

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

Куликовский Михаил Андреевич

Модели и алгоритмы автоматизированного управления процессом кислотного  
растворения золотосодержащих гранул

Специальность 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и  
производствами

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

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

Москва - 2025

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **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 влияние 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». Трудami 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 -  $10 \pm 2$ ; 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, входящем 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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** диссертационной работы обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и задачи работы, обозначены научная новизна и практическая значимость, изложены положения, выносимые на защиту.

**В главе 1** по результатам проведения аналитического обзора литературы и патентной документации современного состояния аффинажного производства, в частности способов растворения золотосодержащего сырья сделан вывод, что среди рассмотренных методов: царскowodочное, гидрохлорирование, нитрит-процесс, кислотно-кислородный процесс по извлечению золота в раствор более эффективным методом является царскowodочное, т.е. кислотное выщелачивание.

При существующей организации технологические режимы процесса определяются исходя из стехиометрических вычислений, не учитывающих особенностей исходного сырья, а также 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.

Таким образом, технология кислотного растворения требует дополнительных исследований, направленных на определение оптимальных технологических режимов, 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.

Для оценки оптимальности условий требуется моделирование процесса. Модель позволяет прогнозировать поведение объекта при изменении входных и управляющих параметров.

Анализ методов моделирования химико-технологических процессов, таких как физическое, математическое, имитационное и нейросетевое показал, что последний является перспективным подходом в части описания сложных нелинейных зависимостей и аппроксимации процессов без необходимости явного задания уравнений. 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.

С целью повышения производительности и безопасности технологии выщелачивания, стабилизации качества выходного продукта и снижения себестоимости

производства необходима интеграция нейросетевой модели объекта исследования в контуры управления процессом.

Проведенный анализ существующих подходов к управлению химико-технологическими процессами в металлургии показал, что автоматизированный подход, основанный на искусственном интеллекте, демонстрирует стремительный рост. Его доля увеличилась с 15% до 40% за последнее десятилетие, что подтверждает глобальную тенденцию минимизации влияния человеческого фактора на производственные процессы.

В ходе анализа реактивной и проактивной схемы управления ХТП установлено, что 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.

В главе 2 описывается процедура оценки средней продолжительности технологических операций химического аффинажа золота на производстве с использованием имитационной модели. По результатам экспериментальных запусков установлено, что 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.

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 низких показателей эффективности, 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.

На основании проведенных исследований кинетики процесса кислотного растворения рассчитана энергия активации процесса, которая составила 8,31 кДж для 30-40°C и 27,13 кДж для 60-80°C и скорости выщелачивания золота при разной температуре процесса. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Скорость выщелачивания золота при разной температуре процесса

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

Рассчитанные кинетические параметры использованы для построения прогнозной модели, определяющей технологические режимы и целевые результаты процесса в программном комплексе «ReactOp», используемого для оценки динамических характеристик сложных химических реакций, основываясь на кинетических зависимостях технологии выщелачивания.

Запуск построенной модели осуществлялся на примере 5 реакций, исходные данные и режимы которых определены в таблице 2 при условиях соблюдения следующих режимов: Т:Ж = 1:5, Т = 80°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 2 – Исходные данные для запуска модели

<b>№ реакции</b>	<b>Состав гранул, %</b>			<b>Размер гранул, мм</b>			<b>Масса гранул, кг</b>
	<b>Золото</b>	<b>Серебро</b>	<b>Медь</b>	<b>Длина</b>	<b>Ширина</b>	<b>Толщина</b>	
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 моделью извлечения золота в раствор, массы нерастворимого осадка и содержания в нем Au приведен в таблице 3.

Таблица 3 – Прогнозные значения целевых параметров модели, разработанной на основании кинетических параметров

№ 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 1 представлено сравнение фактических и прогнозных значений, определенных моделью.

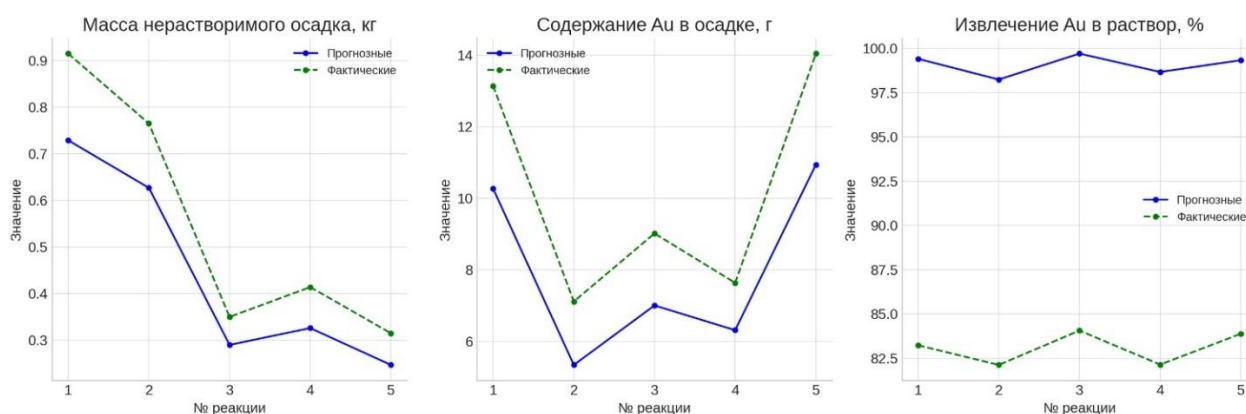


Рисунок 1 - Сопоставление результатов прогноза модели и фактических данных

Из рисунка 1 видно, что точность прогноза модели, разработанной на основании кинетических параметров, 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 модели в автоматизированной системе управления данной технологией. Низкую точность прогнозной модели можно объяснить большим количеством факторов, влияющих на процесс, наличием скрытых зависимостей между параметрами и недостаточным объемом химических реакций, используемых при описании процесса.

