:10:10	04:50:10

Процесс	Среднее время выполнения операций за 2024 год	Среднее время выполнения операций за февраль 2025 года
Декантация	00:30:15	00:30:12
Промывка	00:20:05	00:21:15
Фильтрация	02:06:20	01:56:20
Повторная плавка	01:30:00	01:35:00
Анализ % содержания золота	00:05:00	00:05:00
Сушка	00:30:06	00:30:06
Взвешивание	01:30:00	01:30:00
Плавка	00:10:00	00:10:00
Розлив по слиткам	03:00:00	03:00:00
Упаковка и маркировка	02:10:00	02:15:06
Передать слитки на склад готовой продукции	00:30:06	00:25:05
Принять решение о повторном растворении	00:20:00	00:20:00
Анализ причин отклонения	01:00:40	01:00:00
Подготовка отчета о требуемых режимах процесса	00:30:40	00:35:12

Результаты имитационного моделирования технологии представлены в виде диаграммы Ганта на рисунке 55.

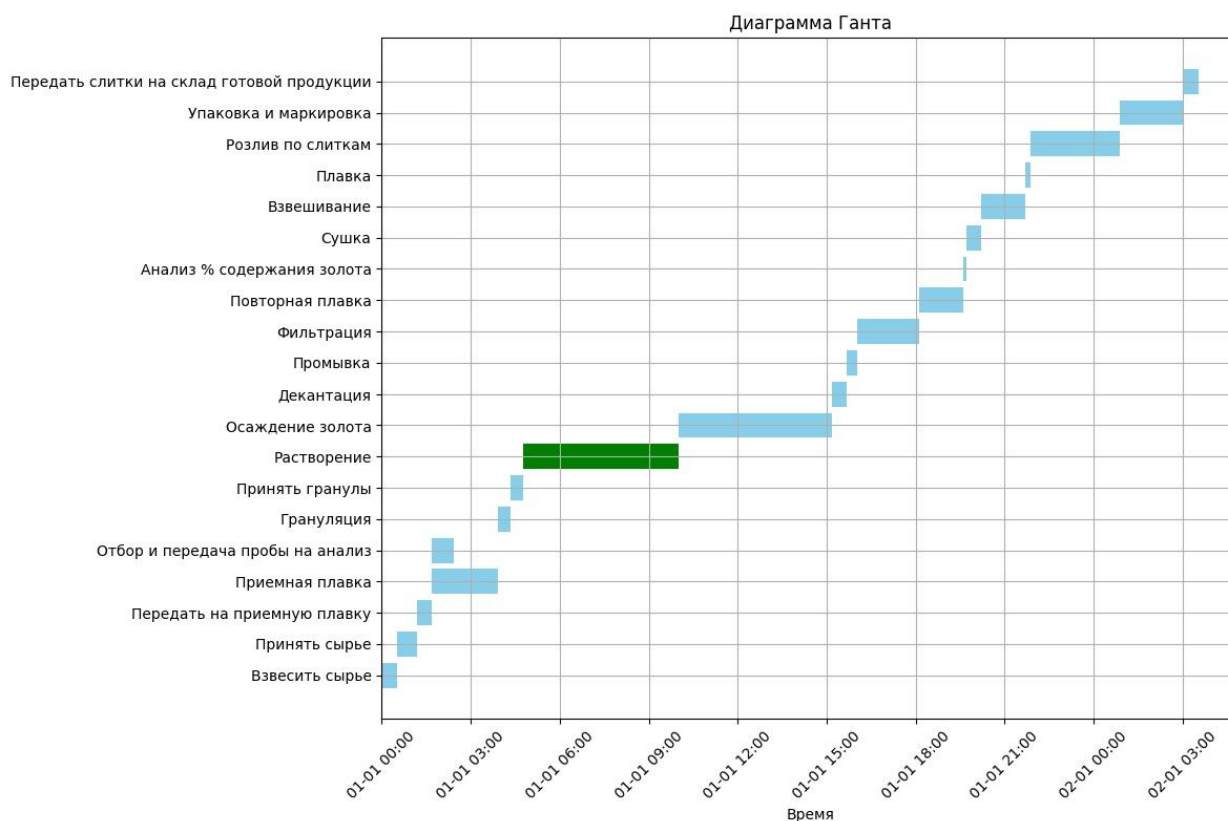


Рисунок 55 – Диаграмма Ганта технологии кислотного аффинажа на производстве с оптимальными режимами растворения

На основании результатов повторной имитации технологических процессов на производстве с оптимальными режимами растворения можно сделать вывод о сокращении общей продолжительности кислотного аффинажа с 33:29:52 до 29:50:20 за счет сокращения длительности выщелачивания золотосодержащих гранул в среднем на 3 – 3,5ч. Ранее обнаруженное в разделе 2.1.2 превышение верхней границы длительности растворения над регламентной (06:00:00) устранено, средняя продолжительность выщелачивания гранул по итогу полупромышленных испытаний составила 05:14:08.

5.3 Расчет ожидаемого технико-экономического эффекта от внедрения предлагаемой нейросетевой модели царсководочного выщелачивания золотосодержащих гранул

Готовой продукцией аффинажного производства АО «МЗСС» является «Золото аффинированное марки ЗЛА–1 П» (ГОСТ 28058-89, ТУ 1750-865-

05785324-2010), «Золото аффинированное марки ЗЛА–1» (ГОСТ 28058-89, ТУ 1750-865-05785324-2010), «ЗЛА–2» (ГОСТ 28058-89, ТУ 1750-865-05785324-2010), «Золото аффинированное марки ЗЛА–3» (ГОСТ 28058-89, ТУ 1750-865-05785324-2010).

Объемы аффинажного производства предприятия представлены на рисунке 56.

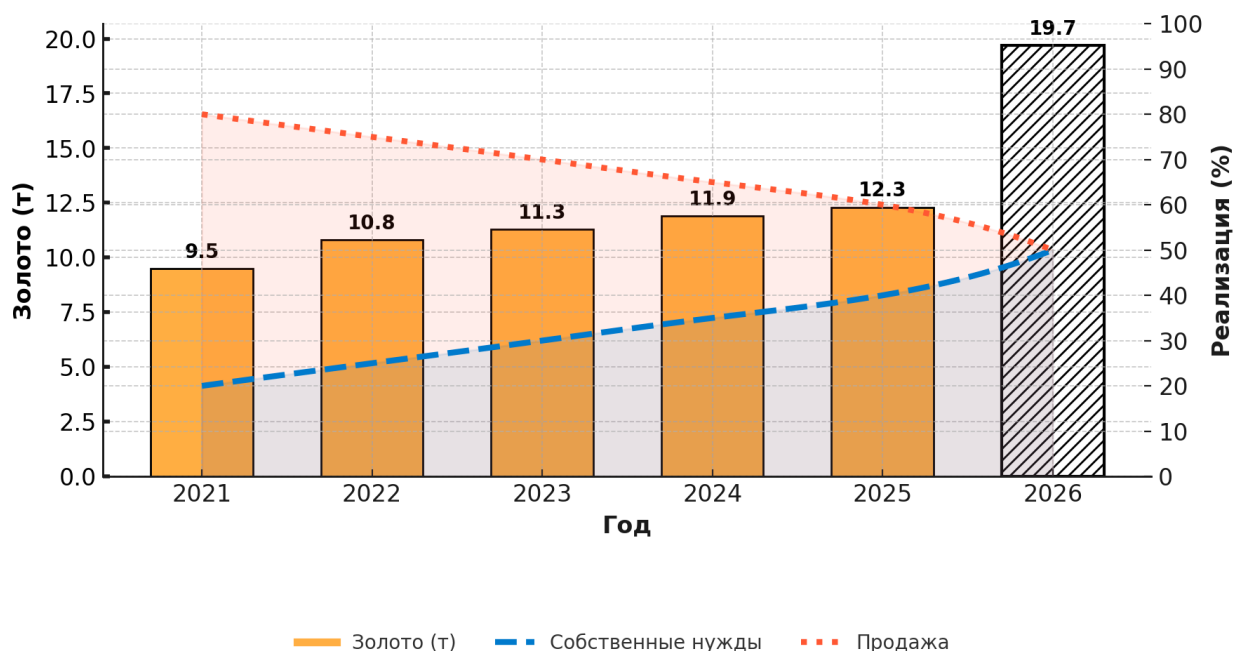


Рисунок 56 – Динамика объемов аффинажа золота на АО «МЗСС»

Основываясь на диаграмме (рисунок 56) можно сделать выводы, что в период с 2021 по 2025 год:

- объем аффинируемого золота (тонн) вырос на 29,5%;
- потребность использования золота в собственном производстве выросла на 20%;
- прогнозное значение по объему аффинируемого золота в 2026 году на 60% превышает показатель 2025 года, что подтверждает актуальность исследуемой темы для предприятия.

