

9(150)

Андрей Александрович Попов (1821, Санкт-Петербург — 1898, Санкт-Петербург) — русский флотоводец, кораблестроитель, адмирал (1891 год). Его имя носит корабль Черноморского флота — эскадренный миноносец «Андрей Попова» рядом с Владивостоком. Родился 22 сентября (4 октября) 1821 года в Санкт-Петербурге в семье известного кораблестроителя, управляющего Охтинской верфью Александра Андреевича Попова.

С 1830 года учился на морском отделении Александровского корпуса; в 1838 году окончил Морской кадетский корпус с присвоением чина мичмана и зачислением в 32-й флотский экипаж (Черноморский флот).

был командиром парохода «Метеор» (вспомогательного крейсера Черноморского флота). В 1853 году был командирован в Константинополь для сбора сведений о вооружении Босфора и близлежащих к нему укрепленных мест по Чёрному морю и Дунаю до Рущука. Участвовал в Крымской кампании. В 1853—1854 годах командовал пароходами «Эльбрус», «Андия», «Турок», потопил шесть турецких транспортов; в сентябре 1854 года командовал в чине капитан-лейтенанта пароходом «Тамань», прорвался из блокированного Севастополя в Одессу и вернулся обратно с грузом для оборонявшихся.

Руководил установкой морских орудий на укреплениях Севастополя и артиллерийским снабжением. Руководил снаряжением двух брандеров. Руководил созданием бона для преграждения севастопольского рейда. За боевые заслуги в этот период — награждён двумя орденами.

Произведен в капитаны 1-го ранга; с 1855 — флигель-адъютант. В 1855 году был командирован с театра военных действий в Кронштадт, Выборг, Свеаборг и другие укрепленные порты побережья Балтийского моря. В период 1856—1858 годов был начальником штаба Кронштадтского порта.

В 1858—1861 гг. — командующий отрядом из двух корветов («Рында» и «Гридень») и клипера «Офрингем» (2-й Амурский отряд), привел его из Кронштадта в Японское море, затем ходил у берегов Японии, исследовал побережья русского Приморья (одна из бухт — у 45-й параллели — был назван в честь корвета Попова «Рында»). В 1859 году кораблями отряда командованием нанесли визит в порт Сан-Франциско.

В 1861 году был произведен в контр-адмиралы с назначением в Свиту[2]. Избран членом Комитета Кораблестроительного и Морского Училищ, участвовал в работе по введению переделки парусных судов. Совершил плавание к берегам Японии. В 1861 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Первая эскадра). В 1862 году был произведен в вице-адмиралы с назначением в Свиту. В 1863 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Вторая эскадра).

205 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ
21 сентября 2026 г.

ПОПОВ
АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ
1821-1898 гг.



UNIVERSUM: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научный журнал

Издается ежемесячно с ноября 2013 года

Выпуск: 9(150)

Сентябрь 2026 г.

Часть 3

Новосибирск
2026

Главный редактор журнала:

Звездина Марина Юрьевна – д-р физ.-мат. наук, доц.

Редакционная коллегия:

Абдуллин Тимур Зуфарович – канд. техн. наук;

Гасумов Рамиз Алиевич – д-р техн. наук, проф.;

Деев Владислав Борисович – д-р техн. наук, проф.;

Кокишаров Сергей Александрович – д-р техн. наук, проф.;

Колесников Александр Сергеевич – канд. техн. наук;

Мажидов Кахрамон Халимович – д-р хим. наук, проф.;

Манасян Сергей Керопович – д-р техн. наук, проф.;

Мартышкин Алексей Иванович – канд. техн. наук, доц.;

Мерганов Аваз Мирсултанович – канд. техн. наук (PhD);

Немирова Любовь Федоровна – канд. техн. наук, доц.;

Полтавец Валерий Васильевич – д-р техн. наук, доц.;

Радкевич Мария Викторовна – д-р техн. наук, проф.;

Старченко Ирина Борисовна – д-р техн. наук, проф.;

Тимухина Елена Николаевна – д-р техн. наук, проф.;

Усманов Хайрулла Сайдуллаевич – д-р техн. наук, проф.;

Фозилов Садриддин Файзуллаевич – д-р техн. наук, проф.;

Шайтура Сергей Владимирович – канд. техн. наук, доц.;

Яронова Наталья Валерьевна – канд. техн. наук, доц.

U55 Universum: технические науки : электронный научный журнал. — № 9(150). — Часть 3. — Новосибирск : Изд-во «Юниверсум», 2026. — 84 с. — Текст : электронный. — URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/category/9150> (дата публикации: 28.09.2026).

Содержание

Статьи на русском языке

Промышленность и производство

Нефтяная и газовая промышленность. Переработка углеводородного сырья

- Исследование химического и минералогического состава техногенных отходов медно-обогатительного комбината** 4

Абдиразаков Акмал Ибрагимович

Маллаев Шамшод Обиджон угли

Турдиев Фарид Раззок угли

- Восстановление продуктивности газовых скважин на поздней стадии разработки после солянокислотной обработки неоднородной прискважинной зоны** 14

Саматов Шерзод Шавкатович

Хушвактов Гайрат Абдираимович

- Математическое моделирование и многокритериальная оптимизация кожухотрубного теплообменного аппарата с комбинированной интенсификацией теплообмена** 20

Юсупов Рустам Атхамович

Исаматова Джамиля Нигматуллаевна

Исмаилов Ойбек Юлибаевич

Саттаров Зафар Муродович

Металлургия, материаловедение и горное дело

- Инновационные технологии для выработки и переработки минералов в южных регионах Узбекистана** 34

Боймуродов Нажмиддин Абдукодирович

Раббимов Жахонгир Шодмонкулович

- Математическое моделирование кинематики формообразования металла в винтовых калибрах шаропрокатного стана** 45

Каримов Камалхан Аббасович

Шахобутдинов Рустам Эркинбаевич

Каримова Аноргул Рузимовна

Носиров Тулкинжан Нарзулла угли

Хужамов Акмал

Хуррамов Достонжон Хусан угли

- Исследование флотационного обогащения серебросодержащих руд с целью повышения извлечения серебра** 54

Насирова Нигора Рамазановна

- Численное моделирование и оценка закономерностей развития зон концентрации напряжений в массиве горных пород при влиянии горных работ** 61

Саямова Клара Джаббаровна

Меликулов Абдусаттар Джаббарович

Уралбаев Абдукахар Джаппарович

Бакиров Гайрат Холикбердиевич

Абдувахобов Жавохир Собир угли

- Современные технологии извлечения серебра из медно-порфировых руд** 73

Хасанов Абдурашид Солиевич

Мамаисакова Зебо Баходир кизи

СТАТЬИ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ И ПРОИЗВОДСТВО

НЕФТЯНАЯ И ГАЗОВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ.
ПЕРЕРАБОТКА УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ*Статья поступила в редакцию: 07.08.2026**Статья принята к публикации: 08.09.2026**Статья опубликована: 28.09.2026*

УДК 622.765+546.3+549.09

**Исследование химического и минералогического состава техногенных
отходов медно-обогатительного комбината****Абдиразакوف Акмал Ибрагимович**
доц.*Каршинский государственный технический университет**Республика Узбекистан, г. Карши**E-mail: abdirazakov34@gmail.com***Маллаев Шамшод Обиджон угли**
ассистент*Каршинский государственный технический университет**Республика Узбекистан, г. Карши***Турдиев Фарид Раззок угли**
ассистент*Каршинский государственный технический университет**Республика Узбекистан, г. Карши*

Библиографическое описание: Абдиразакوف А.И., Маллаев Ш.О.У., Турдиев Ф.Р.У. Исследование химического и минералогического состава техногенных отходов медно-обогатительного комбината // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 9(150). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23384>

Study of the chemical and mineralogical composition of man-made waste from a copper processing plant

Abdirazakov Akmal Ibragimovich

Associate Professor

Karshi State Technical University

Republic of Uzbekistan, Karshi

Mallayev Shamshod Obidjon o'g'li

Assistant

Karshi State Technical University

Republic of Uzbekistan, Karshi

Turdiyev Farid Razzoq o'g'li

Assistant

Karshi State Technical University

Republic of Uzbekistan, Karshi

Аннотация

В данной статье рассматриваются методы извлечения меди в условиях Алмалыкского горно-металлургического комбината в нашей стране, а также тот факт, что после извлечения 60 – 70 % меди из состава 2-го медеобогащающего комбината (МБК) ежегодно образуются десятки миллионов тонн техногенных отходов и Для изучения состава этих отходов использовались следующие методы: с помощью современных высокоточных инструментальных методов (рентгенофлуоресцентная спектрометрия (Shimadzu EDX-7000), сканирующая электронная микроскопия (JEOL JSM-IT200, Zeiss EVO MA 10), рентгеновская дифрактометрия (Shimadzu XRD-6100), энергодисперсионный спектрометр (EDS), атомно-абсорбционная спектрометрия (Shimadzu AA-7000) и ICP-MS (Agilent 7900)), был проведен количественный химический, минералогический и фазовый анализ драгоценных металлов, таких как медь, золото, серебро, селен, а также представлена последовательность применения высокоточного лабораторного оборудования для определения содержания золота, серебра и меди. В результате этих анализов было доказано, почему золото, серебро и медь в процессе флотации попадали в состав отходов, а не в концентрат. Эти анализы выявили актуальность разработки экологически чистых и недорогих методов селективного разделения, способных заменить традиционные методы разделения цветных и редких металлов.

Abstract

This article discusses the methods of copper extraction at the Almalyk Mining and Metallurgical Plant in our country, as well as the fact that after extracting 60 – 70 % of copper from the 2nd Copper Processing Plant (CPP), tens of millions of tons of man-made waste are generated annually and To study the composition of these wastes, the following methods were used: using modern high-precision instrumental methods (X-ray fluorescence spectrometry (Shimadzu EDX-7000), scanning electron microscopy (JEOL JSM-IT200, Zeiss EVO MA 10), X-ray diffractometry (Shimadzu XRD-6100), energy dispersive spectrometer (EDS), atomic absorption spectrometry (Shimadzu AA-7000) and ICP-MS (Agilent 7900)), a quantitative chemical, mineralogical and phase analysis of precious metals such as copper, gold, silver, selenium was

carried out, and a sequence was presented The use of high-precision laboratory equipment to determine the gold, silver, and copper content was used. These analyses demonstrated why gold, silver, and copper were being processed as waste rather than concentrate during flotation. These analyses highlighted the urgent need to develop environmentally friendly and inexpensive selective separation methods capable of replacing traditional methods for separating non-ferrous and rare metals.

Ключевые слова: техногенных отходов, драгоценных металлов, флотационного обогащения, химический, минералогический, фазовый, анализ образцов, спектроскопии, оксидные минерал, спектрометр концентрат, гидрометаллургия.

Keywords: man-made waste, precious metals, flotation enrichment, chemical, mineralogical, phase, sample analysis, spectroscopy, oxide mineral, spectrometer concentrate, hydrometallurgy.