**Глава 3** посвящена разработке прогнозной модели, представленной в виде ансамбля нейросетей, прогнозирующей целевые параметры процесса, а также определяющей оптимальные режимы растворения золотосодержащих гранул.

Схема обработки данных в прогнозной модели представлена на рисунке 2.

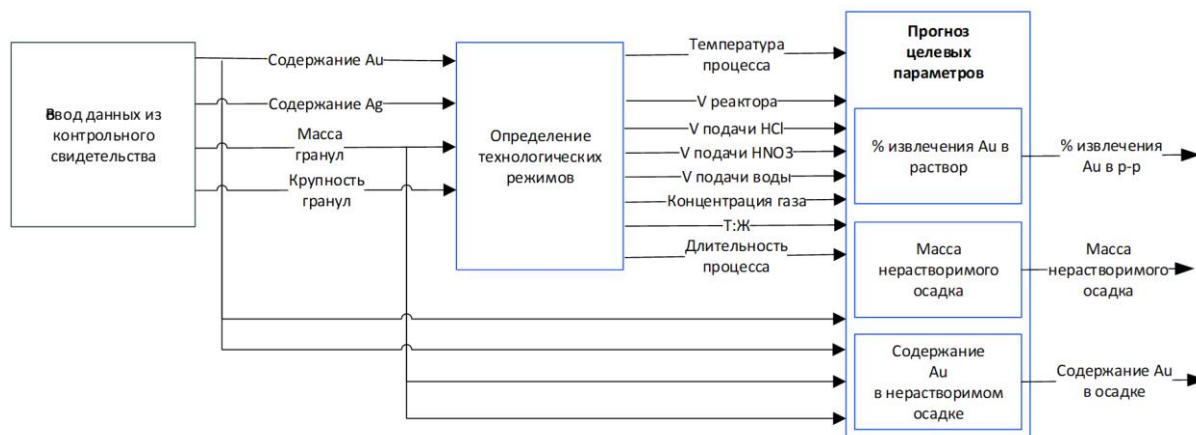


Рисунок 2 – Схема обработки данных в прогнозной модели

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.

Для определения значимых факторов, влияющих на результат растворения, проведен анализ корреляции, по результатам которого установлена высокая зависимость между параметрами: «масса гранул (кг)» и «объем азотной кислоты (л)». 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. Количественное определение коэффициента корреляции Кендалла, а также его графическая визуализация с использованием тепловой карты представлена на рисунке 3.

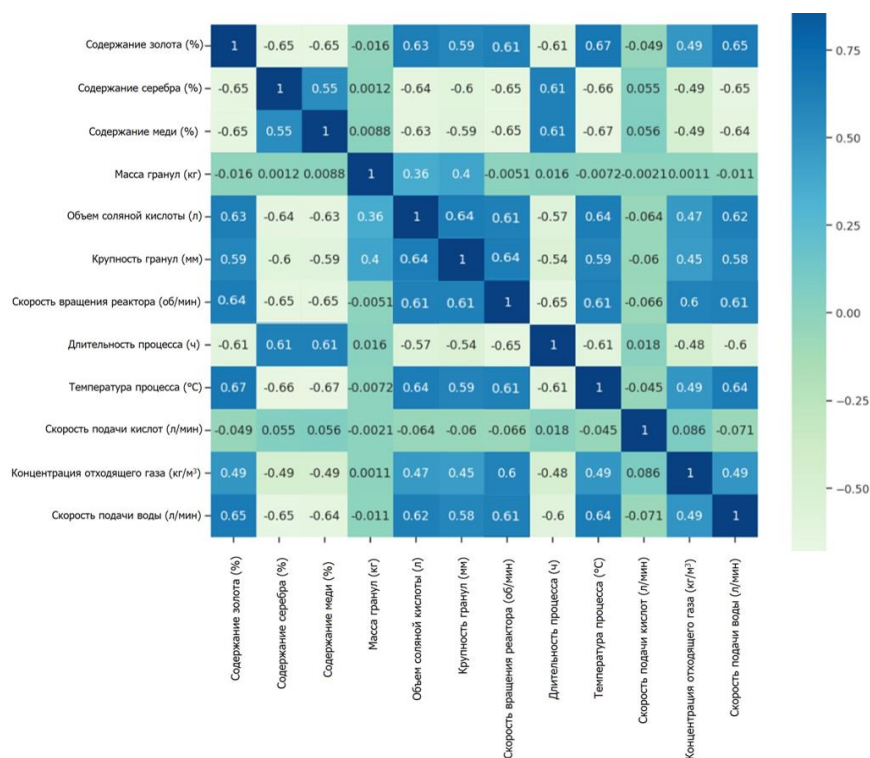


Рисунок 3 - Тепловая карта для коэффициента ранговой корреляции Кендалла

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

Для оценки выхода в ансамбле использовались ИНС, предсказывающие массу нерастворимого осадка (кг) и содержание (%) Au в нерастворимом осадке. Исследовались два варианта реализации, 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. Алгоритмы функционирования моделей при решении задачи поддержки принятия решений на основе прогнозных значений параметров представлены на рисунках 4 и 5.

