

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
Ордена Трудового Красного Знамени
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Московский технический
университет связи и информатики»



Ю.Л. Леохин

2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» на диссертационную работу Куликовского Михаила Андреевича «Модели и алгоритмы автоматизированного управления процессом кислотного растворения золотосодержащих гранул», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами».

Актуальность темы диссертации

Аффинаж является важным процессом в цветной металлургической промышленности. Он позволяет очистить драгоценные металлы от примесей, которые могут присутствовать в исходном сырье. Химический аффинаж драгоценных металлов обладает рядом преимуществ по сравнению с электролитическими методами, что делает его актуальным в настоящее время. Применение кислот в растворении золотосодержащего сырья делают технологию аффинажа не только менее затратной, но и более эффективной. Однако низкая адаптивность процесса подменяющиеся условия входных параметров приводит к недостаточному извлечению золота, росту объема нерастворимого металла и брака готовой продукции.

Интеграция современных достижений в области информационных технологий в контуры управления исследуемого процесса даст возможность не только улучшить качество раствора, но и уменьшить продолжительность производственного цикла, а также сократить количество запусков повторного выщелачивания.

Автоматизация управления технологией растворения, основанная на моделях искусственного интеллекта, позволит прогнозировать ключевые показатели целевых параметров и заблаговременно выявлять отклонения в режимах работы процесса, что формирует надёжную основу для проактивного управления производством.

В связи с вышесказанным тема диссертации является актуальной. Исследование направлено на решение важной задачи по повышению устойчивости работы процесса, снижению влияния человеческого фактора на результат и увеличению производительности труда за счет применения средств интеллектуализации автоматизированного управления технологией.

Анализ содержания диссертационной работы

Диссертационная работа содержит 169 страниц машинописного текста и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 90 источников и 7 приложений. Текст диссертации иллюстрируется 58 рисунками и содержит 54 таблицы.

Во введении обоснована актуальность, сформулирована научная новизна, практическая ценность работы, дана ее общая характеристика.

В первой главе работы описывается необходимость совершенствования существующих и разработка новых подходов к управлению химико-технологическими процессами в цветной металлургии:

- в разделе 1.1 приводится обзор преимуществ и недостатков широко распространенных способов аффинажного производства;
- в разделе 1.2 анализируются методы растворения золотосодержащего сырья, такие как царскowodочное, гидрохлорирование, нитрит-процесс, кислотно-кислородный процесс на предмет преимущественного извлечения золота в раствор.
- в разделе 1.3 автор приводит обзор методов моделирование химико-технологических процессов, среди которых физическое, математическое, имитационное и нейросетевое. Особое внимание уделяется последнему в части описания сложных нелинейных зависимостей и аппроксимации процессов без необходимости явного задания уравнений.
- в разделе 1.4 приводится анализ существующих подходов к управлению химико-технологическими процессами в металлургии, согласно которому автоматизация, основанная на искусственном интеллекте, демонстрирует стремительный рост за последнее десятилетие и подтверждает глобальную тенденцию минимизации влияния человеческого фактора на производственные процессы.

Во второй главе разработана прогнозная модель на базе кинетических зависимостей, полученных экспериментальным путем:

- в разделе 2.1 выполняется процедура оценки средней продолжительности технологических операций химического аффинажа золота с использованием имитационной модели.
- в разделе 2.2 приводится общий анализ текущего состояния операции по растворению золотосодержащих гранул на производстве.
- в разделе 2.3 описываются кинетические зависимости результатов процесса от внешних и внутренних факторов;
- в разделе 2.4 выполняется построение прогнозной модели на базе кинетических параметров.

В третьей главе приводится описание разработки прогнозной модели процесса, представленной в виде ансамбля нейросетевых моделей:

- в разделе 3.1 выполняется постановка задачи нейросетевого моделирования;
- в разделе 3.2 приводится анализ выборки данных, используемых для обучения нейросетевых моделей;
- в разделе 3.3 исследуется вопрос о построении оптимальной архитектуры многослойного персептрона;
- в разделе 3.4 приводятся результаты обучения разработанных нейросетевых моделей.

Четвертая глава описывает разработку программы для поддержки принятия решений при управлении технологическими режимами растворения:

- в разделе 4.1 выполняется решение задачи многокритериального выбора архитектуры программного решения
- в разделе 4.2 выполняется проектирование программы в соответствии с микросервисным подходом;
- в разделе 4.3 приводится описание экранов программного решения;
- в разделе 4.4 представлена схема автоматизации реактора кислотного растворения золотосодержащих гранул.

В пятой главе приводятся результаты опытно-промышленных испытаний системы-советчик, а также расчет технико-экономического эффекта от внедрения предложенного решения:

- в разделе 5.1 описываются результаты укрупненных лабораторных испытаний системы автоматизированного управления;
- в разделе 5.2 выполняется имитация технологических процессов с учетом применения цифрового советчика;
- в разделе 5.3 выполняется оценка экономической эффективности от внедрения предложенного решения.

В заключении результаты выполнения поставленных научных задач, содержащихся в диссертации, совокупность которых позволили автору достичь поставленных целей исследования.

Научная новизна работы

Научная новизна работы заключается в построении оригинальной модели прогнозирования целевых параметров процесса, функционирующей на базе ансамбля нейронных сетей. Модель подбирает технологические режимы растворения, обеспечивающие преимущественное извлечение золота в раствор. Определение режимов осуществляется за счет входных данных процесса: масса, химический состав и крупность гранул, поступивших на растворение. Модель отличается оперативной адаптацией режимов к изменяющимся условиям технологии.