Введение

В результате деятельности горнодобывающих и металлургических предприятий Республики Узбекистан накоплены значительные объёмы техногенных отходов, содержащих цветные, благородные и редкие металлы [2]. Согласно данным исследований [1], на Алмалыкском горно-металлургическом комбинате (АГМК) объём отходов флотационного обогащения составляет порядка 955–960 млн тонн, а отходы медеплавильного производства оцениваются в 11–13 млн тонн. В составе этих отходов содержание меди колеблется от 0,11 % до 5,04 %, а также присутствуют золото, серебро, свинец и цинк [1]. В соответствии с Постановлением Президента Республики Узбекистан № ПК-5159 от 24 июня 2021 года и Стратегией развития нового Узбекистана на 2022–2026 годы (Указ № ПФ-60 от 28 января 2022 г.) перед горно-металлургической отраслью поставлены задачи глубокой переработки местного сырья и вовлечения техногенных отходов в хозяйственный оборот по принципу «от сырья к готовой продукции» [2]. Решение этих задач требует детального изучения вещественного состава отходов, форм нахождения ценных компонентов и их распределения по минеральным фазам [10].

Целью настоящей работы являлось комплексное исследование химического, минералогического и фазового состава техногенных отходов 2-го МОК АО «Алмалыкский ГМК» с определением содержания меди, золота, серебра и сопутствующих элементов, а также установлением причин перехода ценных металлов в отходы при флотационном обогащении. Результаты исследования послужат основой для выбора рациональной технологии переработки техногенного сырья [9].

Материалы и методы

Объект исследования. В качестве объекта исследования использованы пробы техногенных отходов, отобранные с поверхности и с различных глубин полигона № 2 2-го медеобогатительного комбината (МОК) АО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат». Отбор проб осуществлялся в соответствии с общепринятыми методиками опробования техногенных месторождений [1]. Для обеспечения репрезентативности

исходный материал был подвергнут квартованию, после чего сформированы две объединённые пробы (шихты № 1 и № 2), которые подвергались всем последующим видам анализа.

Методы исследования

Для решения поставленных задач применялся комплекс современных высокоточных инструментальных методов [10]:

1. Рентгенофлуоресцентная спектрометрия (XRF) – выполнялась на спектрометре Shimadzu EDX-7000 для определения валового содержания основных и второстепенных элементов в пробах. Дополнительно использовался энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный спектрометр [10].

2. Атомно-абсорбционная спектрометрия (AAS) – проводилась на приборе Shimadzu AA-7000 для количественного определения содержания цветных металлов (Cu, Zn, Pb) после кислотного разложения проб [5].

3. Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) – использовалась на Agilent 7900 для определения микро- и примесных элементов, включая редкие и рассеянные металлы [3].

4. Рентгеновская дифрактометрия (XRD) – выполнялась на дифрактометре Shimadzu XRD-6100 для идентификации кристаллических фаз и минерального состава отходов [10].

5. Сканирующая электронная микроскопия (SEM) – проводилась на микроскопах JEOL JSM-IT200 и Zeiss EVO MA 10 для изучения морфологии частиц, их размера и взаимного расположения минеральных фаз [5].

6. Энергодисперсионная спектроскопия (EDS) – реализована на базе SEM (Aztec Energy Advanced X-Act, Oxford Instruments) для локального элементного анализа отдельных минеральных зёрен и выявления ассоциаций ценных элементов с вмещающими минералами [3].

7. Пробирный анализ – использован для определения содержания золота и серебра по методике ISO 10378:2016 [5].

Для каждого вида анализа подготовлены отдельные навески проб в соответствии с требованиями нормативной документации и инструкций к приборам.

Результаты и обсуждение

Химический состав техногенных отходов. Результаты рентгенофлуоресцентного и атомно-абсорбционного анализа объединённых проб представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Химический состав техногенных отходов 2-го медеобогатительного комбината (шихта № 1)

№ п/п	Элемент/оксид	Содержание, %	№ п/п	Элемент/оксид	Содержание, %
1	Cu	0,76	10	Na ₂ O	0,96
2	Zn	0,64	11	MnO	0,012
3	Fe	37,8	12	P ₂ O ₅	0,085
4	Pb	0,20	13	K ₂ O	2,75

№ п/п	Элемент/оксид	Содержание, %	№ п/п	Элемент/оксид	Содержание, %
5	S	1,10	14	CaO	1,54
6	MgO	1,30	15	TiO ₂	0,173
7	Al ₂ O ₃	4,50	16	As	0,0037
8	ZrO	0,0457	17	Au, г/т	0,40
9	SiO ₂	34,80	18	Ag, г/т	3,80

Анализ данных таблицы 1 показывает, что основными компонентами отходов являются железо (37,8 %), диоксид кремния (34,8 %) и оксид алюминия (4,5 %), что характерно для отходов переработки сульфидных медно-порфировых руд [6]. Содержание меди составляет 0,76 %, цинка – 0,64 %, свинца – 0,20 %, серы – 1,10 %. Содержание золота (0,40 г/т) и серебра (3,80 г/т) свидетельствует о наличии промышленно значимых концентраций благородных металлов [1]. В пробах также идентифицированы микро- и примесные элементы: титан, марганец, мышьяк, цирконий, барий, кобальт, ванадий, сурьма, рубидий и др. [3].

Для более детального изучения форм нахождения меди выполнен дополнительный анализ шихты № 2. На рис. 1 представлены результаты рентгенофлуоресцентного анализа шихты № 2, на котором отчётливо видны пики, соответствующие меди (Cu), железу (Fe), цинку (Zn), свинцу (Pb), а также кремнию, алюминию и другим элементам. Установлено, что медь в отходах присутствует как в сульфидной, так и в оксидной формах. Содержание CuO в шихте № 2 составило 0,55 %, что подтверждает, что оксидные соединения меди не извлекаются в процессе сульфидной флотации и переходят в отходы [6]. Этот результат согласуется с данными, приведёнными в работах [1, 10].

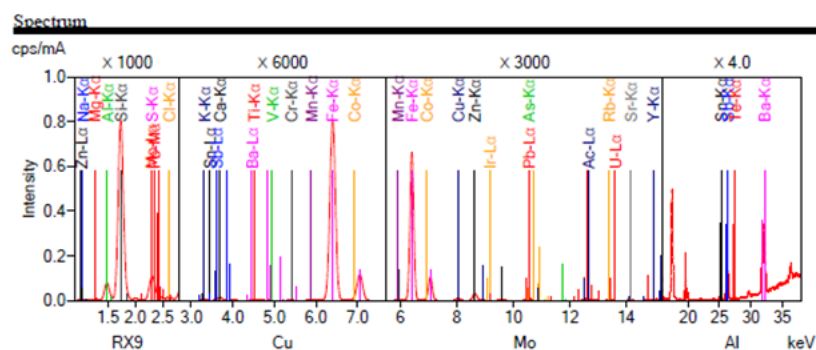


Рисунок 1. Спектр рентгенофлуоресцентного анализа шихты № 2

Минералогический и фазовый состав. Рентгеновская дифрактометрия (XRD) позволила идентифицировать основные минеральные фазы, присутствующие в отходах: кварц (SiO₂), гематит (Fe₂O₃), магнетит (Fe₃O₄), халькопирит (CuFeS₂), халькоцит (Cu₂S), сфалерит (ZnS), галенит (PbS), а также продукты их окисления – оксиды и гидроксиды железа, гипс (CaSO₄·2H₂O) и др. [10, 6].

Структурный анализ показал, что основная масса отходов представлена тонкодисперсными агрегатами с размером частиц от 10 до 200 мкм. Оксидные минералы (PbO, CuO) фиксируются в виде самостоятельных фаз и в составе сложных железистых агрегатов [3].

Изучение морфологии и элементных ассоциаций методом SEM–EDS. Для визуализации распределения ценных компонентов и выявления их связей с вмещающими минералами проведены исследования на сканирующих электронных микроскопах JSM-IT200 и Zeiss EVO MA 10 с EDS-приставками [5, 3].

На рис. 2 представлены SEM-изображения отходов при увеличении 110 крат, на которых видны зоны локализации металлов. Видно, что частицы имеют неправильную форму и неоднородную структуру, что характерно для продуктов измельчения и флотации. Более светлые участки соответствуют минералам с высоким средним атомным номером (сульфиды, оксиды железа), тёмные – силикатной матрице.

EDS-анализ характерных зон (рис. 3) показал, что в участках с высоким содержанием кислорода регистрируются сигналы Fe, Ti, Ca и Si, что соответствует оксидным и силикатным фазам [5]. При этом в оксидных железистых образованиях обнаружены включения меди, свинца и цинка, что указывает на срастание сульфидных минералов с оксидами железа.