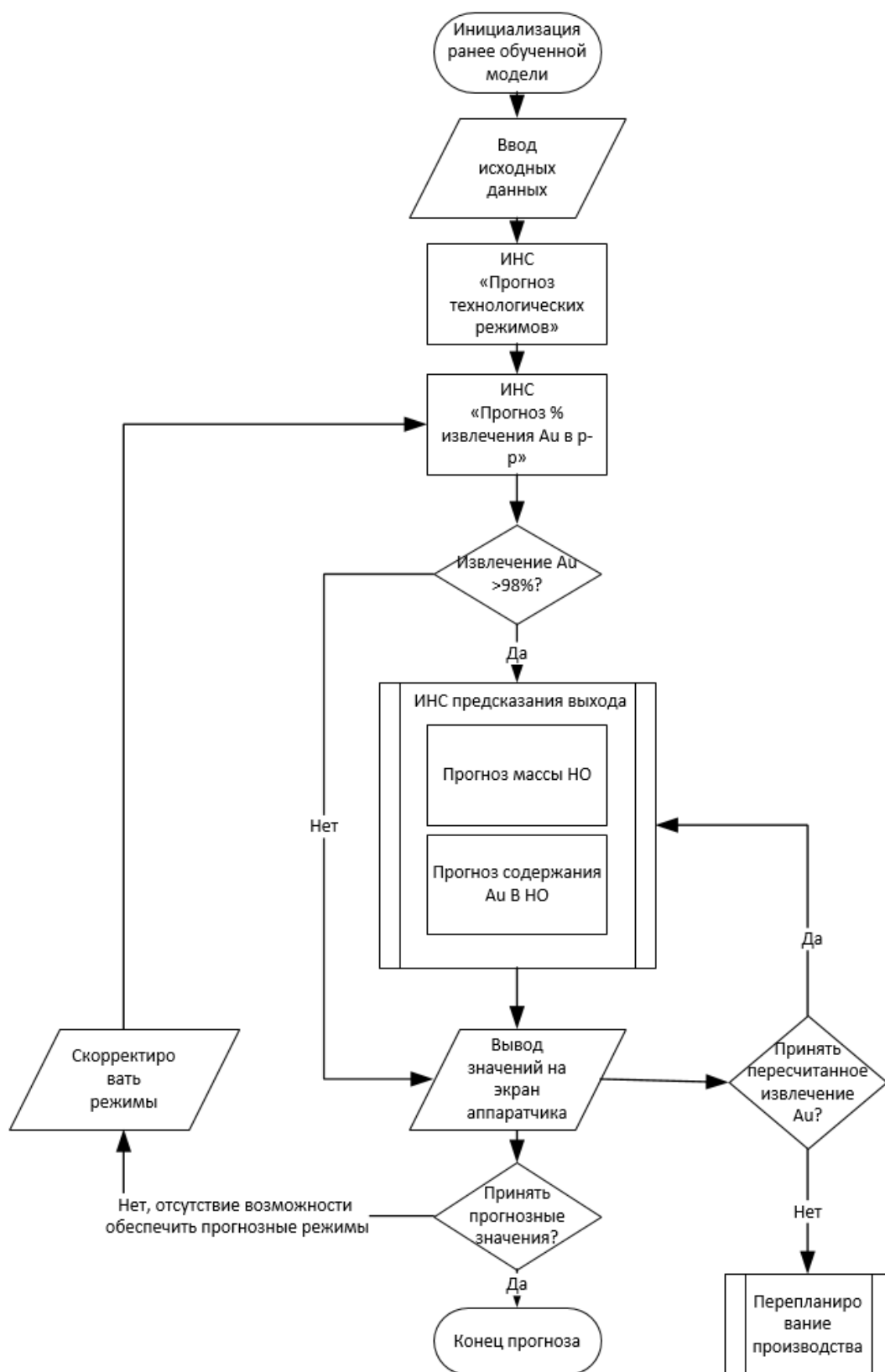


Рисунок 4 – Алгоритм поддержки принятия решения с ИНС, прогнозирующей оба выходных параметра