В ходе оценки экономической целесообразности предлагаемых технологических режимов растворения золота рассчитаны следующие эффекты:

- сокращение трудоемкости процесса растворения;

- снижение стоимости аффинажных услуг в части растворения золотосодержащих гранул;
- социальный эффект в части повышения эффективности труда аппаратчиков на производстве;
- сокращение объемов незавершенного производства в виде золотосодержащего порошка для повторного растворения;
- увеличение объемов извлечения хлорида серебра из раствора;
- повышение коэффициента фондоотдачи (г/руб), демонстрирующий рост извлечения золота на 1 рубль стоимость реактора;
- рост коэффициента интенсивной нагрузки, характеризующего увеличение выпуска продукции в единицу времени в среднем на один реактор.

Для целей исследования стоимость аффинажа усреднена по массовой доле золота для интервалов 0-30% и 30-85%. Стоимость аффинажных услуг составляет при аффинировании золота лигатурного с массовой долей Au до 30% составляет 22,78 руб./г., при содержании Au от 30 до 85 % - 1,62 руб./г.

Основываясь на имеющейся статистике предприятия за 2020-2024 г.г., определены фактические значения показателей эффективности исследуемой технологии, а так же прогнозные значения в ходе промышленной эксплуатации предложенных технологических режимов (таблица 51).

Таблица 51. Фактические и прогнозные значения показателей эффективности технологии растворения

Показатель эффективности	Фактическое значение	Прогнозное значение
Технические показатели		
Объем нерастворимого осадка при первичном растворении	7,2 – 9,1% от массы исходного сырья	0,17 – 0,53%
Объем брака по золотому порошку	8 – 10 % от общей массы золотого порошка	1 – 2%
Объем хлорида серебра после первичного растворения	1,15 – 2,10 % от массы исходного сырья	2,28 – 3,15%
Показатели производительности		

Длительность операции растворения	5 – 9 ч	4 – 6 ч
Объем отработанных гранул, добавляемых к новой партии растворения, %	5 – 7% от общей массы партии	0,5 – 1 %
Извлечение золота в раствор, %	91 – 95% при первичном растворении	99,5-99,9%

Ниже представлены исходные данные для перевода рассчитанного объема экономии ресурсов, задействованных в процессе аффинажа, в стоимостные показатели.

Договорная цена на аффинаж золота, руб/г с массовой долей Au до 30% % – 763,36 руб./г., при содержании Au от 30 до 85 % – 51,16 руб./г.

Стоимость реагента HCl для кислотной обработки составляет 20,04 руб./кг (вне зависимости от массовой доли золота в исходном сырье). -

Расход электроэнергии в процессе работы реактора мощностью 4 кВт составляет 2,7 кВт/кг.

5.3.1 Экономический эффект в стоимостном измерении

В таблице 52 приведен расчет экономического эффекта в стоимостном выражении от усовершенствования технологии кислотного растворения лигатурного золота с массовой долей Au до 30% и 30 - 85 %.

Таблица 52. Результаты расчета экономического эффекта от внедрения технологических режимов

Параметр	Массовая доля золота в сплаве золота лигатурного, %	
	от 30-85%	менее 30%
Количество золота в 1 процессе, г	27 886,1	
Стоимость аффинажа золота с НДС, руб/г	1,26	1,62
Оценочная стоимость услуг по аффинажу золота с НДС, руб/процесс	35 136,49	45 188,66
Годовая оценочная стоимость услуг по аффинажу золота, руб/год	15 460 055,6	19 883 008,37
Процент брака по золотому порошку, %	9	

Объём извлечения золотого порошка, г/процесс	24 070	
Договорная цена на аффинаж золота, руб/г	51,16	173,36
Стоимость потерь золота, руб/процесс	128 398,75	435 090,06
Годовая стоимость потерь золота, руб/год	56 495 450,40	191 439 626,31
Потенциальный рост дохода от снижения процента брака по золотому порошку, руб/процесс	117 698,86	398 832,55
Годовой рост дохода от снижения процента брака по золотому порошку, руб/год	51 787 496,2	175 486 324,12
Объём соляной кислоты в режимах «как есть», кг/процесс	387,28	309,82
Объём соляной кислоты в режимах «как будет», кг/процесс	309,82	232,37
Стоимость соляной кислоты, руб/кг	20,04	
Экономия в затратах на кислотную обработку соляной кислотой, руб/процесс	1 552,22	
Экономия в затратах на кислотную обработку соляной кислотой, руб/год	682 975,23	
Средняя длительность процесса в режимах «как есть», ч	9	
Средняя длительность процесса в режимах «как будет», ч	5	
Расход электроэнергии для процесса, кВт/кг	2,7	
Цена электроэнергии для производственных предприятий, руб/кВт*ч	6,14	
Стоимость затрат на электроэнергию в режимах «как есть», руб/процесс	4 160,66	
Стоимость затрат на электроэнергию в режимах «как как будет», руб/процесс	2 311,48	
Экономия на электроэнергии, руб/процесс	1 849,18	
Экономия на электроэнергии, руб/год	813 640,5	
Итоговая экономия, руб/процесс	3 401,40	
Итоговая годовая экономия, руб/год	1 496 615,73	
Оценочная стоимость услуг по аффинажу золота с НДС с учётом экономии, руб/процесс	31 735,08	41 787,26
Годовая оценочная стоимость услуг по аффинажу золота с НДС с учётом экономии, руб/год	13 963 437,16	18 386 392,64

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что использование предложенных технологических режимов растворения золотосодержащих гранул с применением нейросетевого прогнозирования позволят снизить стоимость

аффинажных услуг за счет сокращения:

- брака по золотому порошку (с 8 – 10 % до 1 – 2%);
- использования электроэнергии (с 4 160,66 до 2 311,48 руб/процесс);
- объема используемой соляной кислоты (с 387,28 до 309,82 кг/процесс).

Итоговая экономия на одну операцию растворения составила 3 401,40 рублей, в рамках года экономия возрастает до 1 496 615,73 рублей.

Стоимость услуг по аффинажу золота с учетом НДС для лигатурного золота с массовой долей Au менее 30% сократилась с 35 136,49 до 31 735,08 рублей, с содержанием Au от 30 - 85 % с 45 188,66 до 41 787,26 рублей. Кроме того, оценен потенциальный рост дохода предприятия в результате сокращения брака по золотому порошку. За один цикл аффинажа возможно повысить объём извлечения золота для последующей реализации. Потенциальный рост дохода составит 117 698,86 руб. при массовой доле золота от 30% до 85% и 398 832,55 руб. при доле золота менее 30%. Результаты расчета итоговой экономии сокращения использования электроэнергии и объема используемой соляной кислоты представлены на рисунке 57.