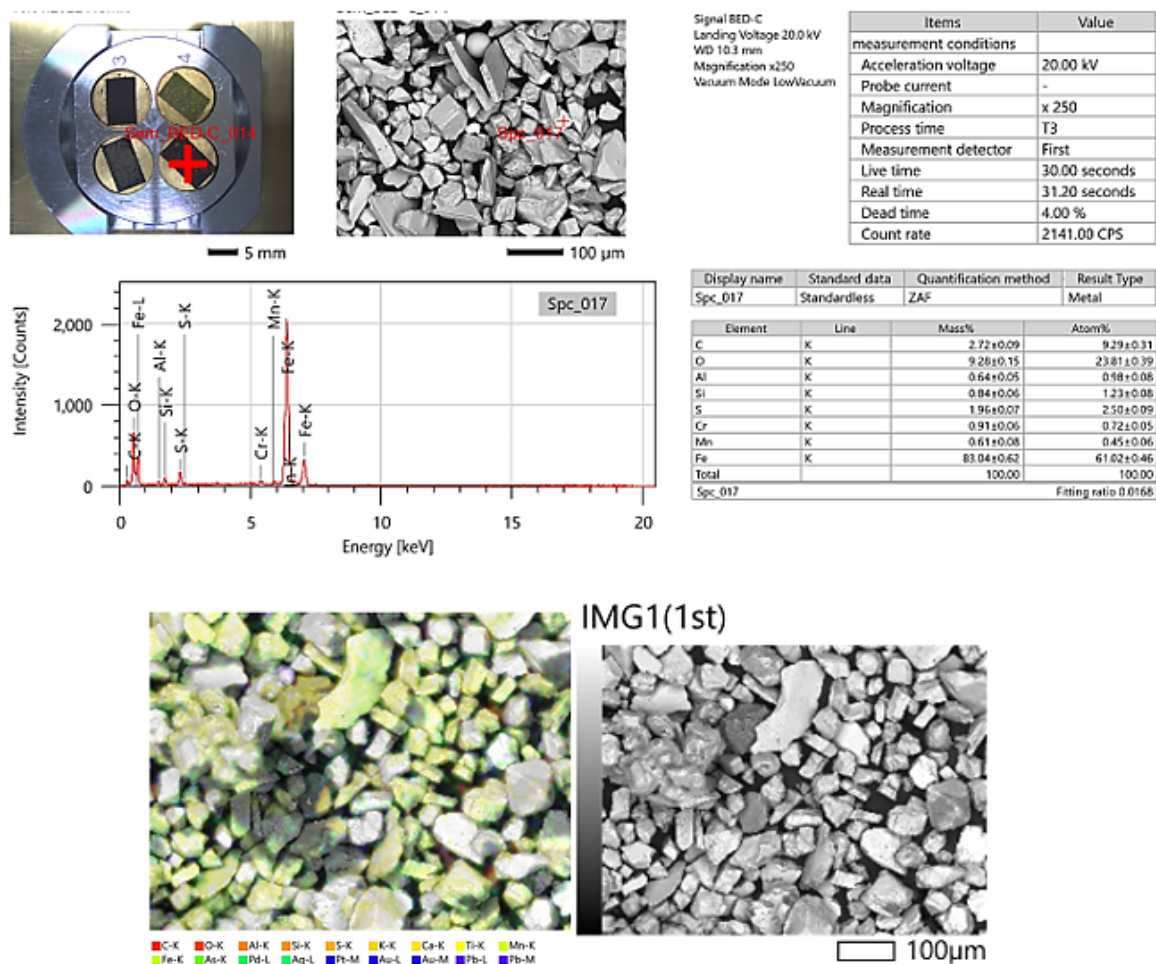


Рисунок 2. SEM-изображения отходов 2-го МОК при увеличении $\times 110$

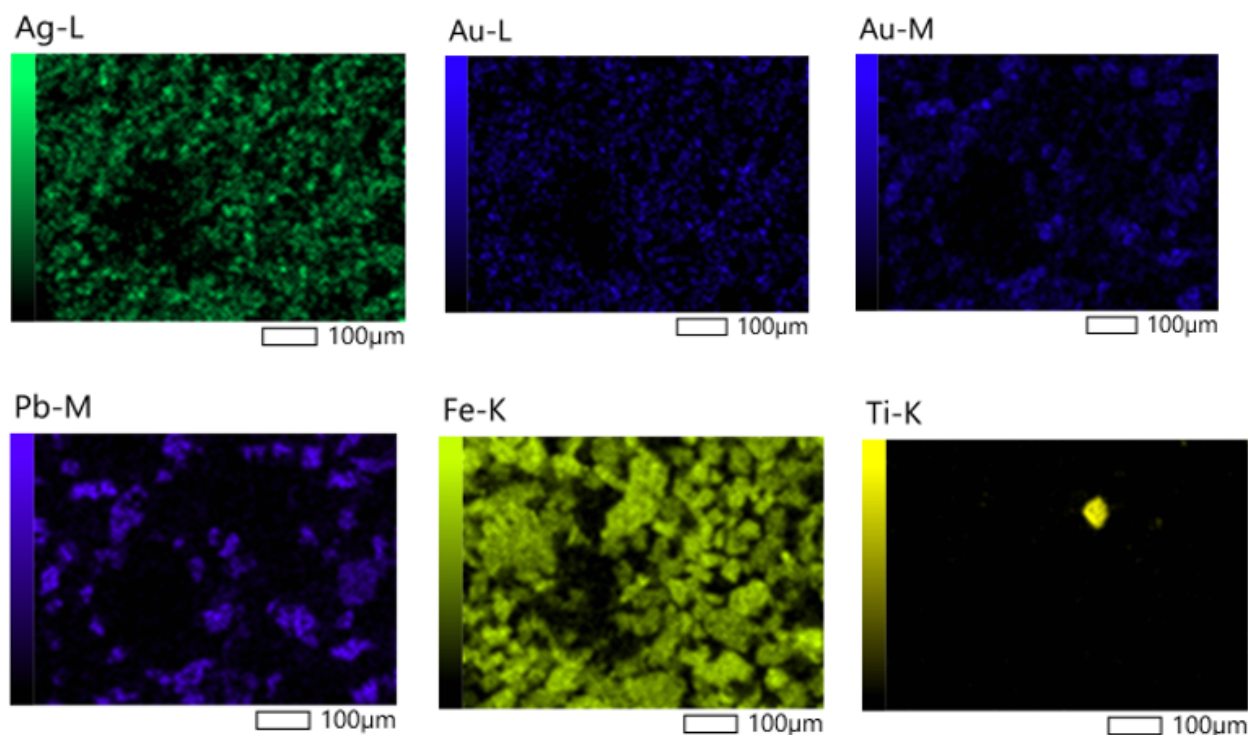


Рисунок 3. Результаты элементного анализа отходов МОК-2, образец 2

Особое внимание уделено определению форм нахождения золота и серебра. Поскольку спектральные сигналы Au и Ag в EDS близки, использовалось разрешение по L-линии золота и K-линии серебра [5]. На рис. 4 приведены карты распределения элементов (SEM–EDS-картирование), подтверждающие соминерализацию золота и серебра с кварцем, пиритом и магнетитом [3, 4]. Установлено, что благородные металлы находятся преимущественно в виде тонкодисперсных включений (менее 5 мкм) в сульфидных и оксидных фазах, либо в виде твёрдых растворов в кристаллической решётке пирита [6].

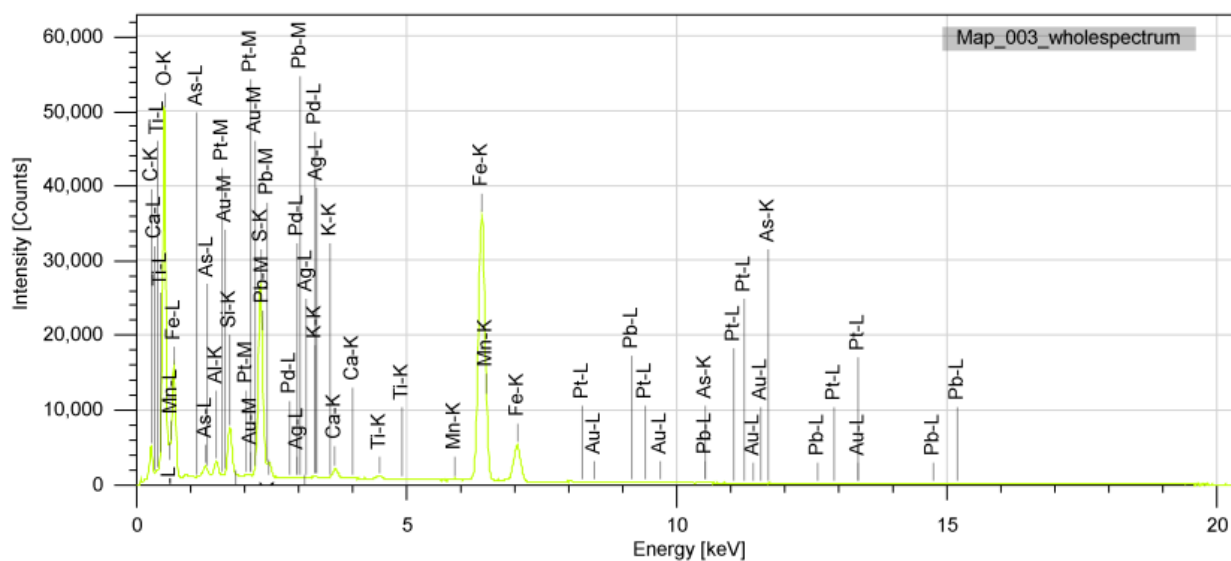


Рисунок 4. Общий элементный анализ образца 2-МОК

Результаты SEM–EDS также показали, что свинец присутствует в отходах в виде окисленных форм галенита (PbO), а не в сульфидной форме (PbS). Это объясняет, почему при селективной флотации на 2-МОК, ориентированной на сульфидные минералы меди, молибдена и железа, оксидные соединения свинца не переходят в концентрат и накапливаются в хвостах [1].

Таким образом, проведённый комплекс анализов показал, что основными причинами потерь ценных металлов в отходах являются:

1. Присутствие меди в оксидных формах, не флотируемых сульфидными собирателями [6];
2. Наличие свинца в виде PbO [10, 6];
3. Тонкая вкрапленность золота и серебра в пирит и оксиды железа, а также их срастание с кварцем [4];
4. Низкая степень раскрытия минеральных зёрен при существующей технологии измельчения [1].

Эти факторы делают традиционную флотацию малоэффективной для переработки данных отходов и обосновывают необходимость применения гравитационных методов для предварительного обогащения с последующим гидрометаллургическим вскрытием (например, кислотным выщелачиванием, цианированием или биовыщелачиванием) [3, 4]. Кроме того, в составе отходов выявлены следовые концентрации селена, теллура, кобальта, никеля и молибдена, что открывает перспективы комплексного извлечения редких элементов [10, 3].

Заключение

1. Проведённые исследования с использованием современных высокоточных инструментальных методов (XRF, AAS, ICP-MS, XRD, SEM–EDS) позволили получить достоверные данные о химическом, минералогическом и фазовом составе техногенных отходов 2-го МОК АО «Алмалыкский ГМК» [10, 5]. Установлено, что отходы являются полиэлементным техногенным сырьём, содержащим железо (37,8 %), кремний (34,8 %), алюминий (4,5 %), а также цветные и благородные металлы: Cu – 0,76 %, Zn – 0,64 %, Pb – 0,20 %, Au – 0,4 г/т, Ag – 3,8 г/т (таблица 1). Эти данные согласуются с результатами исследований состава техногенных отходов АГМК, приведёнными в работе [1].

2. Минералогическими и фазовыми методами подтверждено, что медь в отходах присутствует как в сульфидной (халькопирит, халькоцит), так и в оксидной (CuO) формах, причём оксидные соединения являются основной причиной потерь меди при сульфидной флотации [6]. Свинец также находится преимущественно в оксидной форме (PbO), что препятствует его переходу в концентрат [10].

3. Установлено, что золото и серебро в отходах ассоциированы с кварцем, пиритом и магнетитом, образуя тонкодисперсные включения размером менее 5 мкм, а также частично входя в кристаллическую решётку пирита и оксидов железа [4]. Эта особенность является главной причиной их перехода в хвосты флотации.

4. Выявленные минералогические характеристики (преобладание оксидных форм, тонкая вкрапленность благородных металлов, наличие сложных сростков) определяют неэффективность традиционных флотационных методов для переработки данных техногенных отходов [1, 6].

5. Практическая значимость работы заключается в обосновании рациональных технологических направлений дальнейшей переработки отходов: предварительное гравитационное обогащение с последующим гидрометаллургическим вскрытием (кислотным выщелачиванием, цианированием или биовыщелачиванием) позволяет обеспечить высокие показатели извлечения цветных, благородных и редких металлов [3, 4]. Кроме того, в составе отходов обнаружены следовые количества селена, теллура, кобальта, никеля и молибдена, что делает целесообразным исследование комплексного извлечения этих элементов в рамках единой технологической схемы [10, 3].