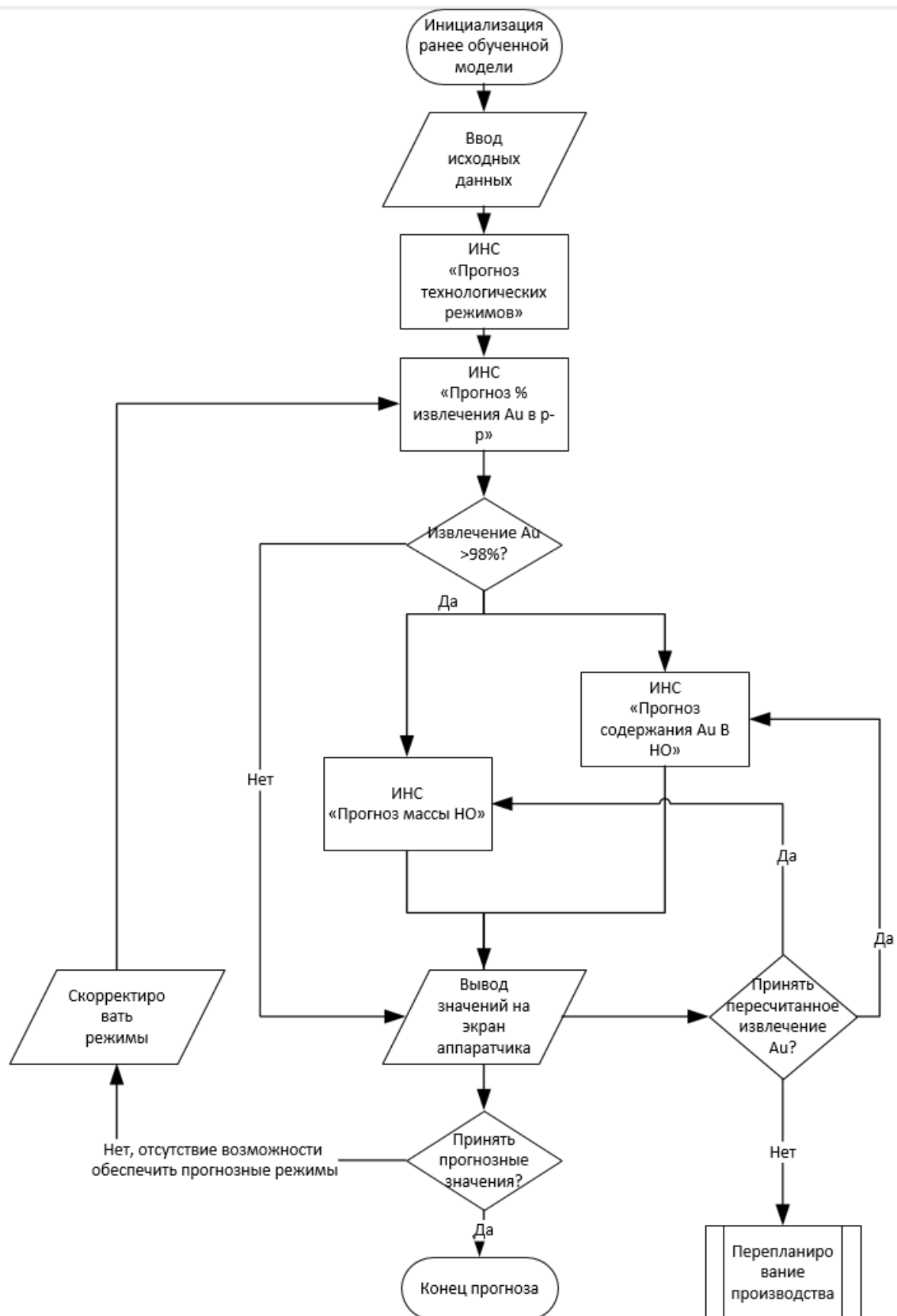


Рисунок 5 - Алгоритм поддержки принятия решения с двумя ИНС для прогнозирования каждого выходного параметра по отдельности

Подробное описание представленных на рисунках 4 и 5 алгоритмов поддержки принятия решения приведено в формате сценария вариантов использования в таблице 4.

Таблица 4 – 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	<ul style="list-style-type: none"> <li>– сотрудник имеет доступ к системе;</li> <li>– сотрудник имеет контрольное свидетельство с описанием исходных данных.</li> </ul>
Выходные условия	<ul style="list-style-type: none"> <li>– режимы, спрогнозированные ИНС, приняты;</li> <li>– режимы, спрогнозированные ИНС, приняты с учетом корректировки сотрудника;</li> <li>– режимы, спрогнозированные ИНС, не приняты из-за отсутствия возможности производственного обеспечения.</li> </ul>
Нормальное направление	<p>1. Режимы, спрогнозированные ИНС, приняты.</p> <p>1.2 Сотрудник осуществляет ввод исходных данных на основании контрольного свидетельства.</p> <p>1.3 ИНС определяет технологические режимы</p> <p>1.4 ИНС прогнозирует % извлечения золота в раствор.</p> <p>1.5 ИНС прогнозирует массу нерастворимого осадка и содержание в нем золота.</p> <p>1.6 Сотрудник подтверждает прогнозные значения на экране.</p>
Альтернативное направление №1	<p>2. Режимы, спрогнозированные ИНС, приняты с учетом корректировки сотрудника.</p> <p>2.1 Сотрудник осуществляет ввод исходных данных на основании контрольного свидетельства.</p> <p>2.2 ИНС прогнозирует технологические режимы.</p> <p>2.3 ИНС прогнозирует % извлечения золота в раствор.</p>

	<p>2.4 ИНС прогнозирует массу нерастворимого осадка и содержание в нем золота.</p> <p>2.5 Сотрудник корректирует технологические режимы, предложенные ИНС.</p> <p>2.6 ИНС прогнозирует % извлечения золота в раствор.</p> <p>2.7 Если объем извлечения удовлетворяет требованиям производства сотрудник подтверждает прогнозные значения на экране.</p>
Альтернативное направление №2	<p>3. Режимы, спрогнозированные ИНС, не приняты из-за отсутствия возможности производственного обеспечения</p> <p>3.1 Сотрудник осуществляет ввод исходных данных на основании контрольного свидетельства.</p> <p>3.2 ИНС прогнозирует технологические режимы.</p> <p>3.3 ИНС прогнозирует % извлечения золота в раствор.</p> <p>3.4 ИНС прогнозирует массу нерастворимого осадка и содержание в нем золота.</p> <p>3.5 Сотрудник корректирует технологические режимы, предложенные ИНС.</p> <p>3.6 ИНС прогнозирует % извлечения золота в раствор.</p> <p>3.7 Если объем извлечения не удовлетворяет требованиям производства сотрудник запускает процесс корректировки производственного плана.</p>
Исключения	<p>1. В нормальном направлении: если прогнозное извлечение золота менее 98% дальнейшие вычисления ИНС в части прогноза выходных параметров реакции не осуществляются.</p> <p>2. В альтернативных направлениях №1,2: если прогнозное значение извлечения золота в раствор менее 98%, сотруднику необходимо подтвердить</p>



	<p>результат на экране для запуска ИНС прогноза объема нерастворимого осадка и содержания в нем золота.</p> <p>3. Ручной режим подбора оптимальных режимов необходим в случае возникновения внештатной ситуации на производстве.</p>
--	--

Анализ обобщающей способности предсказания приведенных алгоритмов показал, что оптимальным решением является фреймворк, в рамках которого ИНС прогнозируют выход реакции для каждого параметра в отдельности. 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%.