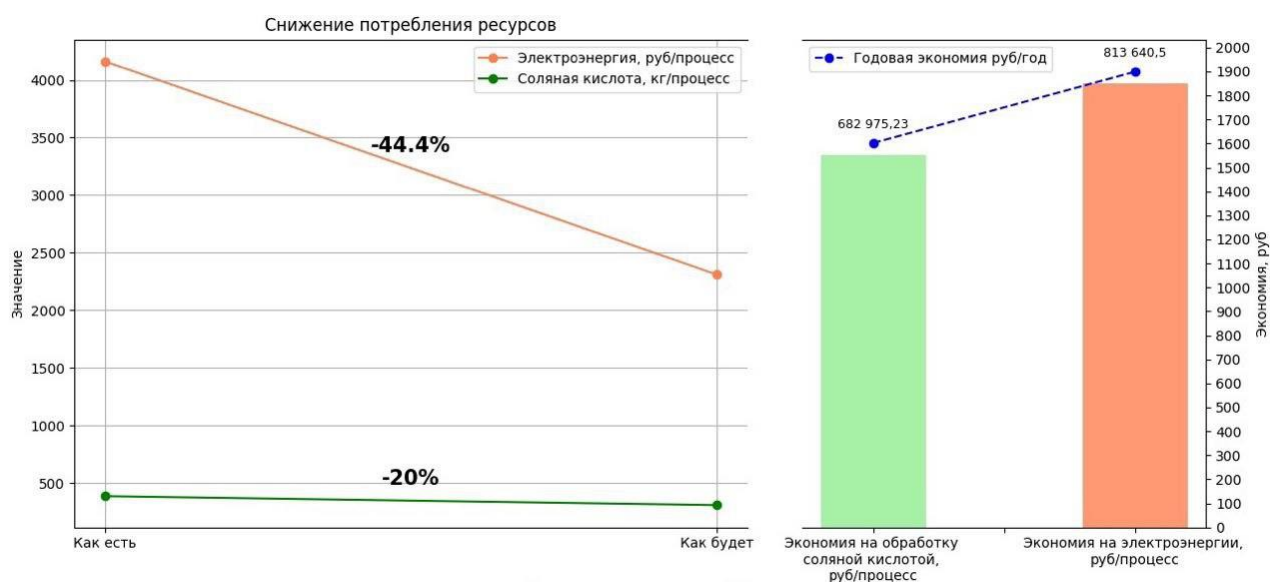


Рисунок 57 – Расчет экономического эффекта в разрезах процесса и года

Таким образом, годовая оценочная стоимость услуг по аффинажу золота для Au до 30% сократится на 7,53 %, для Au 30 - 85 % на 9,7 %.

5.3.2 Экономический эффект трудовой деятельности

В ходе оценки экономических эффектов выполнен расчет, подтверждающий сокращение себестоимости процесса за счет снижения трудоемкости (рисунок 58).

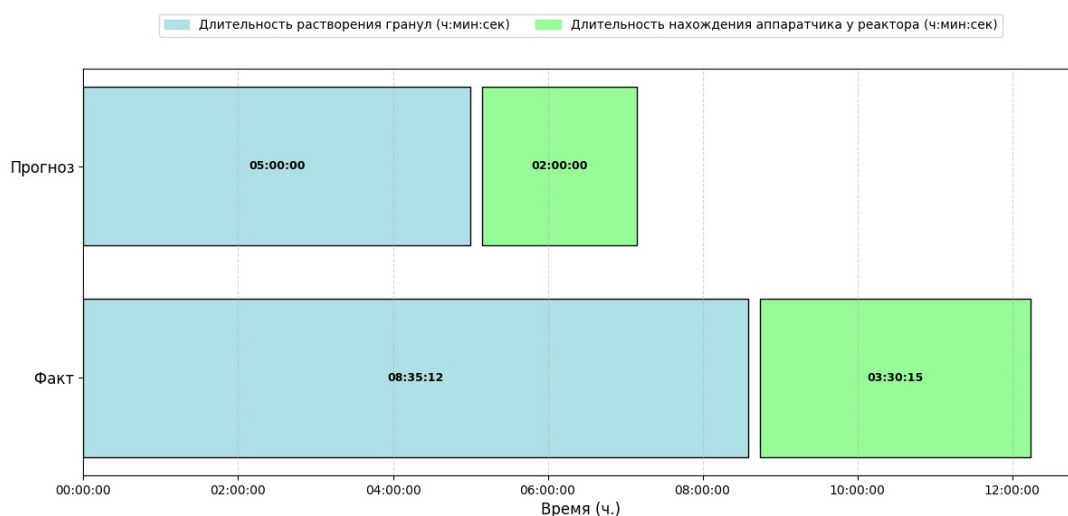


Рисунок 58 – Фактическая и прогнозная трудоемкость процесса

Основываясь на фактических и прогнозных значениях: продолжительности растворения и затрачиваемого сотрудниками времени в ходе выполнения данной операции получаем снижение трудоемкости с 3,5 до 2 чел-ч на 1 экземпляр запуска процесса. Годовая экономия может достигнуть 660 чел-ч после внедрения предложенных технологических режимов.

В результате фактическая длительность нахождения аппаратчика у реактора в процессе растворения будет снижена за счет использования ЭВМ программы, позволяющей следить за изменениями динамических характеристик протекания реакции и, при превышении или снижении нормативных показателей, оперативно уведомлять аппаратчика о необходимости добавления реактива. В результате снижается влияние человеческого фактора на выход годного.

Предложенные технологические режимы позволят повысить безопасность труда в цехе за счет автоматизированного контроля выделения ядовитого газа в процессе растворения, тем самым сократив количество внештатных ситуаций, связанных с отравлением сотрудников.

Высвобожденные человеко-часы могут быть перераспределены по остальным операциям кислотного аффинажа, в выполнении которых преобладает

ручной труд. Данный факт позволит распараллелить выполнение производственных задач, минимизируя длительность всех технологической цепочки.

Таким образом, по итогу внедрения предложенных технологических режимов можно выделить следующие преимущества, положительно влияющие на условия труда:

- уменьшение количества заболеваний, связанных с работой на химически опасном производстве;
- сокращение затрат на социальное обеспечение за счет сокращения травматизма на производстве;
- сокращение затрат на лечение и на мероприятия по охране труда и технике безопасности;
- сокращение производственных затрат, которые могут возникнуть при потере внимания за ходом выполнения процесса со стороны сотрудника.

5.3.3 Экономический эффект в натуральном выражении

В ходе оценки экономических эффектов рассмотрен фактор сокращения объёма золотосодержащих гранул, переплавленных из золотого порошка и нерастворимого осадка, для повторного растворения.

Сокращение объема повторно используемых гранул в ходе кислотного выщелачивания приводит к сокращению производственного цикла с момента получения исходного сырья до получения готовой продукции. На текущий момент объем отработанных гранул, добавляемых к новой партии растворения, составляет 5 – 7% от общей массы лигатурного золота. Предложенные технологические режимы позволят сократить данный показатель до 0,5-1% за счет увеличения % извлечения золота в раствор при первичном растворении.

В рамках предложенных режимов наблюдается рост объема хлорида серебра после первичного растворения исходного сырья. Текущее значение составляет 1,15 – 2,10 % от массы лигатурного золота, прогнозное: 2,28 – 3,15%. Данный эффект будет достигнут за счет увеличения роста фракции хлорида серебра с 0,3 мм до 0,6

мм при добавлении воды в объеме 0,5 от объема царсководочного раствора и скорости вращения реактора – 10 об/мин. Перевод в натуральный показатель полученных результатов при варианте загрузки исходного сырья в максимальном объеме 75 кг представлен в таблице 53.