Список литературы

1. Мирзажанова С., Мансурова Д., Боймирзаева Ж., Яркулова Н., Наврузова М. Виды техногенных отходов, образующихся в процессе производства меди, и их химико-аналитический состав // Горные машины и технологии. – 2026. – № 1. – С. 45–54.
2. Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 г. № ПФ-60 «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022–2026 годы».
3. Altinkaya P., Liipo J., Kolehmainen E., Haapalainen M., Leikola M., Lundström M. Leaching of trace amounts of metals from flotation tailings in cupric chloride solutions // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2019. – Т. 36, № 2. – P. 335–342. – DOI: 10.1007/s42461-018-0015-9.
4. Coca Y. Laser-induced surface vitrification for the sustainable stabilization of copper tailings // Sustainability. – 2025. – Т. 17, № 13. – Art. 5676. – P. 1–17. – DOI: 10.3390/su17135676.
5. International Organization for Standardization. ISO 10378:2016. Copper, lead and zinc sulfide concentrates – Determination of gold and silver – Fire assay gravimetric and flame atomic absorption spectrometric method. – Geneva: ISO, 2016. – 50 P.
6. Mukhamedzhanova S. et al. Improvement of the technology of copper production by involving in the processing of industrial waste JSC «Almalyk MMC» in Uzbekistan // International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry «Interagromash». – 2022. – P. 2193–2199.
7. Ochildiev K., Mukhametjanova S., Matkarimov S., Nosirkhujaev S., Ismailov J., Nizamova A. Thermodynamic principles of the process of reduction of metal oxides in copper industrial converter slags using clinker // E3S Web of Conferences. – 2025. – Т. 632. – Art. 04008. – DOI: 10.1051/e3sconf/202563204008.
8. Priya J., Jain M.K., Randhawa N.S. Comprehensive physicochemical characterization and property-process matrix for valorizing copper extraction wastes: enabling technology selection and screening-level resource classification // Cleaner Engineering and Technology. – 2026. – Т. 33. – Art. 101281. – DOI: 10.1016/j.clet.2026.101281.

9. Valiyev Kh., Bugubaeva A., Nechaeva A., Artykova A., Melamud V., Stom D., Boduen A., Bulaev A. The development of innovated complex process for treatment of old flotation tailings of copper-zinc sulfide ore // *Molecules*. – 2024. – Т. 29, № 7. – Art. 1550. – DOI: 10.3390/molecules29071550.
10. Vokhidov B.R. New horizons processing of technogenic waste of the copper industry // *The American Journal of Applied Sciences*. – 2022. – Т. 4, № 5. – P. 42–51.

References

1. Mirzazhanova S., Mansurova D., Bojmirzaeva Zh., Yarkulova N., Navruzova M. [Types of Technogenic Waste Generated in Copper Production Processes and Their Chemical-Analytical Composition] // *Gornye mashiny i tekhnologii*. – 2026. – No. 1 – URL: <http://mining.tdtu.uz/index.php/journal/article/view/233> (дата обращения: 08.09.2026). (In Russ.)
2. [Decree of the President of the Republic of Uzbekistan of January 28, 2022 No. PF-60 'On the Development Strategy of New Uzbekistan for 2022–2026'] (In Russ.)
3. Rintala L., Leikola M., Saukko P., Lundström M. Leaching of trace amounts of metals from flotation tailings in cupric chloride solutions // *Mining, Metallurgy & Exploration*. – 2019. – DOI: 10.1007/s42461-018-0015-9.
4. Laser-Induced Surface Vittrification for the Sustainable Stabilization of Copper Tailings // *Sustainability*. – 2025. – Vol. 17, No. 13. – Art. 5676. – DOI: 10.3390/su17135676.
5. International Organization for Standardization. ISO 10378:2016. Copper, lead and zinc sulfide concentrates – Determination of gold and silver – Fire assay gravimetric and flame atomic absorption spectrometric method. – Geneva: ISO, 2016. – 50 P.
6. Mukhamedzhanova S. et al. Improvement of the Technology of Copper Production by Involving in the Processing of Industrial Waste JSC “Almalyk MMC” in Uzbekistan // *International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry “Interagromash”*. – 2022.
7. Ochildiev K., Mukhametjanova S., Matkarimov S., Nosirkhujaev S., Ismailov J., Nizamova A. Thermodynamic principles of the process of reduction of metal oxides in copper industrial converter slags using clinker // *E3S Web of Conferences*. – 2025. – Vol. 632. – Art. 04008. – DOI: 10.1051/e3sconf/202563204008.
8. Priya J., Jain M.K., Randhawa N.S. Comprehensive Physicochemical Characterization and Property-Process Matrix for Valorizing Copper Extraction Wastes: Enabling Technology Selection and Screening-Level Resource Classification // *Cleaner Engineering and Technology*. – 2026.
9. Valiyev Kh., Bugubaeva A., Nechaeva A., Artykova A., Melamud V., Stom D., Boduen A., Bulaev A. The Development of Innovated Complex Process for Treatment of Old Flotation Tailings of Copper-Zinc Sulfide Ore // *Molecules*. – 2024. – Vol. 29, No. 7. – DOI: 10.3390/molecules29071550.
10. Vokhidov B.R. New horizons processing of technogenic waste of the copper industry // *The American Journal of Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 4, No. 5.

Статья поступила в редакцию: 12.08.2026

Статья принята к публикации: 03.09.2026

Статья опубликована: 28.09.2026

УДК 622.279+622.24

DOI: 10.32743/UniTech.2026.150.9.23378

Восстановление продуктивности газовых скважин на поздней стадии разработки после солянокислотной обработки неоднородной прискважинной зоны

Саматов Шерзод Шавкатович

базовый докторант

Каршинский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Карши

ORCID: 0009-0007-2995-6478

E-mail: sh.sh.samatov@gmail.com

Хушвактов Гайрат Абдираимович

базовый докторант

Каршинский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Карши

Productivity recovery of gas wells at the late stage of development after hydrochloric acid treatment of a heterogeneous near-wellbore zone

Samatov Sherzod Shavkatovich

Doctoral Candidate Karshi State Technical University

Republic of Uzbekistan, Karshi

Khushvaktov Gayrat Abdiraimovich

Doctoral Candidate Karshi State Technical University

Republic of Uzbekistan, Karshi

Аннотация

Предложен расчетный подход к оценке восстановления продуктивности газовых скважин на поздней стадии разработки после солянокислотной обработки неоднородной прискважинной зоны карбонатного коллектора. Прискважинная область представлена тремя концентрическими зонами с различной проницаемостью. Неоднородность оценивается коэффициентом вариации, а эффективность воздействия – изменением эквивалентного скин-фактора и нормированной продуктивности. Расчеты выполнены для трех уровней неоднородности. Установлено, что увеличение коэффициента вариации от 0,23 до 0,75 сопровождается снижением исходной нормированной продуктивности с 0,680 до 0,302. После кислотного воздействия продуктивность увеличивается в 1,61-3,16 раза. При высокой

Библиографическое описание: Саматов Ш.Ш., Хушвактов Г.А. Восстановление продуктивности газовых скважин на поздней стадии разработки после солянокислотной обработки неоднородной прискважинной зоны // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 9(150). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23378>

неоднородности, несмотря на максимальный относительный прирост, нормированная продуктивность достигает лишь 0,953, что указывает на неполное устранение фильтрационного сопротивления. Полученные результаты подтверждают необходимость учета геологической неоднородности при скважинной зоне при выборе газовых скважин на поздней стадии разработки для кислотной стимуляции. Практическая значимость подхода заключается в возможности предварительного ранжирования низкодебитных газовых скважин по ожидаемой степени восстановления продуктивности и обоснования целесообразности кислотного воздействия в условиях снижения пластового давления. Это повышает обоснованность выбора технологического режима воздействия на поздней стадии разработки.

Abstract

A computational approach is proposed to evaluate the recovery of gas-well productivity at the late stage of field development after hydrochloric acid treatment of a heterogeneous near-wellbore zone in a carbonate reservoir. The near-wellbore region is represented by three concentric zones with different permeabilities. Heterogeneity is characterized by the coefficient of variation, while treatment efficiency is assessed through changes in the equivalent skin factor and normalized productivity. Calculations were performed for three levels of heterogeneity. It was established that an increase in the coefficient of variation from 0.23 to 0.75 is accompanied by a decrease in the initial normalized productivity from 0.680 to 0.302. After acid treatment, productivity increases by a factor of 1.61–3.16. Under conditions of high heterogeneity, despite the maximum relative increase, normalized productivity reaches only 0.953, indicating incomplete elimination of flow resistance. The obtained results confirm the need to account for the geological heterogeneity of the near-wellbore zone when selecting gas wells at the late stage of development for acid stimulation. The practical significance of the proposed approach lies in its ability to preliminarily rank low-rate gas wells according to the expected degree of productivity recovery and to justify the feasibility of acid treatment under conditions of declining reservoir pressure. This improves the justification for selecting the appropriate treatment regime at the late stage of field development.

Ключевые слова: газовая скважина, поздняя стадия разработки, карбонатный коллектор, прискважинная зона, солянокислотная обработка, скин-фактор, неоднородность.

Keywords: gas well, late-stage development, carbonate reservoir, near-wellbore zone, hydrochloric acid treatment, skin factor, heterogeneity.

Введение

На поздней стадии разработки газовых месторождений падение пластового давления приводит к тому, что состояние прискважинной зоны (ПЗП) начинает играть доминирующую роль в обеспечении продуктивности скважин. Как отмечают Reis и Carvalho, в истощенных коллекторах даже незначительные изменения на поровом уровне создают высокое дополнительное сопротивление [8], а Zhang L. с соавторами подчеркивают необходимость адаптации уравнений продуктивности к условиям сниженного давления [9]. В карбонатных

коллекторах ситуация осложняется кольматацией пор, изменением фазовой подвижности и выраженной геологической неоднородностью, что требует применения методов интенсификации притока [1, 2].

Матричная солянокислотная обработка (СКО) является основным методом восстановления продуктивности, способствующим растворению матрицы и формированию высокопроводящих каналов (червоточин). Различные аспекты этого процесса, включая влияние на геомеханику и параметры червоточин, подробно рассмотрены в обзорах Alameedy [1], Chen [2] и Lucas [7]. Моделирование формирования каналов, в том числе с использованием метода фазового поля (Fugui и др. [5]), показывает высокую зависимость результатов от структуры пустотного пространства. При этом наличие слоистой неоднородности и трещин, как установлено в работах dos Santos [3] и Li [6], приводит к преимущественному уходу кислоты в наиболее проницаемые интервалы. Для снижения этого эффекта применяются вязкие кислотные составы (Zhang и Xu [10]), однако проблема неравномерного охвата ПЗП остается актуальной.

Ранее авторами было проведено базовое моделирование кислотного воздействия для месторождений Матонат и Западный Крук [4], однако количественная взаимосвязь между уровнем геологической неоднородности и фактической степенью восстановления фильтрационных свойств оставалась недостаточно изученной. Научная проблема заключается в том, что традиционная оценка эффективности СКО опирается преимущественно на относительное увеличение дебита (кратность). Однако в условиях неоднородных карбонатных коллекторов этот показатель может давать искаженное представление о реальном снятии скин-эффекта.

Научная новизна работы заключается в разработке комплексного расчетного подхода, использующего совокупность показателей – коэффициента вариации проницаемости, эквивалентного скин-фактора и нормированной продуктивности, что позволяет дифференцировать относительный прирост дебита от фактического устранения фильтрационного сопротивления.

Цель работы – оценить влияние неоднородности прискважинной зоны на восстановление продуктивности газовой скважины после солянокислотной обработки на поздней стадии разработки.