Из результатов проведенных циклов обучения (таблица 5) 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.

Таблица 5 - Точность обучения ИНС с разными архитектурами

Выходные параметры		Точность обучения ИНС											
		% 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	96,6 5	92,22	92,5 4	0,04	98,1 4	93,0	94,0 3	0,04	94,1	93,13	91,5 4	0,03
	12 - 20 -3	98,3 3	93,74	92,5 4	0,04	98,4	93,48	94,4	0,04	92,1 8	92,14	92,5 4	0,03
	12 - 24 -3	98,3 5	94,37	93,6 6	0,03	98,4 6	94,33	95,9	0,04 3	93,1 5	94,8	94,6 6	0,031
2 скрытых слоя	12 - 12 - 12 -3	95,8 6	91,78	92,9 1	0,04	98,7	94,07	96,6 4	0,03 2	93,1 7	95,75	94,9 1	0,032
	12 - 12	98,2 3	93,48	92,1 6	0,036	98,7 4	95,7	94,4	0,03 3	92,1 7	93,2	93,2 6	0,032

	-8- 3												
	12 - 12 -6- 3	98,8 8	94,59	94,0 3	0,033	99,2 1	95,7	94,5	0,03 8	94,8	94,15	95,0 1	0,021
	12 - 16 -8- 3	99,1 2	95,85	95,8 1	0,021	99,4 5	96,9	97,8	0,01 9	97,1	96,9	97,1 2	0,015

Приведенные результаты циклов обучения (таблица 5) получены при обучении в течение 50 эпох для ИНС экспертной оценки и 200 эпох для ИНС прогнозирования массы нерастворимого осадка и содержание в нем золота. Увеличение числа эпох обучения не приводило к повышению точности сети. Приведенные показатели точности обучения были получены при размере пакета примеров  $batch\_size = 32$ , после которых обновляются весовые коэффициенты.

Из графиков на рисунках 6-8 видно, что данные 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 наблюдалось.

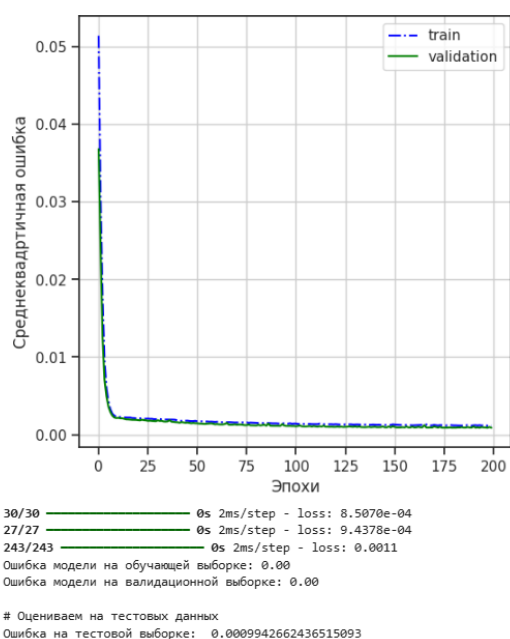


Рисунок 6 – Кривые обучения ИНС для предсказания массы нерастворимого осадка с архитектурой 12-16-8-1

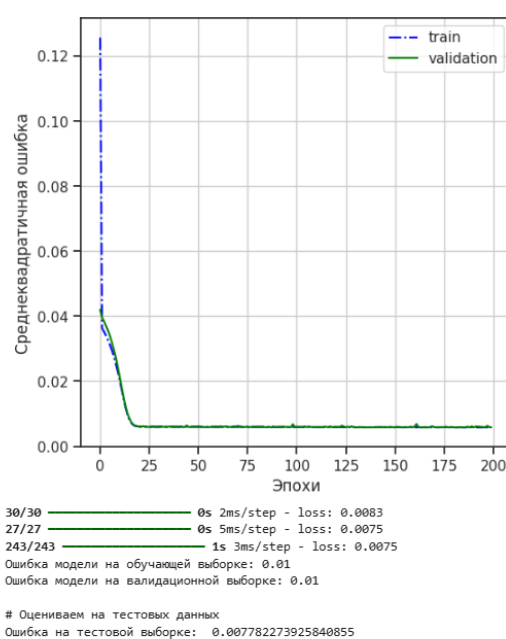


Рисунок 7 – Кривые обучения ИНС для предсказания % содержания Au в осадке с архитектурой 12-16-8-1