Таблица 53. Перевод достигнутых эффектов в натуральные показатели

Фактические значения	Прогнозные значения
Объем повторно используемых гранул от общего объема загружаемого сырья за один цикл	
5-7%	0,5-1%
3,75-5,25 кг	0,375 – 0,75 кг
Объем исходного сырья, используемого в каждом цикле	
69,75 - 71,25 кг	74,25 – 74,625 кг
Объем хлорида серебра после первичного растворения от общего объема загружаемого сырья за один цикл	
1,15 – 2,1%	2,28 – 3,15%
0,86 – 1,58 кг	1,71 – 2,36 кг

Рост твердого остатка AgCl имеет важное значение в момент фильтрации полученного раствора. Фракции меньшей крупности 0,3 – 0,4 мм просачиваются сквозь тканевую поверхность нутч-фильтра и попадают на дальнейшее осаждение, что в конечном итоге приводит к браку золотосодержащего порошка

5.3.4 Показатели эффективности использования основных средств

В ходе оценки экономических эффектов от внедрения предлагаемых режимов посчитаны показатели эффективности использования основных средств, а именно коэффициенты фондоотдачи (г/руб) и интенсивной нагрузки (%). При расчете коэффициента фондоотдачи выполнялся анализ объема аффинируемого золота в год, приходящегося на 1 рубль вложений в реактор. Расчеты приведены в таблице 54.

Таблица 54. Расчет фондоотдачи

Параметр	Факт	Прогноз	Прогноз (при росте спроса на 60%)
Объем извлечения золота, кг в год	12 300	13 413,15	21 461,04
Стоимость ОФ, руб	1 025 000		

Срок службы реактора, лет	10		
Фондоотдача, г/руб в год	1,2	1,31	2,1
Фондоотдача, руб/руб в год	9 774	10 659	17 054

Согласно выполненным расчетам, 1 рубль вложений в покупку реактора приносит в среднем 1,2 г. золота, после внедрения предложенных режимов данный показатель вырастет до 1,31 г., а с учетом прогнозируемого спроса на 2026 год достигнет отметки в 2,1 г.

Таким образом, $\Phi_{\text{факт}} = 9774 \text{ руб/руб}$, $\Phi_{\text{прогноз}} = 10659 \text{ руб/руб}$.

Рост коэффициента интенсивной нагрузки характеризует увеличение выпуска продукции в единицу времени в среднем на один реактор. Коэффициент рассчитывается как отношение максимальной загрузки реактора (75 кг) к массе лигатурного золота, первично поступившего на растворение (65,1 кг). Объем гранул, вторично поступивших на растворение, составляет 3,26 кг, следовательно, масса первичного сырья в партии 61,85 кг.

Таким образом, фактическое и прогнозное значения коэффициента интенсивной нагрузки составят

$$K_{\text{инт.нагр.}}^{\text{факт}} = \frac{75 \text{ кг}}{61,85 \text{ кг}} = 0,82 \text{ (82\%)}$$

$$K_{\text{инт.нагр.}}^{\text{прогноз}} = \frac{75 \text{ кг}}{64,77 \text{ кг}} = 0,86 \text{ (86\%)}$$

5.4 Выводы по главе 5

1. По результатам опытно-промышленных испытаний точность прогноза нейросетевой модели составила:

- 99,27% в части расчета массы нерастворимого осадка;
- 98,49 в части расчета содержания золота в нерастворимом осадке;
- 99,75% в части расчета извлечения золота в раствор.

Применение нейросетевой модели подбора технологических режимов обеспечило извлечение золота в раствор на уровне 99,22 – 99,71% при этом выход нерастворимого осадка составил 0,17 – 0,53%, а хлорида серебра 2,28 – 3,15% от

веса лигатурного золота, взятого на растворение. Содержание золота в нерастворимом осадке зафиксировано на уровне 0,05 – 1,29 %. Размер фракций хлорида серебра составил 0,6 – 0,7 мм.

2. На основании результатов повторной имитации технологических процессов на производстве с оптимальными режимами растворения можно сделать вывод о сокращении общей продолжительности кислотного аффинажа с 33:29:52 до 29:50:20 за счет сокращения длительности выщелачивания золотосодержащих гранул в среднем на 3 – 3,5 ч. Ранее обнаруженное в разделе 2.1.2 превышение верхней границы длительности растворения над регламентной (06:00:00) устранено, средняя продолжительность выщелачивания гранул по итогу полупромышленных испытаний составила 05:14:08.

3. В ходе оценки экономической эффективности предлагаемой технологии установлено, что итоговая экономия на одну операцию растворения составила 3 401,40 рублей, в рамках года экономия возрастает до 1 496 615,73 рублей.

Стоимость услуг по аффинажу золота с учетом НДС для лигатурного золота с массовой долей Au менее 30% сократилась с 45 188,66 до 41 787,26 рублей, с содержанием Au от 30 - 85 % с 35 136,49 до 31 735,08 рублей. Кроме того, оценен потенциальный рост дохода предприятия в результате сокращения брака по золотому порошку. За один цикл аффинажа возможно повысить объём извлечения золота для последующей реализации. Потенциальный рост дохода составит 117 698,86 руб. при массовой доле золота менее 30% и 1 756 188,39 руб. при доле золота от 30% до 85%.

Согласно выполненным расчетам фондоотдачи: 1 рубль вложений в покупку реактора приносит в среднем 1,2 г. золота, после внедрения предложенных режимов данный показатель вырастет до 1,31 г., а с учетом прогнозируемого спроса на 2026 год достигнет отметки в 2,1 г. Рост коэффициента интенсивной нагрузки характеризует увеличение выпуска продукции в единицу времени в среднем на один реактор. Фактическое значение коэффициента интенсивной нагрузки составило 82%, прогнозное – 86%.

Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Проведён анализ основных способ выщелачивания золота, методов моделирования химико-технологических процессов и подходов к эффективному управлению аффинажной технологией на производстве.
2. Выполнена процедура оценки средней продолжительности технологических операций химического аффинажа золота на производстве с использованием имитационной модели, показавшей превышение верхней границы времени по регламенту более, чем на 2 часа для операции растворения.
3. Проведено исследование кинетики царсководочного выщелачивания золота, в ходе которого рассчитаны основные параметры, используемые для построения математической модели процесса, и определен набор факторов, оказывающих влияние на результат извлечения золота в раствор.
4. Разработана оригинальная прогнозная модель, представленная в виде ансамбля нейросетей, позволяющая прогнозировать извлечение золота в раствор (%), объем нерастворимого осадка (кг) и содержание в нем золота (%), определять технологические режимы выщелачивания золота в зависимости от исходной массы (кг), химического состава (%) и крупности (мм) лигатурного сырья, а именно: Т:Ж, температуру процесса (°C), скорость вращения реактора (об/мин), продолжительность растворения (ч), скорости подачи реагентов и концентрацию отходящего газа.
5. В ходе ансамблевой компоновки разработанных нейросетевых моделей оптимальным решением стал фреймворк, в рамках которого ИНС прогнозируют выход реакции для каждого целевого параметра в отдельности.
6. Разработана структурная схема и алгоритм функционирования автоматизированной системы управления технологией растворения золотосодержащих гранул, отличающийся индивидуальным регулированием технологических параметров, таких как: подача горячего пара, кислот и воды на основе нейросетевого прогнозирования целевых режимов процесса и контроля

отклонений показателей реакции от оптимальных значений в реальном времени.

7. Автоматизированная система-советчик спроектирована на основе микросервисной архитектуры, согласно которой данные с датчиков реактора записываются в базу данных и посредством фонового задания автоматически передаются в микросервис визуализации для построения графиков. Параллельно информация с датчиков поступает в сервис контроля оптимальных режимов для обнаружения возможных отклонений. В случае выявления сбоя на экран ответственного сотрудника поступает системное уведомление о необходимости корректировки технологического режима. Отклонения от оптимальных режимов хранятся в соответствующей базе данных и используются для дальнейшего переобучения нейросети.