Материалы и методы

Прискважинная область смоделирована тремя концентрическими зонами с границами 0,30; 0,70 и 1,50 м ($r_w = 0,10$ м, $r_e = 250$ м, фоновая проницаемость $k_r = 30$ мД). Проницаемость зон до обработки (мД): 10-14-18; 5-12-18; 2-8-20 (для трех уровней). После СКО: 45-40-35; 50-30-25; 60-20-18. Степень неоднородности оценивается коэффициентом вариации

$C_v = \sqrt{\frac{1}{n} \sum \left(\frac{k_i - k_r}{k_r} \right)^2}$. Эквивалентный скин-фактор многозонной ПЗП: $S = \sum \left(\frac{k_r}{k_i} - 1 \right) \ln \left(\frac{r_i}{r_{i-1}} \right)$. Оценка базируется на нормированной продуктивности $J/J_0 = \ln(r_e/r_w) / [\ln(r_e/r_w) + S]$ и коэффициенте увеличения дебита $K_q = J_{\text{после}}/J_{\text{до}}$, где J и J_0 – текущая и условно ненарушенная продуктивность.

Результаты и обсуждение

Моделирование (Табл. 1) показывает, что рост неоднородности (C_v от 0,23 до 0,75) увеличивает начальный скин-фактор ($S_{до}$) с 3,67 до 18,09, снижая исходную продуктивность ($J_{до}/J_0$) с 0,680 до 0,302. Низкодебитные скважины крайне чувствительны к ухудшению ПЗП

Таблица 1.

Влияние неоднородности на восстановление продуктивности

Неоднородность	C_v	$S_{до}$	$S_{после}$	$J_{до}/J_0$	$J_{после}/J_0$	K_q
Низкая	0,23	3,67	-0,69	0,680	1,096	1,61
Средняя	0,46	7,27	-0,29	0,518	1,038	2,00
Высокая	0,75	18,09	0,38	0,302	0,953	3,16

После СКО фильтрационное сопротивление снижается. При $C_v = 0,23$ и 0,46 (низкая/средняя неоднородность) формируется зона с проводимостью выше исходной: $S_{после}$ принимает отрицательные значения (-0,69 и -0,29), а продуктивность превышает единицу (1,096 и 1,038), что означает успешную интенсификацию. Однако при высокой неоднородности ($C_v = 0,75$) $S_{после}$ снижается, но остается положительным (0,38).

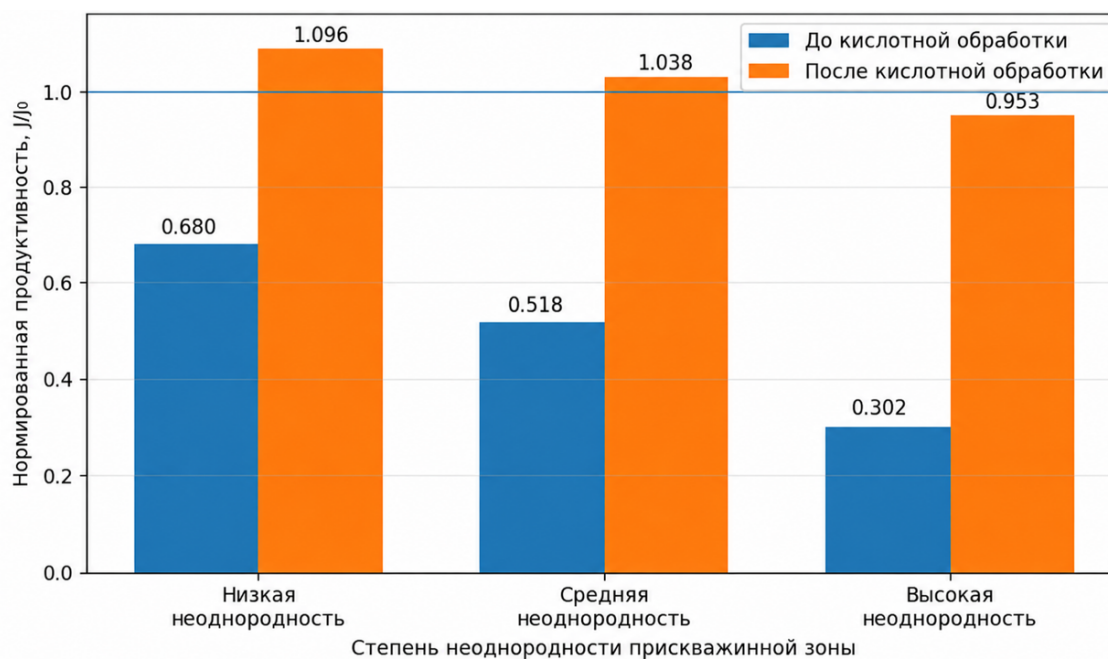


Рисунок 1. Нормированная продуктивность газовой скважины до и после кислотной обработки при различной неоднородности прискважинной зоны

Как видно из Рис. 1, именно здесь достигается максимальный $K_q = 3,16$ (против 1,61 при однородной среде), но нормированная продуктивность восстанавливается не полностью ($J_{после}/J_0 = 0,953$). Это согласуется с данными [3, 6], подтверждая, что при контрасте проницаемости зоны с высоким сопротивлением не охватываются кислотой. Таким образом, высокий относительный прирост K_q не гарантирует восстановления ПЗП. Эффективность СКО следует оценивать комплексно, сопоставляя ожидаемый коэффициент K_q и степень фактического восстановления $J_{после}/J_0$.

Заключение

1. Предложена модель оценки восстановления продуктивности газовой скважины после СКО с учетом многозонной неоднородности ПЗП.
2. Рост C_v от 0,23 до 0,75 снижает исходную нормированную продуктивность до 0,302.
3. Несмотря на максимальный прирост дебита (в 3,16 раза) при высокой неоднородности, продуктивность восстанавливается лишь до 0,953, что подтверждает неполный охват ПЗП.
4. Выбор скважин для стимуляции должен базироваться на комплексной оценке скин-фактора и геологической неоднородности.

Список литературы

1. Alameedy U., Fatah A., Abbas A.K., Al-Yaseri A. Matrix acidizing in carbonate rocks and the impact on geomechanical properties: a review // *Fuel*. – 2023. – Т. 349. – Art. 128586. – DOI: 10.1016/j.fuel.2023.128586.
2. Chen X., Deng Z.-X., Liu P.-L., Du J., Zhang T.-Y., Xiong Y., Tang H.-M., Li W., Xiong Z.-L. A review of matrix acidizing for carbonate reservoirs // *Petroleum Science*. – 2026. – DOI: 10.1016/j.petsci.2026.06.016.
3. Dos Santos Y.R. P., Gomes I.F., Lima A., Rodrigues M.A. F. da Silva Filho E.D., Barbosa J.A., Antonino A.C. D., Duarte D.A., Antunes A.F. N.R. Acid-rock interaction investigation and the influence of fractures during matrix acidizing in carbonate rocks // *Petroleum*. – 2025. – Т. 11, № 4. – P. 475–495. – DOI: 10.1016/j.petlm.2025.06.001.
4. Ermatov N.X., Samatov Sh. Sh., Boyqobilova M.M., Axatova G.A. Karbonat kollektorlarga kislotali ishlov berishni modellastirish (Matonat va G'arbiy Kruk konlari misolida) // *Innovatsion texnologiyalar*. – 2025. – № 3 (59). – P. 7–15.
5. Furui K., Abe T., Watanabe T., Yoshioka K. Phase-field modeling of wormhole formation and growth in carbonate matrix acidizing // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. – Т. 209. – Art. 109866. – DOI: 10.1016/j.petrol.2021.109866.
6. Li S., He Y., Cheng Q., Wu W., Yin N., Ren H., Chen C., Zhuo S., Long Y. Influence of heterogeneity on acidizing performance in multi-layered carbonate reservoirs // *Processes*. – 2025. – Т. 13, № 12. – Art. 3852. – DOI: 10.3390/pr13123852.
7. Lucas C.R. S., Neyra J.R., Araújo E.A. da Silva D.N. N., Lima M.A., Ribeiro D.A. M., Aum P.T. P. Carbonate acidizing – a review on influencing parameters of wormholes formation // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2023. – Т. 220. – Art. 111168. – DOI: 10.1016/j.petrol.2022.111168.
8. Reis P.K. P., Carvalho M.S. Pore-scale analysis of gas injection in gas-condensate reservoirs // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. – Т. 212. – Art. 110189. – DOI: 10.1016/j.petrol.2022.110189.
9. Zhang L., Cheng S., Wu K. et al. A full-stage productivity equation for constant-volume gas reservoirs and its application // *Processes*. – 2024. – Т. 12, № 9. – Art. 1855. – DOI: 10.3390/pr12091855.

10. Zhang L., Xu H., Zhao K., Wang J., Jiang H. A study on effect analysis and process parameter optimization of viscous acid acidification in a porous heterogeneous carbonate reservoir // Processes. – 2024. – T. 12, № 7. – Art. 1443. – DOI: 10.3390/pr12071443.

References

1. Alameedy U., Fatah A., Abbas A.K., Al-Yaseri A. Matrix acidizing in carbonate rocks and the impact on geomechanical properties: A review. Fuel. 2023. Vol. 349. Article 128586. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.128586.
2. Chen X., Deng Z.-X., Liu P.-L., Du J., Zhang T.-Y., Xiong Y., Tang H.-M., Li W., Xiong Z.-L. A review of matrix acidizing for carbonate reservoirs. Petroleum Science. 2026. In press. DOI: 10.1016/j.petsci.2026.06.016.
3. dos Santos Y.R.P., Gomes I.F., Lima A., Rodrigues M.A.F., da Silva Filho E.D., Barbosa J.A., Antonino A.C.D., Duarte D.A., Antunes A.F.N.R. dos Santos Y.R.P., Gomes I.F., Lima A., Rodrigues M.A.F., da Silva Filho E.D., Barbosa J.A., Antonino A.C.D., Duarte D.A., Antunes A.F.N.R. Acid-rock interaction investigation and the influence of fractures during matrix acidizing in carbonate rocks. Petroleum // Petroleum. – 2025. – Vol. 11, No. 4. – DOI: 10.1016/j.petlm.2025.06.001.
4. Ermatov N.X., Samatov Sh.Sh., Boyqobilova M.M., Axatova G.A. [Modeling acid stimulation of carbonate reservoirs (a case study of the Matonat and Western Kruk fields)] // Innovatsion texnologiyalar. – 2025. – No. 3 (59).
5. Furui K., Abe T., Watanabe T., Yoshioka K. Phase-field modeling of wormhole formation and growth in carbonate matrix acidizing // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – Vol. 209. – Art. 109866. – DOI: 10.1016/j.petrol.2021.109866.
6. Li S., He Y., Cheng Q., Wu W., Yin N., Ren H., Chen C., Zhuo S., Long Y. Influence of Heterogeneity on Acidizing Performance in Multi-Layered Carbonate Reservoirs. Processes. 2025. Vol. 13. No. 12. Article 3852. DOI: 10.3390/pr13123852.
7. Lucas C.R.S., Neyra J.R., Araújo E.A. da Silva D.N.N., Lima M.A., Ribeiro D.A.M., Aum P.T.P. Carbonate acidizing – A review on influencing parameters of wormholes formation // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2023. – Vol. 220. – Art. 111168. – DOI: 10.1016/j.petrol.2022.111168.
8. Reis P.K.P., Carvalho M.S. Pore-scale analysis of gas injection in gas-condensate reservoirs // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – Vol. 212. – Art. 110189. – DOI: 10.1016/j.petrol.2022.110189.
9. Zhang L., Cheng S., Wu K. et al. A Full-Stage Productivity Equation for Constant-Volume Gas Reservoirs and Its Application // Processes. – 2024. – Vol. 12, No. 9. – Art. 1855. – DOI: 10.3390/pr12091855.
10. Zhang L., Xu H., Zhao K., Wang J., Jiang H. A Study on Effect Analysis and Process Parameter Optimization of Viscous Acid Acidification in a Porous Heterogeneous Carbonate Reservoir. Processes. 2024. Vol. 12. No. 7. Article 1443. DOI: 10.3390/pr12071443.