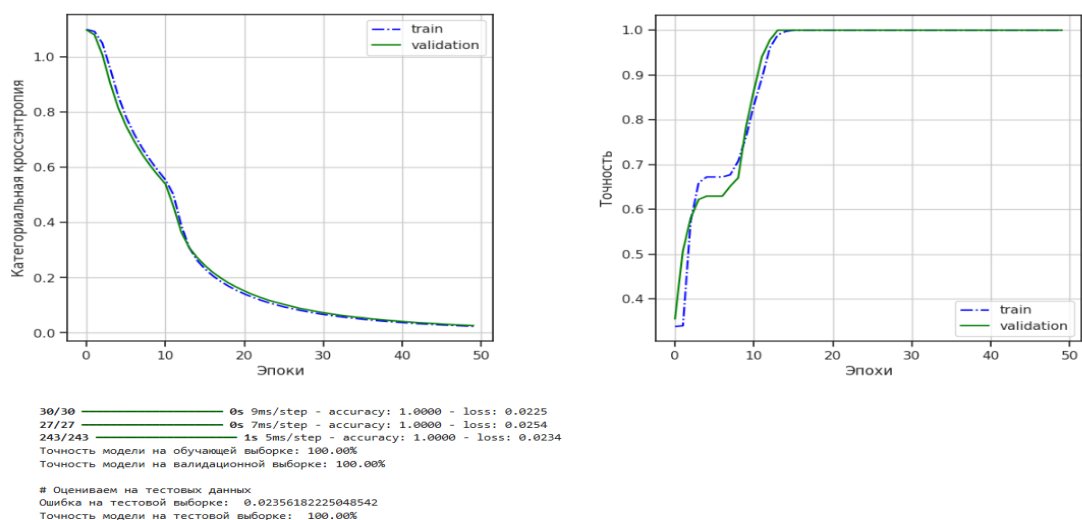


Рисунок 8 - Кривые обучения ИНС для экспертной оценки качества реакции с архитектурой 12-16-8-3

Точность в 95,12% обучения нейронной сети, определяющей технологические режимы процесса, архитектура которой представлена на рисунке 9, получена при использовании оптимизатора Adam и функции активации скрытого слоя relu. Обучение на тестовой выборке проводилось в течение 200 эпох.

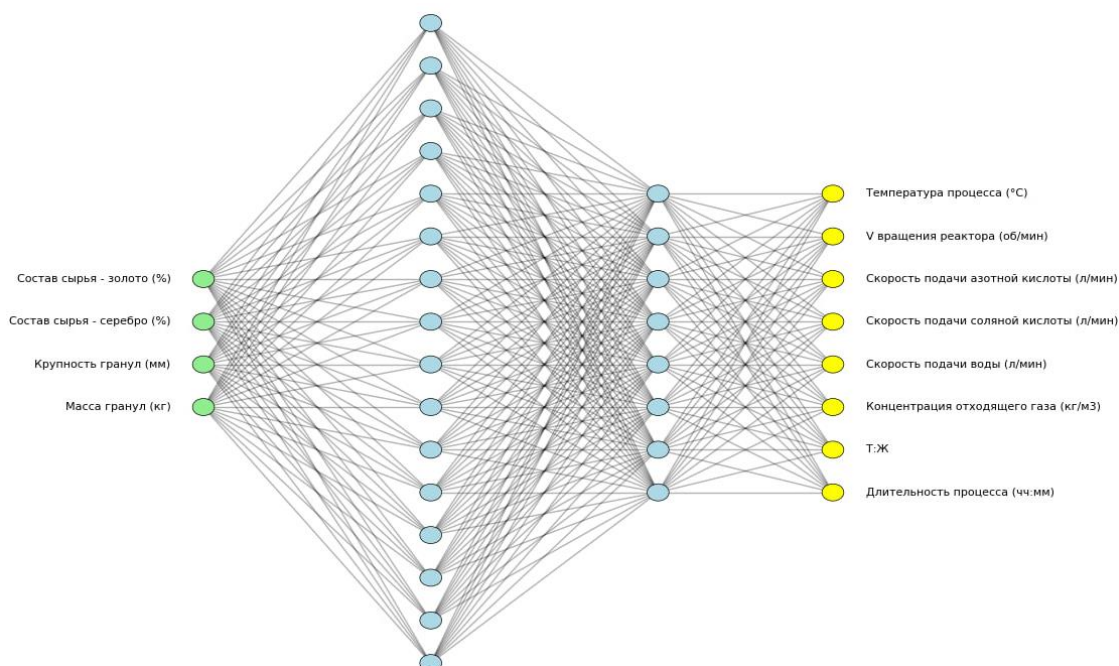


Рисунок 9 – Архитектура ИНС для определения режимов процесса с архитектурой 4-16-8-8

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, степени извлечения золота в раствор и определения технологических режимов лучшие результаты были получены при нормализации всего

набора данных.

**В главе 4** приведено решение многокритериальной задачи методами МАИ и ELECTRE выбора архитектуры программного обеспечения для контроля оптимальных режимов, определенных прогнозной моделью на базе ансамбля нейросетей, позволяющего осуществлять мониторинг изменений динамических характеристик процесса и, при отклонении от нормативных показателей, оперативно уведомлять аппаратчика о необходимости выполнения корректировок. По итогу решения задачи оптимальной альтернативой стала микросервисная архитектура.

Структура разрабатываемой автоматизированной системы-советчик 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.

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 отклонении от нормативных показателей, оперативно уведомлять аппаратчика о необходимости добавления реагента с расчетом требуемого объема.

Согласно предлагаемой схеме автоматизации реактора кислотного растворения, выполненной развернутым способом на рисунке 10, 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: вентилей трубопроводов подачи горячего пара, кислот и воды. Управление вращением реактора осуществляется аналогично вручную посредством переключателя на щите.