8. В результате опытно-промышленных испытаний предложенного решения установлена точность автоматизированной системы-советчик в интервале 98,49 – 99,75%. На основании результатов повторной имитации технологических процессов можно сделать вывод о сокращении общей продолжительности кислотного растворения золотосодержащих гранул в среднем на 3 – 3,5 ч.

9. Расчёт экономической эффективности показал, что внедрение разработанной автоматизированной системы управления процессом выщелачивания на базе нейросетевого прогнозирования приведёт к годовой экономии в размере 1 496 615,73 рублей. Стоимость услуг по аффинажу золота с учетом НДС для лигатурного золота с массовой долей Au менее 30% сократиться с 45 188,66 до 41 787,26 рублей, с содержанием Au от 30 - 85 % с 35 136,49 до 31 735,08 рублей. В ходе оценки потенциального роста дохода предприятия в результате сокращения брака по золотому порошку установлено, что за один цикл аффинажа возможно повысить объём извлечения золота для последующей реализации, что в денежном эквиваленте составит 117 698,86 руб. при массовой доле золота менее 30% и 1 756 188,39 руб. при доле золота от 30% до 85%.

Список использованных источников

1. Карпухин А.И. Кислотно-солевой аффинаж золота и серебра. И.: Иргиредмет, 2003. 190 с.
2. Масленицкий И.Н. Metallургия благородных металлов: учебник для вузов/ И.Н. Масленицкий, Л.В. Чугаев, В.Ф. Борбат. и др.; под редакцией Л.В. Чугаева. – М: Metallургия, 1987. – 432 с.
3. Зайцев С.П., Дубровин К.Э. Производство драгоценных металлов / Зайцев С.П., Дубровин К.Э.// Энциклопедия технологий – №113. – Москва, 2019. – С.331-333
4. Котляр, Ю.А. Metallургия благородных металлов: учебник в 2-х кн. / Ю.А.Котляр, М.А. Меретуков, Л.С. Стрижко. – М.: МИСИС: Издательский дом «Руда и металлы», 2005. – 824 с
5. Леонов, С.Б. Гидрометаллургия, ч. II. Выделение металлов из растворов и вопросы экологии / С.Б. Леонов, Г.Г. Минеев, И.А. Жучков. – Иркутск: ИрГТУ, 2000. – 497 с.
6. Старовойтов А.В. Кинетика гетерофазного окисления золота в тиокарбамидно-тиоцианатных, тиокарбамидно-тиосульфатных и тиоцианатно-тиосульфатных растворах. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Тверь, 2020, 37-41 с.
7. Пат. RU 2 751 202 C1, Российская Федерация, C22B11/00 Способ переработки золото-серебряных сплавов/ Э.Ф. Грабчак; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество "Красноярский завод цветных металлов имени В.Н. Гулидова"– 2020126192; заявл. 2020.08.03; опубл. 2021.07.12
8. Самадов А.С. Термодинамические характеристики равновесных реакций комплексообразования ионов серебра(I) и меди(I, II) с тиомочевинной и ее производными в водных растворах, Диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук. Москва, 2021, 14-16 с.
9. Вальцева А.И. Технология переработки золотосодержащего сырья методом гидро- и электрохлоринации. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Екатеринбург, 2024, 14-24 с.

10. Карпухин А.И. Пуск и освоение технологии аффинажа золота на Колымском аффинажном заводе / А.И. Карпухин, Л.А. Медведева, С.А. Феоктистов // Цветные металлы. – 1999. – №10. – С. 22–23.
11. Жмурова В.В. Разработка технологии кислотного выщелачивания тяжелых цветных металлов из золотосодержащих катодных осадков. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. И., 2019, 183 с.
12. Жуков В.В. Моделирование и управление процессом выщелачивания золота в каскаде реакторов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Спб., 2013, 131 с.
13. Карпухин А.И. Исследование кислотной технологии переработки богатых золотосодержащих концентратов «золотой головки» / А.И. Карпухин, С.С. Орлов // Вестник ИрГТУ. – 2014. – №3. – С. 141–145.
14. Жмурова, В.В. Технология повышения качества золотосодержащего сырья, отправляемого на аффинажные заводы / В.В. Жмурова // Информационно-рекламный бюллетень «Золотодобыча». – №163. – Иркутск, 2012.
15. Жмурова, В.В. Кислотное выщелачивание примесей золотосодержащего катодного осадка / В.В. Жмурова, Н.В. Немчинова, Г.Г. Минеев // Цветные металлы. – 2017. – № 7. – С. 41–46.
16. Акименко А.А. Автоклавное растворение металлов платиновой группы в солянокислых средах. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Красноярск., 2024, 51-54 с.
17. Выдыш С.О. Повышение комплексности переработки шламов электролитического рафинирования вторичной меди. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2024, 25-30 с.
18. Никитина Т.Ю., Петров Г.В. современное состояние и технологические перспективы применения малотоксичных растворителей золота для переработки техногенного сырья // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №1. с. 22
19. Пат. RU 2 749 959 C1, Российская Федерация, C22B11/00 Способ получения золота в виде порошка/ В.С. Сонькин, А.Р. Муралеев, Е.Г. Сидин, Д.Д.

Маганов, В.В. Глухов, М.А. Носов; заявитель и патентообладатель Акционерное общество "Приокский завод цветных металлов" – 2020141574; заявл. 2020.12.16; опубл. 2021.06.21

20. Пат. RU 2 702 250 C1, Российская Федерация, C22B11/00 Способ йод-йодидной переработки золотосодержащего сырья/ Е.П. Бучихин, И.А. Пальваль, В.М. Бахир, К.Н. Нестеров; заявитель и патентообладатель Е.П. Бучихин, И.А. Пальваль, В.М. Бахир, К.Н. Нестеров – 2019101838; заявл. 2019.01.23; опубл. 2019.10.07

21. Пат. RU 2 753 352 C1, Российская Федерация, C22B11/00 Способ восстановления золота из раствора, содержащего примеси платиновых и неблагородных металлов / Е.И. Павлова, Д.Ю. Сиротина, А.В. Черенько; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Красноярский завод цветных металлов им. В.Н.Гулидова». – 2021103766, заявл. 2021.02.15; опубл. 2021.08.13

22. Пат. RU 2 764 275 C1, Российская Федерация, C22B11/00 Способ выщелачивания золота и меди из упорной бедной золотомедной руды/ А.Г. Секисов, А.В. Рассказова, Т.Г. Конарева; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук (ХФИЦ ДВО РАН) – 2021107872; заявл. 2021.03.23; опубл. 2022.01.17

23. Сосипаторов А.И. Исследование и разработка технологии флотационного обогащения золото-углеродсодержащих руд с применением реагента-депрессора углеродистого вещества. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. И., 2019, 37-42 с.

24. Пат. RU 2 794 160 C1, Российская Федерация, C22B11/00 Способ извлечения золота из золотосодержащего сырья/ Ю.П. Морозов, А.И. Вальцева, Р.А. Апакашев, А.С. Шевченко; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уральский государственный горный университет"– 2022121536; заявл.

2022.08.09; опублик. 2023.04.12

25. Пат. RU 2 749 309 C2, Российская Федерация, C22B11/00 Способ извлечения золота и меди из сульфидного золотомедного флотоконцентрата/ Р.Н. Набиулин, А.В. Богородский, С.С. Баликов; заявитель и патентообладатель Акционерное общество "Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов" АО "Иргиредмет" – 2019128083; заявл. 2019.09.05; опублик. 2021.06.08

26. С.Н. Абсаттаров, Н.К. Турсунов, Э.М. Бахтеев, С.Ж. Азимов, Х.С. Хужахмедова Моделирование процессов химико-термической обработки на основе интеллектуального анализа данных // Журнал Universum: технические науки. 2024. – 7 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-protssessov-himiko-termicheskoy-obrabotki-na-osnove-intellektualnogo-analiza-dannyh/viewer> (дата обращения: 21.01.2025).