Статья поступила в редакцию: 18.08.2026

Статья принята к публикации: 25.08.2026

Статья опубликована: 28.09.2026

УДК 621.039.59

DOI: 10.32743/UniTech.2026.150.9.23342

**Математическое моделирование и многокритериальная оптимизация
кожухотрубного теплообменного аппарата с комбинированной
интенсификацией теплообмена**

Юсупов Рустам Атхамович

д-р филос. техн. наук (PhD), соискатель
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: kotlonadzor@scizs.uz

Исаматова Джамия Нигматуллаевна

д-р филос. техн. наук (PhD), начальник отдела контроля за качеством образования Филиала
Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина в городе
Ташкенте
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: jamilyechka@mail.ru

Исмаилов Ойбек Юлибаевич

д-р техн. наук
вед. науч. сотр., института общей и неорганической химии АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: ismoilovntmpi@mail.ru

Саттаров Зафар Муродович

канд. техн. наук, проф.
Ташкентский архитектурно-строительный университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Библиографическое описание: Математическое моделирование и многокритериальная оптимизация кожухотрубного теплообменного аппарата с комбинированной интенсификацией теплообмена // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Юсупов Р.А. [и др.]. 2026. 9(150). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23342>

Mathematical modeling and multi-criteria optimization of a shell-and-tube heat exchanger with combined heat transfer intensification

Yusupov Rustam

*doctor of Philosophy of Engineering Sciences (PhD)
Applicant at the Tashkent Institute of Chemical Technology
Uzbekistan, Tashkent*

Isamatova Djamila

*doctor of Philosophy of Technical Sciences (PhD)
Head of the Department of Quality Control of Education at Gubkin Russian State University of Oil
and Gas (SRU) in Tashkent
Uzbekistan, Tashkent*

Ismailov Oybek

*doctor of Technical Sciences, Senior Researcher
at the Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of the
Republic of Uzbekistan; Uzbekistan, Tashkent*

Sattorov Zafar

*candidate of Technical Sciences, Professor
Tashkent University of Architecture and Civil Engineering
Uzbekistan, Tashkent*

Аннотация

В работе разработан и исследован физико-статистический подход к математическому моделированию и многокритериальной оптимизации кожухотрубного теплообменного аппарата при комбинированной интенсификации теплообмена. Рассмотрены четыре конструктивных режима: традиционный, со стержнем во внутренней трубе, с тангенциальной подачей горячего потока и стержнево-тангенциальный. Модель построена на уравнениях сохранения массы и энергии, критериальных зависимостях для определения коэффициентов теплоотдачи и эмпирических коэффициентах интенсификации. Экспериментальная база сформирована для нефти и газового конденсата в диапазонах расходов холодного потока 5–25 л/мин и горячего потока 10–40 л/мин; суммарно использовано 160 наблюдений. Для каждой среды и каждого конструктивного режима получены регрессионные модели второго порядка. Коэффициент детерминации для нефти составил 0,9693–0,9904, для газового конденсата — 0,9719–0,9923; RMSE находился соответственно в пределах 0,529–0,826 и 0,396–0,793 °C. Наиболее высокая температура выхода достигнута для стержнево-тангенциальной конструкции. При этом многокритериальный анализ показал, что максимум интегрального критерия может соответствовать стержневой конструкции. Практическая значимость состоит в возможности выбора рационального режима эксплуатации по совокупности тепловых и гидравлических показателей в пределах экспериментально подтвержденного диапазона.

Abstract

A physical-statistical approach to mathematical modeling and multi-criteria optimization of a shell-and-tube heat exchanger with combined heat transfer enhancement is developed and investigated. Four configurations are considered: conventional, rod-insert, tangential-flow, and combined rod-tangential configurations. The model is based on mass and energy conservation equations, heat-transfer correlations, and empirical enhancement coefficients. The experimental

database covers crude oil and gas condensate at cold-flow rates of 5–25 L/min and hot-flow rates of 10–40 L/min; 160 observations were used in total. Second-order regression models were obtained for each working medium and configuration. The coefficient of determination ranged from 0.9693 to 0.9904 for oil and from 0.9719 to 0.9923 for gas condensate; RMSE values were 0.529–0.826 and 0.396–0.793 °C, respectively. The highest outlet temperature was obtained for the combined rod-tangential configuration. At the same time, the multi-criteria analysis showed that the maximum integral criterion may correspond to the rod configuration. The practical significance is the possibility of selecting a rational operating regime using both thermal and hydraulic performance indicators within the experimentally validated range.

Ключевые слова: кожухотрубный теплообменник, математическое моделирование, интенсификация теплообмена, стержневая вставка, тангенциальный поток, регрессионная модель, многокритериальная оптимизация.

Keywords: shell-and-tube heat exchanger, mathematical modeling, heat transfer enhancement, rod insert, tangential flow, regression model, multi-criteria optimization.

Введение

Кожухотрубные теплообменные аппараты являются одним из основных типов оборудования для нагрева и охлаждения технологических потоков в нефтегазовой и химической промышленности. Их эффективность определяется не только площадью теплообменной поверхности, но и режимом движения рабочих сред, физическими свойствами углеводородов, гидравлическим сопротивлением и конструктивной организацией потоков [1, 2, 5].

Одним из наиболее результативных направлений повышения интенсивности теплообмена является изменение структуры потока с помощью внутренних вставок, закручивающих элементов, профилированных поверхностей и тангенциальной подачи теплоносителя [3, 4, 7, 8]. Такие решения позволяют разрушать пограничный слой и увеличивать коэффициент теплоотдачи, однако одновременно могут повышать перепад давления и мощность насосного оборудования. Поэтому выбор режима должен рассматриваться как многокритериальная задача.

Для углеводородных сред проблема особенно актуальна вследствие изменения вязкости и теплофизических свойств с температурой. Экспериментальные исследования с нефтью и газовым конденсатом показывают, что применение стержневых вставок способно существенно изменить гидродинамику и интенсивность теплообмена [10, 6]. Современные исследования также развивают методы численного и статистического моделирования теплообменников и оптимизации их конструкций [11–14].

В представленной работе развивается подход, основанный на объединении распределенной физико-математической модели, экспериментально-статистической регрессии и многокритериальной оптимизации. Такой подход соответствует структуре исследования, представленного в основном документе: модель строится по экспериментальным данным, а затем используется для выбора рациональных расходов и конструктивного режима [6, 9].

Цель исследования — разработать расчетно-статистическую модель кожухотрубного теплообменного аппарата с комбинированной интенсификацией теплообмена и определить рациональные режимы его работы по совокупности тепловых и гидравлических критериев.

Для достижения цели решены следующие задачи: сформирована физико-математическая модель; определены геометрические и гидравлические параметры стержневой конструкции; получены регрессионные модели температуры выхода; проведена оценка их адекватности; исследовано влияние расходов; выполнена многокритериальная оптимизация в экспериментально подтвержденном диапазоне.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в разработке физико-статистического подхода к математическому моделированию кожухотрубного теплообменного аппарата с учётом четырёх конструктивных режимов интенсификации теплообмена: традиционного, стержневого, тангенциального и стержнево-тангенциального. На основе экспериментальных данных для нефти и газового конденсата получены квадратичные регрессионные модели температуры выхода в диапазонах расходов холодного потока 5–25 л/мин и горячего потока 10–40 л/мин. Установлена высокая адекватность моделей: R^2 составляет 0,9693–0,9904 для нефти и 0,9719–0,9923 для газового конденсата при RMSE 0,529–0,826 и 0,396–0,793 °C соответственно. Показано, что стержнево-тангенциальная конструкция обеспечивает наибольшую расчётную температуру выхода — 53,08 °C для нефти и 57,01 °C для газового конденсата, тогда как максимальные значения интегрального критерия многокритериальной оптимизации достигаются для стержневой конструкции. Таким образом, установлена зависимость выбора рационального режима от совокупности тепловых и гидравлических критериев, что позволяет определять оптимальные режимы эксплуатации в пределах экспериментально подтверждённой области.

Материалы и методы

Объект и диапазон исследования

Объектом исследования является кожухотрубный теплообменный аппарат с семью внутренними трубами. Общая длина кожуха составляет 1,2 м, рабочая длина внутренних труб — 1,0 м, внутренний диаметр трубы — 0,02 м, диаметр стержня — 0,01 м. Холодный поток изменялся в диапазоне 5–25 л/мин, горячий — 10–40 л/мин. Рассматривались четыре режима: традиционный ($P=0$), стержневой ($P=1$), тангенциальный ($P=2$) и стержнево-тангенциальный ($P=3$). Эти диапазоны и геометрические характеристики непосредственно приведены в основном документе [9].

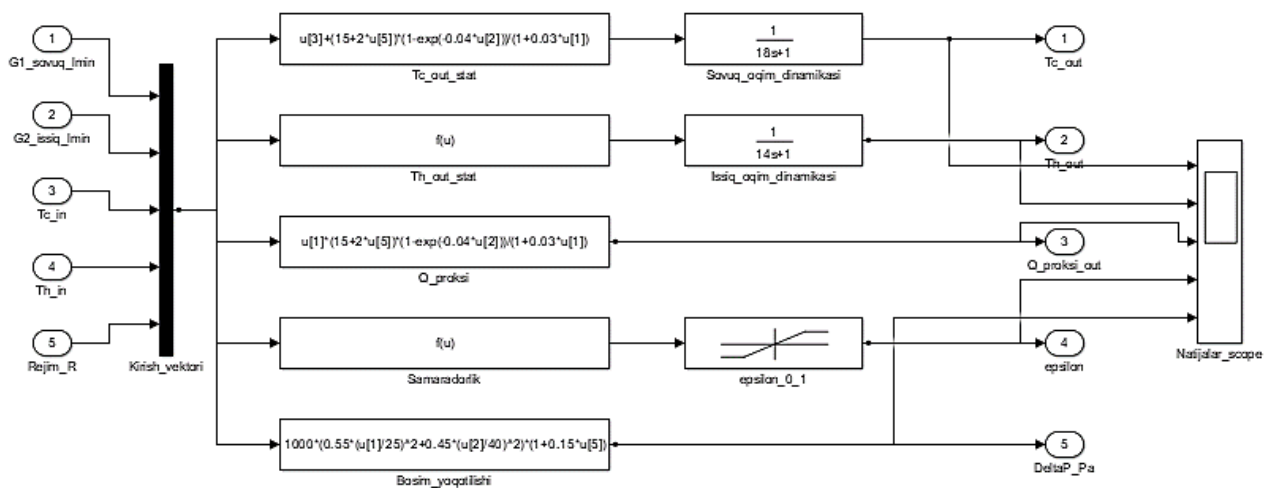


Рисунок 1. Регрессионная MATLAB/Simulink-модель кожухотрубного теплообменного аппарата

Для оценки динамических характеристик упрощённой модели расчёт выполнялся в течение 120 с при номинальной рабочей точке $G_1 = 15 \frac{l}{min}$, $G_2 = 25 \frac{l}{min}$, $T_{c, in} = 20^\circ C$, $T_{h, in} = 80^\circ C$, и в стержнево-тангенциальном режиме $P = 3$. Каналы холодного и горячего потоков соответственно представлялись звеньями первого порядка с постоянными времени 18 с и 14 с. До подтверждения этих постоянных времени экспериментальной идентификацией они рассматриваются как предварительно настроенные параметры модели.