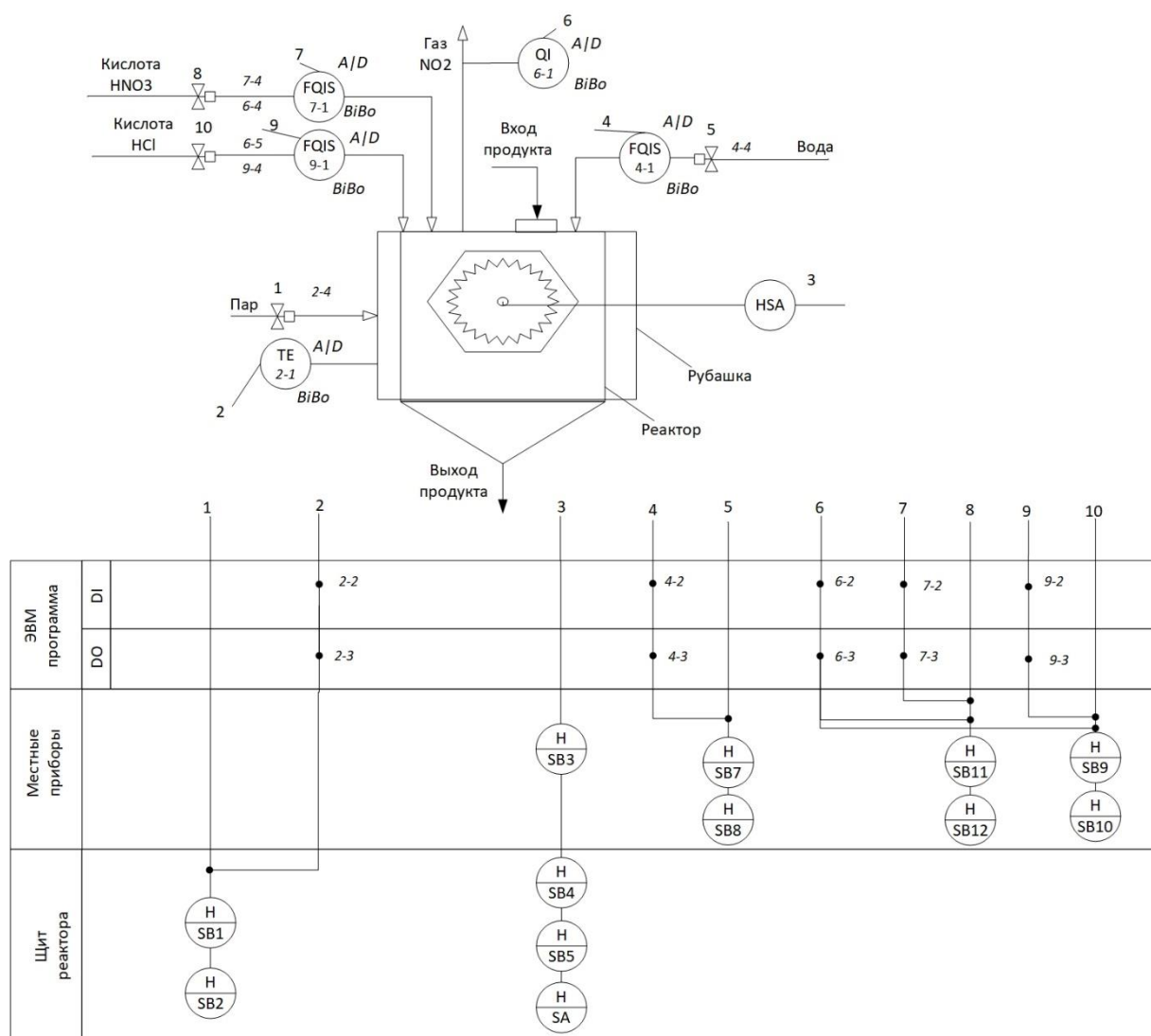


Рисунок 10 – Схема автоматизации реактора кислотного растворения

В главе 5 описаны результаты опытно-промышленных испытаний, а также приведены расчеты оценки экономических эффектов от применения автоматизированной системы-советчика оператора на производстве.

По результатам испытаний точность работы системы-советчик составила (рисунок 11):

- 97,2% в части расчета массы нерастворимого осадка;
- 97,3 в части расчета содержания золота в нерастворимом осадке;
- 99,75% в части расчета извлечения золота в раствор.

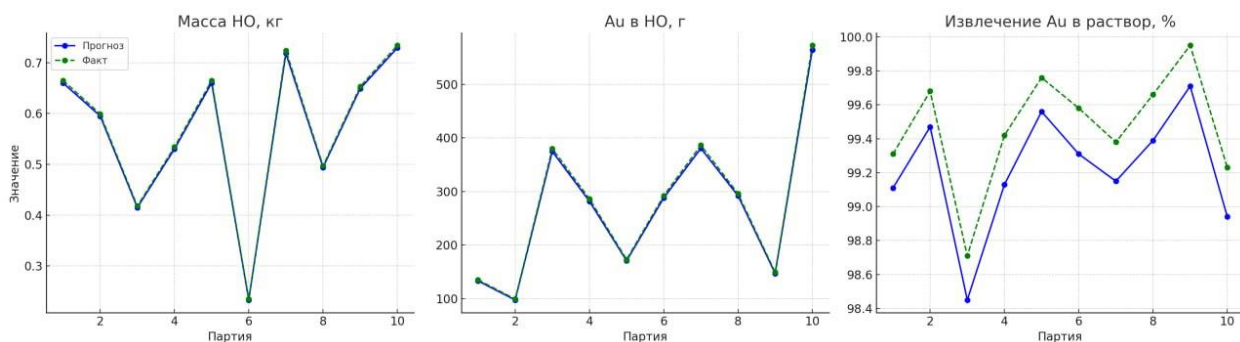


Рисунок 11 - Результаты сопоставления прогнозных и фактических данных, полученных в ходе опытно-промышленных испытаний