27. В.А. Любименко, А.П. Семёнов, В.М. Виноградов, В.А. Винокуров РГУ Нефти и Газа Методические указания к лабораторным работам по курсу "Моделирование в химической технологии". 2014. – 3 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.gubkin.ru/faculty/chemical_and_environmental/chairs_and_departments/physical_and_colloid_chemistry/files/modelirovaniye_khimiko_tekhnolog_protssessov.pdf (дата обращения: 21.01.2025).

28. С.В. Куберский, С.Р. Завгородний, М.А. Филатов, О.В. Федотов, А.Л. Кухарев Физическое моделирование электромагнитной обработки стали в промежуточном ковше // Журнал Научно-технические технологии и оборудование в промышленности и строительстве. 2022. – 68 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/fizicheskoe-modelirovanie-elektromagnitnoy-obrabotki-stali-v-promezhutochnom-kovshe> (дата обращения: 21.01.2025).

29. М.Н. Семёнова, А.С. Семёнов, Ю.В. Бебихов, И.А. Якушев Математическое моделирование физических процессов в металлических кристаллических решетках // Журнал Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. 2021. – 17,18 с. [Электронный ресурс]. Режим

доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-fizicheskikh-protssessov-v-metallicheskih-kristallicheskih-reshetkah> (дата обращения: 21.01.2025).

30. А.Т. Абдыкаримова Математическое компьютерное моделирование физических явлений // Журнал Интерактивная наука. 2023. – 16,17 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-kompyuternoe-modelirovanie-fizicheskikh-yavleniy> (дата обращения: 21.01.2025).

31. А.Н. Смирнов, Д.И. Алексеев Математическое моделирование химико-технологических процессов // Учебное пособие 2022. – 8 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://nf.misis.ru/Download/mie/Алексеев_Математическое_моделирование_химико-технологических_процессов_часть_I_2022.pdf (дата обращения: 21.01.2025).

32. В.Г. Матыс, А.А. Черник Моделирование и оптимизация химико-технологических процессов в отрасли // тексты лекций для студентов специальности 1-48 01 04 «Технология электрохимических производств» – Минск: БГТУ. 2019. – 6, 12-16 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://elib.belstu.by/bitstream/123456789/32074/1/Matys_modelirovanie_2019.pdf (дата обращения: 21.01.2025).

33. О.А. Дубовиков Методические рекомендации для самостоятельного изучения дисциплины моделирование химико-технологических процессов. 2023. – 14, 15 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://spmi.ru/sites/default/files/imci_images/univer/svedenia_jb_organizacii/SR2020/10-modelirovanie-khimiko-tekhnologicheskikh-processov-srs.pdf (дата обращения: 21.01.2025).

34. Кафаров, В. В. Математическое моделирование основных процессов химических производств: учебное пособие для вузов / — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2023. — 403 с.

35. М.А. Куликовский, В.В. Макаров Имитационное моделирование как инструмент оптимизации технологического процесса // XIV всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2024. 2024. – 1856 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://vspu2024.ipu.ru/proceedings/1855.pdf> (дата

обращения: 21.01.2025).

36. И.А. Семенов, А.В. Петров Использование искусственных нейронных сетей для поиска решений дифференциальных уравнений // Журнал Научные ведомости. 2019. – 76 с.

37. Silvan Käser, Luis Itza Vazquez-Salazar, Markus Meuwly, Kai Töpfer Neural network potentials for chemistry: concepts, applications and prospects // article. 2022. – 2 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2023/dd/d2dd00102k> (дата обращения: 21.01.2025).

38. С.А. Федорова Моделирование химико-технологических процессов // конспект лекций: учебное пособие – Севастополь: СевГУ. 2022. – 5 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://lib.sevsu.ru/xmlui/bitstream/handle/123456789/10873/%D1%80_220118.pdf?sequence=1&isAllowed=y (дата обращения: 21.01.2025).

39. И.Е. Шанин, В.С. Тынченко Концепция нейросетевого моделирования процесса электронно-лучевой сварки // Журнал Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2021. – 365 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-neyrosetevogo-modelirovaniya-protssessa-elektronno-luchevoy-svarki> (дата обращения: 21.01.2025).

40. М.Д. Корченко Перспектива использования нейросетей взамен стандартного машинного обучения // Журнал Вестник науки. 2024. – 1431, 1432 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektiva-ispolzovaniya-neyrosetey-vzamen-standartnogo-mashinnogo-obucheniya> (дата обращения: 21.01.2025).

41. Ю.В. Никитюк, Г.А. Баевич, В.Н. Мышковец, А.В. Максименко, И.Ю. Аушев Применение метода конечных элементов и искусственных нейронных сетей для определения параметров лазерной обработки стали 12х18н9т // Журнал Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. 2022. – 52 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-metoda-konechnyh-elementov-i>

iskusstvennyh-neyronnyh-setey-dlya-opredeleniya-parametrov-lazernoy-obrabotki-stali (дата обращения: 21.01.2025).

42. М.А. Куликовский, Рогов С.И., Е.В. Гоцуляк, К.М. Кугачев Оценка значимости влияния технологических параметров на результат химического аффинажа золота методом построения искусственной нейронной сети, Технология металлов, 2024 год, №6, с.32-38

43. Ленский М.А., Корабельников Д.В., Ожогин А.В., Балахнина А.В., Багров Г.В. Общая химическая технология: учебное пособие / М.А. Ленский, Д.В. Корабельников, А.В. Ожогин, А.В. Балахнина, Г.В. Багров. – Барнаул: АлтГТУ, 2022. – 85 с.

44. В. П. Мешалкин Актуальные теоретические и прикладные исследования по инжинирингу энергоресурсосберегающих высоконадёжных химико-технологических систем // Теоретические основы химической технологии. – 2021. – Т. 55, № 4. – С. 399–427.

45. Силаев А.А., Кондрацкий Д.Е., Петухова Я.А., Сизоненко А.С. Перспективы автоматизации технологических процессов химических производств // Инженерный вестник Дона. – Ростов-на-Дону, 2019. – № 1.

46. Божко В.И. Системы управления химико-технологическими процессами: учебное пособие / В.И. Божко. – М.: РТУ МИРЭА, 2019. – Ч. 1. – 156 с.

47. М.А. Куликовский, В.В. Макаров, С.И. Рогов Исследование и разработка методов автоматизации химического аффинажа золота // Сборник тезисов докладов XLIX Международной молодежной научной конференции. 2023. –с. 614-615

48. Жежера Н.И. Микропроцессорные системы автоматизации технологических процессов: учебное пособие. 2-е изд. – М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2020, 15 с.

49. Волхонский А.Н., Чуприна А.С., Падучих Д.В. Системы управления технологическими процессами как нижний уровень АСУТП // Международный студенческий научный вестник. – Москва, 2023. – № 1, 21-23 с.

50. Мурашкина И.А., Гравченко Л.А. Технология лечебно-косметических средств: Учебное пособие. – Иркутск: Иркутский государственный медицинский университет, 2021. – 150 с.

51. Петровский А.М. Профессиональная компетентность специалиста в области организации и управления химическим производством // Мир науки. Педагогика и психология. – 2022. – Т. 10, № 2, с. 45-47

52. Шишкин Л.А. Автоматизация и системы управления химико-технологическими процессами // Студенческий научный форум. – 2023. – URL: <https://scienceforum.ru/2023/article/2018032372> (дата обращения: 26.01.2025).