Разработана архитектура и предложен алгоритм функционирования системы-советчик, предусматривающий индивидуальное регулирование технологических режимов процесса в реальном времени, а именно: Т:Ж, температуру, скорость вращения, длительность растворения, скорость подачи реагентов и концентрацию газа на базе нейросетевого прогнозирования целевых показателей растворения.

Практическая значимость работы

Разработанные в ходе выполнения диссертационной работы модели и алгоритмы автоматизированного управления процессом растворения золотосодержащих гранул успешно апробированы на предприятии АО «Московский завод по обработке специальных сплавов» о чем свидетельствует акт проведения укрупненных лабораторных испытаний. Точность работы системы-советчик фиксируется на уровне 98-99%. Среди достигнутых эффектов отмечается рост извлечения золота в раствор, сокращение брака золотого порошка на этапе осаждения за

счет сниженного содержания серебра в растворе, снижение общей продолжительности процесса в среднем до 5 часов.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертационной работе

Алгоритм автоматизированного управления процессом растворения золотосодержащего сырья, предложенный автором, может быть использован на предприятиях аффинажного комплекса, где исходное сырье представлено в виде гранул.

Полученные в процессе работы данные и сформулированные выводы могут быть использованы в учебном процессе высших учебных заведений по дисциплине «Технологии анализа данных и машинное обучение».

Результаты, полученные автором, имеют большое значение для науки в области автоматизации управления технологическими процессами и могут служить основой для дальнейших исследований в отрасли аффинажного производства сотрудниками научно-исследовательских институтов автоматизации и управления в промышленной сфере.

Достоверность работы

Достоверность научных положений, выводов и практических результатов подтверждается разработкой и тестированием программных модулей системы, о чем свидетельствует акт проведения укрупненных лабораторных испытаний и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Теоретические исследования проводились с применением методов теории принятия решений, экспериментальные – с применением методов математического и компьютерного моделирования. Обработка результатов осуществлялась с применением методов математического анализа.

Соответствие работы критериям, предъявляемым к диссертациям

Тема и содержание диссертации Куликовского М.А. соответствует паспорту специальности 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами». Полученные результаты, положения и выводы отвечают требованиям паспорта в частности следующих пунктов: п.6. «Научные основы и методы построения интеллектуальных систем управления технологическими процессами и производствами»; п.12. «Методы создания специального математического и программного обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистем АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включая управление исполнительными механизмами в реальном времени».

Диссертация написана четким и ясным языком, в логической последовательности, что свидетельствует об умении автора грамотно выражать свои мысли. Работа обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты. Разработанные автором алгоритмы автоматизированного управления технологией на базе нейросетевого подхода к прогнозированию целевых показателей процесса позволяют повысить извлечение благородного металла из исходного материала и обеспечивают эффективность функционирования системы управления технологическим процессом.

Замечания по работе:

1. Согласно схеме обработки данных в модели, представленной на рисунке 32, извлечение золота в раствор прогнозируется наряду с остальными параметрами. Непонятно с какой целью прогноз данного параметра выносится в отдельную программу в алгоритмах на рисунках 33, 34.
2. Результаты в таблице 33 целесообразно дополнить данными по оптимизатору и функции активации скрытого слоя, которые использовались в процессе обучения модели.
3. В разделе 3.1 приводится описание dataset, а также его разбиение на выборки. Требуется уточнение: какие методы обработки данных были использованы для подготовки к обучению нейросети, кроме анализа выбросов, описанном в разделе 3.2?
4. Предложенное автором решение можно интерпретировать как промежуточный вариант решения поставленной в диссертации проблемы. Влияние человеческого фактора хоть и сократилось, но по-прежнему играет определяющую роль. Возможно ли автоматическое управление данным процессом без привлечения человека?
5. Непонятно каким образом будет осуществляться адаптация функционирования системы-советчик в случае, если подобранные прогнозной моделью технологические режимы, не дадут желаемого результата.

Заключение

Выявленные недостатки и сделанные замечания не умаляют достоинств представленной работы. Диссертация Куликовского Михаила Андреевича на тему «Модели и алгоритмы автоматизированного управления процессом кислотного растворения золотосодержащих гранул» является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором на высоком научном уровне. Работа соответствует специальности 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами». Задача актуальна, решение обладает научной новизной, представленные научные результаты получены на основе глубокого анализа по исследуемой тематике и являются достоверными, выводы по каждому разделу диссертации четкие, тесно связаны с содержанием и отражают суть проведенных исследований, заключения обоснованы.

Диссертационная работа, представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами», соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС». Куликовский Михаил Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Отзыв на диссертацию обсужден и одобрен на заседании кафедры «Интеллектуальные системы в управлении и автоматизации», протокол №6 от 15 декабря 2025г.

Заведующий кафедрой

Интеллектуальные системы в управлении и автоматизации
кандидат технических наук, доцент



Воронов В. И.

E-mail: isua.kaf@yandex.ru

Адрес: 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 8а

Подпись к.т.н., доцента

Зав.кафедрой ИСУиА Воронова В. И.

Ивановский
15.12.2025



заверяю

Гурашова С. С.

Контакты ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ)

Адрес: 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 8а

Тел.: 8 (495) 957-77-99

E-mail: mtuci@mtuci.ru