Применение автоматизированного управления посредством системы-советчика 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. Содержание золота в нерастворимом осадке зафиксировано на уровне 0,05 – 1,29 %. Размер фракций хлорида серебра составил 600 – 700 мкм.

В ходе оценки экономической эффективности предлагаемой технологии установлено, что итоговая экономия на одну операцию растворения составила 3 401,4 рублей, в рамках года экономия возрастает до 1 496 615,73 рублей (рисунок 12).

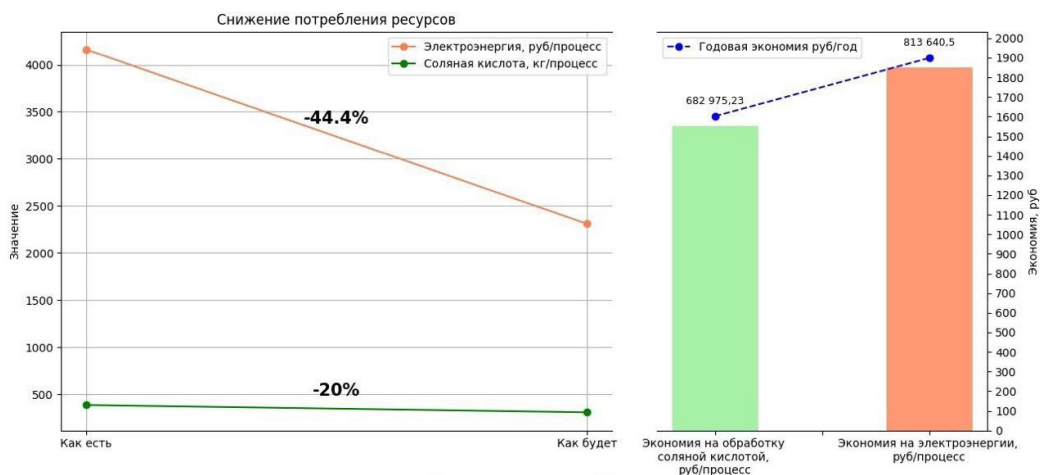


Рисунок 12 - Расчет экономического эффекта в разрезах процесса и года

Стоимость услуг по аффинажу золота с учетом НДС для лигатурного золота с массовой долей Au до 30% сократилась с 635 343,19 до 631 941,79 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 объем 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%.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Диссертационная работа посвящена решению важной научно-технической задачи повышения степени извлечения золота в раствор в ходе кислотного растворения золотосодержащего сырья. В ходе решения данной задачи автором лично были получены следующие основные результаты:

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.
3. Проведено исследование кинетики царского водочного выщелачивания золота, в ходе которого рассчитаны основные параметры, используемые для построения прогнозной модели процесса, и определен набор параметров, оказывающих значимое 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) и скорости подачи реагентов (л/мин).
5. 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.
6. В результате опытно-промышленных испытаний кислотного выщелачивания золота без использования и с использованием автоматизированной системы-советчик доказана целесообразность применения последнего.
7. Произведён расчёт экономической эффективности показывающий, что внедрение разработанной автоматизированной системы-советчик оператора на основе ансамбля нейросетевого прогнозирования приведёт к годовой экономии в размере 1 496 615,73 рублей.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. 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).
2. М.А. Kulikovskii, E.V. Gotsulyak, K.M. Kugachev and S.I. Rogov Artificial Neural Network Evaluation of the Significance of Influence of Technological Parameters on the Chemical Refining of Gold // Russian Metallurgy (Metally), 5 (2025) 1122–1127.
3. 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
4. М.А. Куликовский Интеллектуализация технологии химического аффинажа золота // Сборник тезисов докладов 50-ой Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения». 2024. с. 544-545
5. 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.
6. 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
7. 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.
8. 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.
9. М.А. 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.



10. 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 царскородочного растворения золотосодержащих гранул» / // Заявитель и правообладатель НИТУ «МИСИС». – заявка № 2025667300. Заявл. 09.07.2025. Оpubл. 17.07.2025

11. 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 царскородочного растворения золотосодержащих гранул.» / // Заявитель и правообладатель НИТУ «МИСИС». – заявка № 2025667301. Заявл. 09.07.2025. Оpubл. 17.07.2025

12. 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 царскородочного растворения золотосодержащих гранул» / // Заявитель и правообладатель НИТУ «МИСИС». – заявка № 2025667274. Заявл. 09.07.2025. Оpubл. 23.07.2025

13. 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 царскородочного растворения золотосодержащих гранул» / // Заявитель и правообладатель НИТУ «МИСИС». – заявка № 2025667270. Заявл. 09.07.2025. Оpubл. 23.07.2025

14. 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 царскородочного растворения золотосодержащих гранул» / // Заявитель и правообладатель НИТУ «МИСИС». – заявка № 2025668104. Заявл. 09.07.2025. Оpubл. 23.07.2025