53. Предместьин В.Р., Лопатин А.Г., Брыков Б.А. Автоматизированные системы управления химико-технологическими процессами и производствами: Учебное пособие. – Новомосковск: ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», 2021. – 150 с.

54. Кузенков А.Н. Автоматизированная подсистема управления качеством помола цемента с прогнозированием параметров статистическими методами на основе контрольных карт. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2021. – 196 с.

55. Сухов Д.Е. Основные преимущества и недостатки автоматизированных систем управления технологическими процессами // Научный аспект. – 2024. – №3, с. 11-13

56. М.А. Куликовский Интеллектуализация технологии химического аффинажа золота // Сборник тезисов докладов 50-ой Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения». 2024. с. 544-545

57. Калинин В.Ф., Погонин В.А. Методология проектирования роботизированных автоматизированных систем управления химическими производствами // Современные наукоемкие технологии. – 2024. – № 3. – С. 38–42.

58. Дозорцев В.М., Аносов А.А., Баулин Е.С., Городнова М.В., Коростелев А.Я., Сластенов И.В. Искусственный интеллект в задачах управления химико-технологическими процессами // Автоматизация в промышленности. – 2024. – №

10. – С. 3–9.

59. Дроны, роботы и VR: какие инновации востребованы в металлургии // In-Hub. – 2022. №3, с. 37-38 – URL: https://in-hub.cnews.ru/articles/2022-08-29_dronyroboty_i_vr_kakie_innovatsii (дата обращения: 01.02.2025).

60. Куликовский М.А., Рогов С.И. Программа для визуализации контроля выделения окислов азота и расчета количества реактива в ходе растворения золотосодержащих гранул. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2023686466, 06.12.2023. Заявка от 30.11.2023.

61. Литвиненко А.Н., Сутягин М.С. Проактивный механизм обеспечения экономической безопасности компании // Вестник экономической безопасности. 2023. №2 – Санкт-Петербург, с. 367-369

62. Палкина Д. С. Экологическая обстановка в регионах базирования российских корпораций цветной металлургии // Экономика и экология территориальных образований. 2022. №1, с. 154-167

63. Чурсанов Д.А., Васильева Ю.А. Целевые ориентиры и меры развития химической промышленности. In: Актуальные проблемы экономики и управления в различных отраслях // сборник статей Международной научно-практической конференции. 2024. С. 61-64

64. Li, Z., Yao, M., Luo, Z., Luo, Z., Su, C. (2024). A chemical accident cause text mining method based on improved accident triangle. BMC Public Health, 24(1), p. 1-18

65. Oboh, I., Akpan, A. S., Joshua, A., & Onoriode, A. O. (2023). Proactive Process Safety Management - Key to the Prevention of Incidents in Industry. Journal of Engineering Research and Reports, 25(5), p. 31-40

66. Маничев Сергей Алексеевич, Лепехин Николай Николаевич Проактивный менеджмент безопасности и проактивное поведение персонала как ресурсы инжиниринга устойчивости // Вестник СПбГУ. Серия 16: Психология. Педагогика. 2020. №1, с. 145-148

67. Сулоева С. Б., Мартынатов В. С. Особенности цифровой трансформации предприятий нефтегазового комплекса // Организатор

производства. 2019. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-tsifrovoy-transformatsii-predpriyatiy-neftegazovogo-kompleksa> (дата обращения: 26.01.2025).

68. Юсупбеков, Н. Р., Гулямов, Ш. М., Эргашев, Ф. А., & Эргашев, Ф. А. (2020). Краткосрочное прогнозирование в задачах оперативного управления химико-технологическими процессами и производствами. 2020, №7, с. 135-138

69. Дозорцев, В., Баулин, Е. С., Аносов, А. А., Сластенов, И. В., Груздев, Д. А., Астафьев, А. В. Искусственный интеллект в задачах управления химико-технологическими процессами. АВТОМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, 2024, № 10, с. 10-15

70. Владов Р., Дозорцев В., Шайдуллин Р., Белоусов О. Предиктивная аналитика состояния оборудования в химико-технологических процессах // Вестник Казанского технологического университета. - 2019. - № 22. - С. 44-48.

71. Tayab, M., Al Suwaidi, H., Lari, M., Kumar, P., & Shah, V. (2024). Navigating through Operations Excellence, Process Safety and Sustainability in Upstream & Downstream Segments of Oil & Gas Operations with Resilience and Responsibility to Prevent Incidents. Presented at the ADIPEC, Abu Dhabi, UAE, November 2024. SPE-222010-MS.

72. Антипина Е.В., Мустафина С.А., Антипин А.Ф., Морозкин Н.Д. Алгоритм решения задачи оптимального управления химико-технологическим процессом с терминальными ограничениями // Вестник МГУ. 2022. №3, с. 18-21

73. Черникова О.П., Князькина О.В., Хамитов Р.М. Проектирование системы предиктивной аналитики: технический, экономический и экологический аспекты // Экономика природопользования. 2024. № 17 (1). С. 10-22.

74. М.Г. Дубровин Концепция проактивного мониторинга и управления объектами ИТ-инфраструктуры // ИТНОУ: информационные технологии в науке, образовании и управлении. 2020. №1, с. 15

75. М.А. Куликовский, В.В. Макаров Реактивное управление процессом растворения золотосодержащего сырья в ходе химического аффинажа золота// Сборник тезисов II Международная научно-практическая конференции. 2024. с. 214-215

76. А.М. Шихалёв, И.И. Хафизов Многокритериальные задачи принятия решений в управлении качеством: учеб. пособие / А.М. Шихалёв, И.И. Хафизов. – Казань: Издательство Казанского университета, 2020. – 92 с.

77. Юнгман, В.С. База данных «Термодинамические константы веществ». (URL: <http://www.chem.msu.ru/cgi-bin/tkv.pl?show=welcome.html/welcome.html>, дата обращения 22.03.2025)

78. Куликовский М.А., Пятецкий В.Е., Чумакова Е.В., Корнеев Д.Г. Определение оптимальных технологических режимов процесса растворения золотосодержащих гранул в ходе химического аффинажа лигатуры методом построения нейронной сети. Автоматизация в промышленности. 2025. № 8. С. 41-45.

79. Куликовский М.А., Рогов С.И., Макаров В.В. Идентификация и анализ проблемных участков технологии химического аффинажа золота методом имитационного моделирования процесса, Технология металлов. 2024. №5, С.33-39.

80. Куликовский М.А., Макаров В.В. Применение имитационного моделирования для оптимизации технологии химического аффинажа золота в части растворения и осаждения золотосодержащих гранул. Сборник тезисов семнадцатой международной конференции управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2024). Москва. 2024. С. 389-393.

81. M.A. Kulikovskii, V.V. Makarov and S.I. Rogov Exploring the Problematic Aspects of Gold Refining Technology Using Simulation Analysis // Russian Metallurgy (Metally), 7 (2024) 1562–1566.