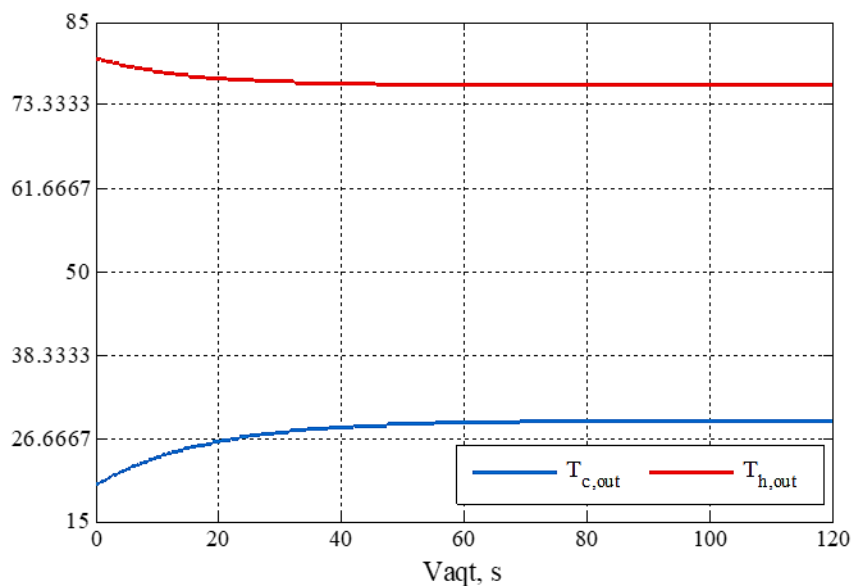


Рисунок 2. Динамика температур выходящих потоков холодного и горячего теплоносителей в номинальном режиме

Результаты и обсуждение

Регрессионные модели для нефти и газового конденсата

Таблица 1.

Показатели адекватности моделей для нефти

Режим	Модель температуры выхода нефти	R_2	RMSE, °C	MARE%
Традиционная	$45.7750 - 0.54140G_1 + 0.3740G_2 + 0.00071G_1^2 - 0.00020G_1 G_2 - 0.00250G_2^2$	0,9693	0,823	1,41
Стержневая	$52.9750 - 0.5343G_1 + 0.3490G_2 + 0.00786G_1^2 + 0.00420G_1 G_2 - 0.00400G_2^2$	0,9763	0,826	1,49
Тангенциальная	$48.5500 - 0.5543G_1 + 0.4370G_2 + 0.00286G_1^2 + 0.00120G_1 G_2 - 0.00450G_2^2$	0,9806	0,710	1,24
Стержнево-тангенциальная	$56.2500 - 0.57140G_1 + 0.2680G_2 + 0.00429G_1^2 + 0.00200G_1 G_2 - 0.00100G_2^2$	0,9904	0,529	0,81

Для всех моделей нефти значение R^2 находилось в диапазоне 0,9693–0,9904, а RMSE — в диапазоне 0,529–0,826 °C. Полученные результаты показывают, что нелинейная зависимость между расходами потоков и температурой на выходе с достаточной точностью описывается моделью второго порядка.

Для газового конденсата значение R^2 находилось в диапазоне 0,9719–0,9923, а RMSE — в диапазоне 0,396–0,793 °C. В традиционном и тангенциальном режимах соответствие экспериментальным данным особенно высокое: значение R^2 превышает 0,99.

Таблица 2.

Показатели адекватности моделей для газового конденсата

Режим	Модель температуры выхода газового конденсата	R_2	RMSE, °C	MARE%
Традиционная	$51.1500 - 0.7143G_1 + 0.3380G_2 + 0.00714G_1^2 - 0.00120G_1 G_2 - 0.00200G_2^2$	0,9923	0,396	0,66
Стержневая	$53.2750 - 0.4371G_1 + 0.6180G_2 + 0.00643G_1^2 + 0.00180G_1 G_2 - 0.00950G_2^2$	0,9719	0,793	1,20
Тангенциальная	$53.4000 - 0.7186G_1 + 0.4440G_2 + 0.00429G_1^2 + 0.00040G_1 G_2 - 0.00500G_2^2$	0,9907	0,455	0,74
Стержнево-тангенциальная	$58.3750 - 0.4329G_1 + 0.3750G_2 + 0.00357G_1^2 + 0.00340G_1 G_2 - 0.00200G_2^2$	0,9844	0,642	0,90

Для нефти R^2 изменялся от 0,9693 до 0,9904, а RMSE — от 0,529 до 0,826 °C. Наилучшее согласование с экспериментом получено для стержнево-тангенциального режима. Для газового конденсата R^2 составил 0,9719–0,9923, а RMSE — 0,396–0,793 °C. Полученные показатели подтверждают пригодность квадратичной регрессии для интерполяционного описания экспериментальной области [9]

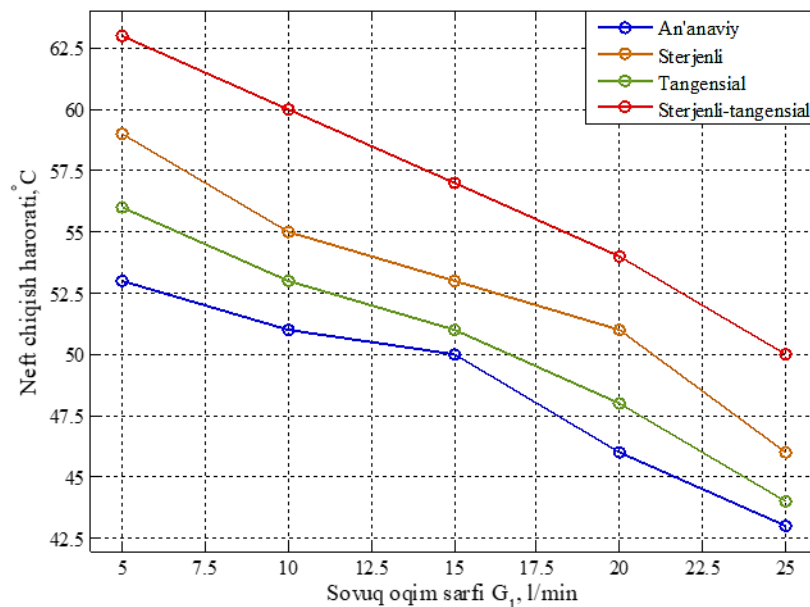


Рисунок 3. Влияние конструкции аппарата на температуру выхода нефти при $G_2 = 40$ л/мин

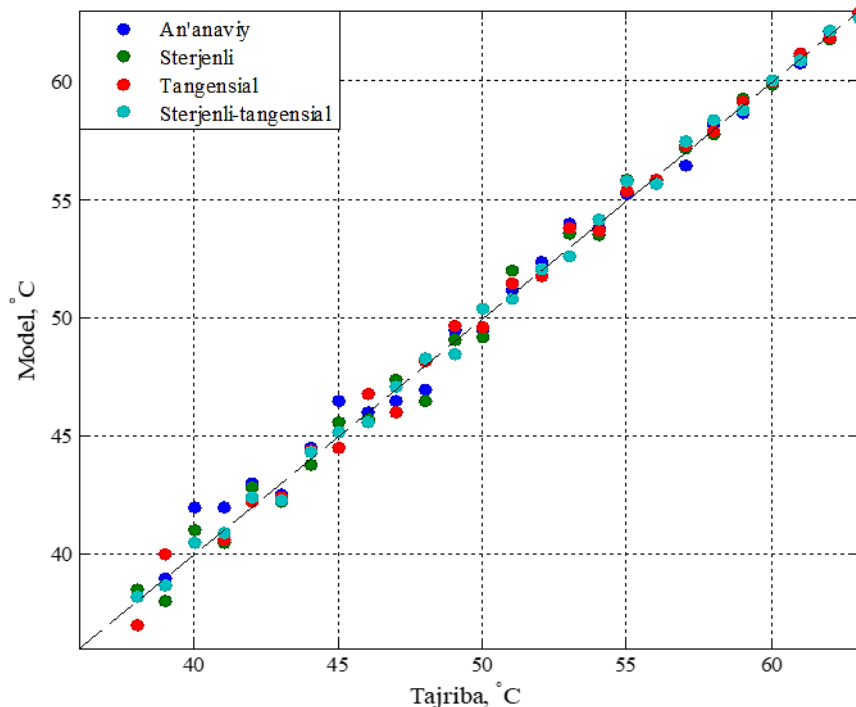


Рисунок 4. Сопоставление экспериментальных и модельных результатов для нефти

Влияние расходов и конструкции

На рисунке 3 видно, что при фиксированном расходе горячего потока $G_2 = 40$ л/мин температура выхода нефти снижается с увеличением G_1 . При $G_1 = 5$ л/мин наиболее высокая температура получена для стержнево-тангенциальной конструкции; по мере роста расхода различия между режимами сохраняются, но уменьшаются.

Физически это объясняется уменьшением времени пребывания нагреваемого потока при росте $G_1 G_2$. Одновременно увеличение повышает тепловую мощность горячего потока и способствует росту температуры выхода. Такой знак чувствительности подтвержден исходным анализом регрессионных моделей [6].