82. Куликовский М.А., Пятецкий В.Е., Чумакова Е.В., Корнеев Д.Г. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2025668611 РФ «Программа для обучения искусственных нейронных сетей для предсказания целевых параметров химических реакций царсководочного растворения золотосодержащих гранул» / // Заявитель и правообладатель НИТУ «МИСИС». – заявка № 2025667300. Заявл. 09.07.2025. Оpubл. 17.07.2025

83. Куликовский М.А., Пятецкий В.Е., Чумакова Е.В., Корнеев Д.Г. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2025669136

РФ «Программа для прогнозирования массы нерастворимого осадка в ходе царсководочного растворения золотосодержащих гранул.» / // Заявитель и правообладатель НИТУ «МИСИС». – заявка № 2025667301. Заявл. 09.07.2025. Оpubл. 17.07.2025

84. Куликовский М.А., Пятецкий В.Е., Чумакова Е.В., Корнеев Д.Г. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2025668678 РФ «Программа для прогнозирования содержания золота в нерастворимом осадке по результатам царсководочного растворения золотосодержащих гранул» / // Заявитель и правообладатель НИТУ «МИСИС». – заявка № 2025667274. Заявл. 09.07.2025. Оpubл. 23.07.2025

85. Куликовский М.А., Пятецкий В.Е., Чумакова Е.В., Корнеев Д.Г. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2025669172 РФ «Программа для прогнозирования объема извлечения золота в раствор в ходе царсководочного растворения золотосодержащих гранул» / // Заявитель и правообладатель НИТУ «МИСИС». – заявка № 2025667270. Заявл. 09.07.2025. Оpubл. 23.07.2025

86. Куликовский М.А., Радаева А.В., Сорокина В.Е., Орловский Д.А., Степанов Н.А. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2025669183 РФ «Программа для подбора технологических режимов для максимального извлечения золота в раствор в ходе царсководочного растворения золотосодержащих гранул» / // Заявитель и правообладатель НИТУ «МИСИС». – заявка № 2025668104. Заявл. 09.07.2025. Оpubл. 23.07.2025

87. Холов Х.И. Физико - химические основы технологии выщелачивания золота из хвостов флотации руд нижних горизонтов джижикрутского месторождения Таджикистана. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Д., 2019, С.65-80

88. Ковалев Н.В. Анализ и оптимизация процесса кучного выщелачивания золота в условиях сурового климата. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. И., 2018, С.135-180

89. Горенский Б.М. Автоматизация технологических процессов цветной

металлургии на основе имитационных моделей. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. К., 2004. С. 190-225.

90. Л.С. Стрижко, Ш. Бобозода, А.О. Новаковская, И.Р. Бобоев Управление процессом и прогнозирование выщелачивания сырья с применением гидроакустического излучателя // Systems. Methods. Technologies. – 2014. – №4. – С. 122–126.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для визуализации контроля выделения окислов азота и расчета количества реактива в ходе растворения золотосодержащих гранул»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2023686466

Программа для визуализации контроля выделения окислов азота и расчета количества реактива в ходе растворения золотосодержащих гранул

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС) (RU)*

Авторы: *Рогов Сергей Иванович (RU), Куликовский Михаил Андреевич (RU)*

Заявка № **2023686388**
Дата поступления **30 ноября 2023 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **06 декабря 2023 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю. С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт проведения укрупненных лабораторных испытаний

СОГЛАСОВАНО Первый заместитель Генерального директора АО «МЗСС»  В.П. Кириченко М.П.	УТВЕРЖДАЮ Проректор по науке и инновациям НИТУ МИСИС  М.В. Филонов М.П.
АКТ проведения укрупненных лабораторных испытаний технологических режимов царского растворения золотосодержащих гранул от «13» мая 2025 г.	

Настоящим актом подтверждается проведение укрупненных лабораторных испытаний технологических режимов царского растворения золотосодержащих гранул на площадке АО «Московский завод по обработке специальных сплавов». Применение разработанных режимов обеспечило извлечение золота в раствор на уровне 98,85 – 99,15% при этом выход нерастворимого осадка составил 0,17 – 0,53%, а хлорида серебра 2,28 – 3,15% от веса лигатурного золота, взятого на растворение.

Данные показатели достигнуты при растворении лигатурного золота весом 59,15 – 65,13 кг при содержании основных компонентов: Au (75,13 – 90,12%), Ag (5,21 – 15,67%), Cu (4,13 – 10,35 %) и крупности гранул, мм: длина - 10 ± 2 ; ширина - $8 \pm 2,5$; толщина - $1,2 \pm 0,7$ в условиях соблюдения режимов, определенных диссертационным исследованием Куликовского М.А.

Выводы по результатам укрупненных лабораторных испытаний: предложенные режимы царского растворения золота обеспечивают высокий процент извлечения Au в раствор, минимизацию объема нерастворимого осадка и увеличение выхода хлорида серебра.

Разработанная Куликовским М.А. ЭВМ программа с модулем нейросетевых вычислений позволяет прогнозировать процент извлечения золота в раствор (%), объем нерастворимого осадка (кг), содержание золота в нерастворимом осадке (%) и определять оптимальные режимы растворения золота.

Предлагаемый вариант подбора и мониторинга технологических режимов извлечения золота в ходе кислотного растворения гранул с применением нейросетевого моделирования имеет перспективы внедрения и использования в производстве.

Акционерное общество
«МЗСС»
Главный технолог

 В.А. Белов

НИТУ МИСИС
Научный руководитель
к.т.н., доцент кафедры цветных
металлов и золота

 С.Н. Рогов

Соискатель
 М.А. Куликовский

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для обучения искусственных нейронных сетей для предсказания целевых параметров химических реакций царсководочного растворения золотосодержащих гранул»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2025668611

Программа для обучения искусственных нейронных сетей для предсказания целевых параметров химических реакций царсководочного растворения золотосодержащих гранул

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (RU)*

Авторы: *Пятецкий Валерий Ефимович (RU), Куликовский Михаил Андреевич (RU), Чумакова Екатерина Витальевна (RU), Корнеев Дмитрий Геннадьевич (RU)*

Заявка № **2025667300**
Дата поступления **09 июля 2025 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **17 июля 2025 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности
Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для прогнозирования массы нерастворимого осадка в ходе царскородочного растворения золотосодержащих гранул»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2025669136

Программа для прогнозирования массы нерастворимого осадка в ходе царскородочного растворения золотосодержащих гранул

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (RU)*

Авторы: *Пятецкий Валерий Ефимович (RU), Куликовский Михаил Андреевич (RU), Чумакова Екатерина Витальевна (RU), Корнеев Дмитрий Геннадьевич (RU)*

Заявка № 2025667274
Дата поступления 09 июля 2025 г.
Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 23 июля 2025 г.



Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности
Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для прогнозирования содержания золота в нерастворимом осадке по результатам царсководочного растворения золотосодержащих гранул»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2025668678

Программа для прогнозирования содержания золота в нерастворимом осадке по результатам царсководочного растворения золотосодержащих гранул

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (RU)*

Авторы: *Пятецкий Валерий Ефимович (RU), Куликовский Михаил Андреевич (RU), Чумакова Екатерина Витальевна (RU), Корнеев Дмитрий Геннадьевич (RU)*

Заявка № **2025667301**
Дата поступления **09 июля 2025 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **17 июля 2025 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для прогнозирования объема извлечения золота в раствор в ходе царсководочного растворения золотосодержащих гранул»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2025669172

**Программа для прогнозирования объема извлечения
золота в раствор в ходе царсководочного растворения
золотосодержащих гранул**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС» (RU)*

Авторы: *Пятецкий Валерий Ефимович (RU), Куликовский
Михаил Андреевич (RU), Чумакова Екатерина Витальевна
(RU), Корнеев Дмитрий Геннадьевич (RU)*

Заявка № **2025667270**
Дата поступления **09 июля 2025 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **23 июля 2025 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для подбора технологических режимов для максимального извлечения золота в раствор в ходе царсководочного растворения золотосодержащих гранул»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2025669183

Программа для подбора технологических режимов для максимального извлечения золота в раствор в ходе царсководочного растворения золотосодержащих гранул

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (RU)*

Авторы: *Куликовский Михаил Андреевич (RU), Радаева Анастасия Вячеславовна (RU), Сорокина Валентина Евгеньевна (RU), Орловский Даниил Александрович (RU), Степанов Никита Алексеевич (RU)*

Заявка № **2025668104**
Дата поступления **09 июля 2025 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **23 июля 2025 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Zubov