Поверхность отклика на рисунке 5 показывает нелинейную зависимость температуры выхода нефти от обоих расходов. В исследованной области увеличение G_2 повышает температуру, тогда как увеличение G_1 действует противоположно. Наличие квадратичных и перекрестных членов позволяет описать кривизну поверхности

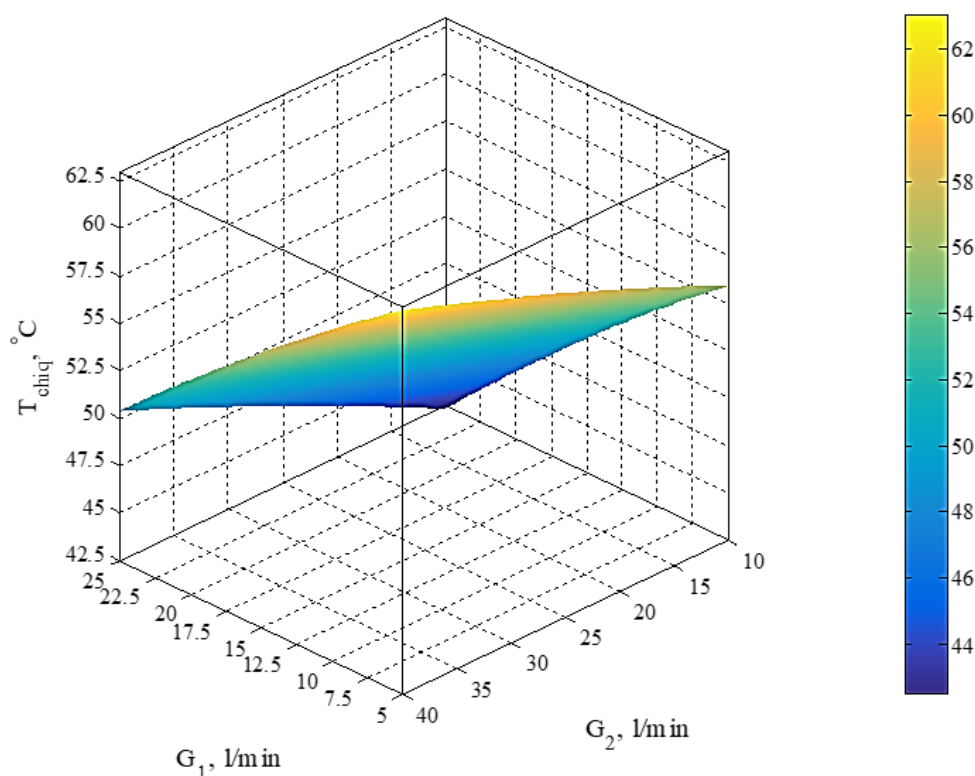


Рисунок 5. Поверхность отклика температуры выхода нефти для стержнево-тангенциального режима

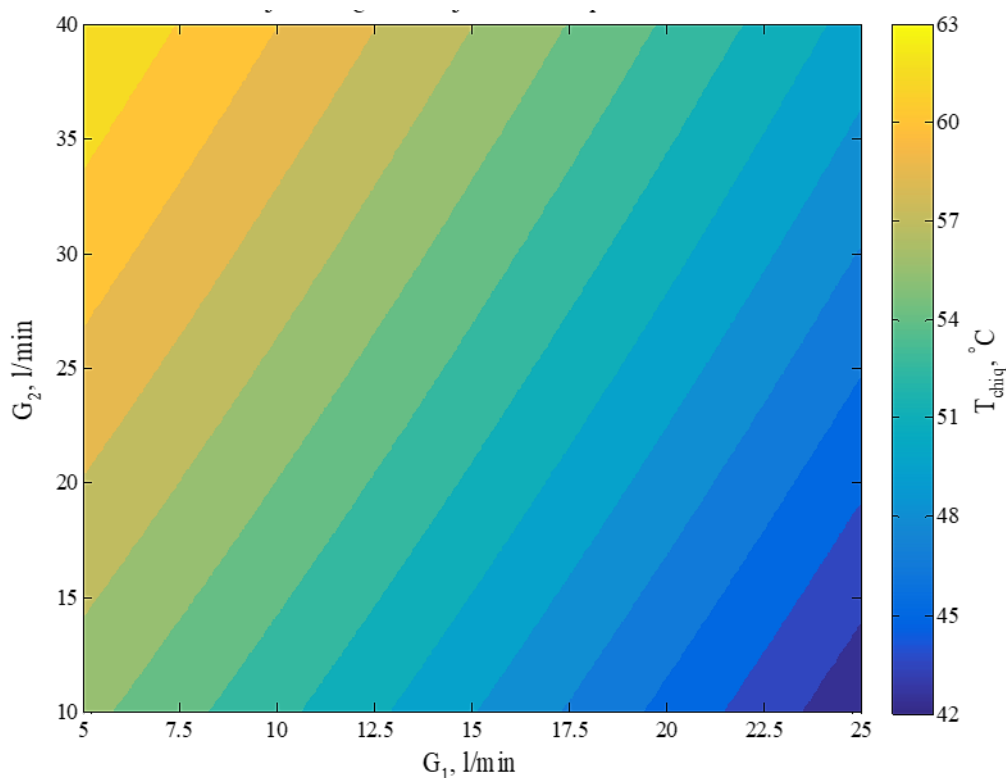


Рисунок 6. Контурная диаграмма температуры выхода нефти в зависимости от расходов G_1 и G_2

Проверка адекватности и пределы применимости

На рисунке 4 экспериментальные и расчетные значения расположены близко к линии идеального совпадения. Высокие значения R^2 и небольшие RMSE подтверждают точность аппроксимации в исследованном диапазоне. Вместе с тем высокая точность аппроксимации сама по себе не заменяет независимую валидацию на новых режимах. В исходном исследовании отмечена необходимость кросс-валидации и проверки модели за пределами использованных точек [9].

Следует также учитывать, что гидравлическая составляющая оптимизации на данном этапе представлена прокси-показателем. Полная экспериментальная валидация должна включать измерения перепада давления для каждого конструктивного режима. Это особенно важно, поскольку внутренние вставки увеличивают скорость и интенсивность теплообмена одновременно с ростом сопротивления.

Многокритериальная оптимизация

Таблица 3.

Расчетные рациональные режимы по данным исходного исследования

Среда	Конструкция	G_1^* , л/м	G_2^* , л/м	$T_{чик}$, °C	Q прокси	P прокси	J max
Нефть	Традиционная	22,12	40,00	44,93	551,5	0,831	0,4797
Нефть	Стержневая	20,25	38,83	49,76	602,6	0,704	0,5012
Нефть	Тангенциальная	20,62	38,50	47,01	557,1	—	0,4878
Нефть	Стержнево-тангенциальная	21,12	40,00	53,08	698,7	—	0,4979

Среда	Конструкция	G_1^* , л/м	G_2^* , л/м	$T_{\text{чик}}$, °C	Q прокси	P прокси	J_{max}
Газовый конденсат	Традиционная	25,00	40,00	46,88	671,9	—	0,4568
Газовый конденсат	Стержневая	20,88	30,50	52,51	678,6	—	0,5048
Газовый конденсат	Тангенциальная	23,50	35,50	48,67	673,9	—	0,4614
Газовый конденсат	Стержнево-тангенциальная	20,50	40,00	57,01	758,8	—	0,4697

Для нефти максимальная температура выхода в таблице 3 относится к стержнево-тангенциальной конструкции и составляет 53,08 °C. Однако максимальное значение интегрального критерия $J = 0,5012$ получено для стержневой конструкции. Для газового конденсата стержнево-тангенциальный режим дает максимальную температуру выхода 57,01 °C, тогда как максимальный $J = 0,5048$ относится к стержневой конструкции [9]. Это принципиально важный результат: режим, обеспечивающий максимальную температуру, не обязательно является оптимальным по совокупности критериев

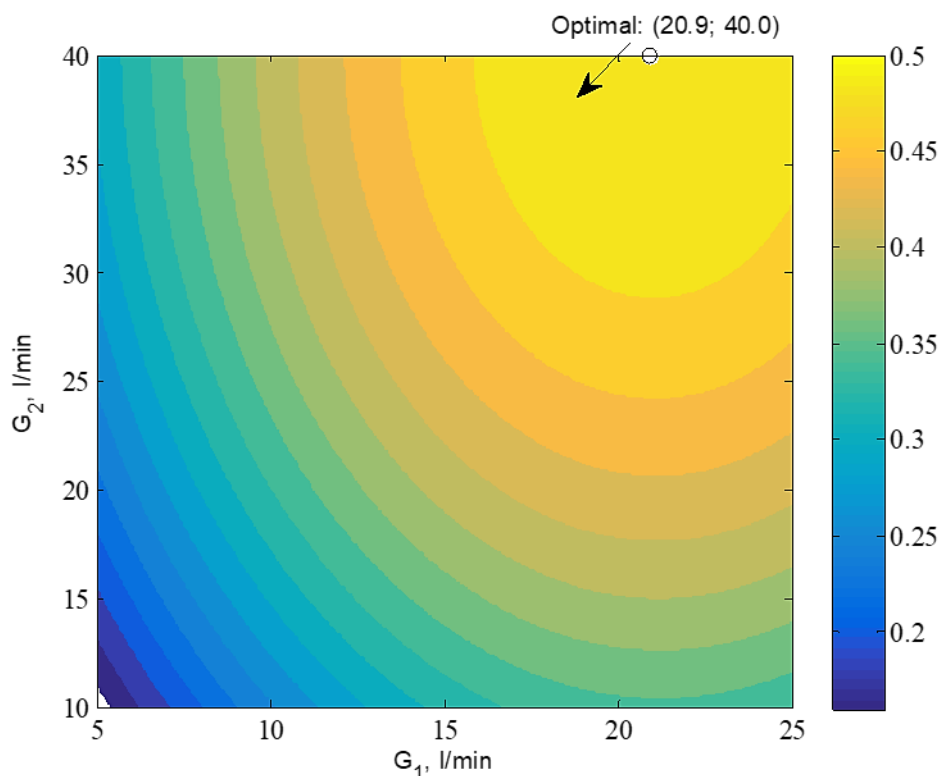


Рисунок 7. Контурная диаграмма интегрального критерия оптимизации для стержнево-тангенциального режима

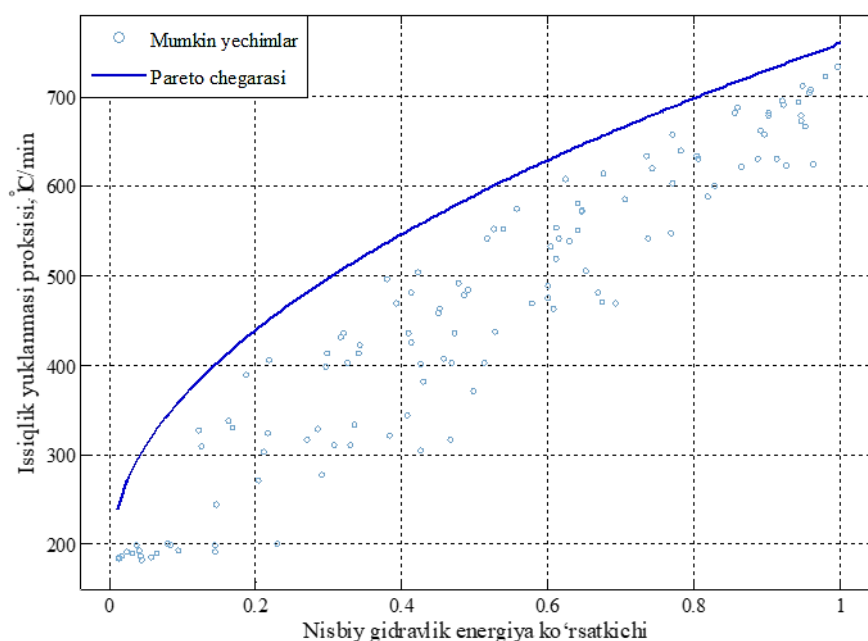


Рисунок 8. Парето-граница между тепловой нагрузкой и относительной гидравлической энергией

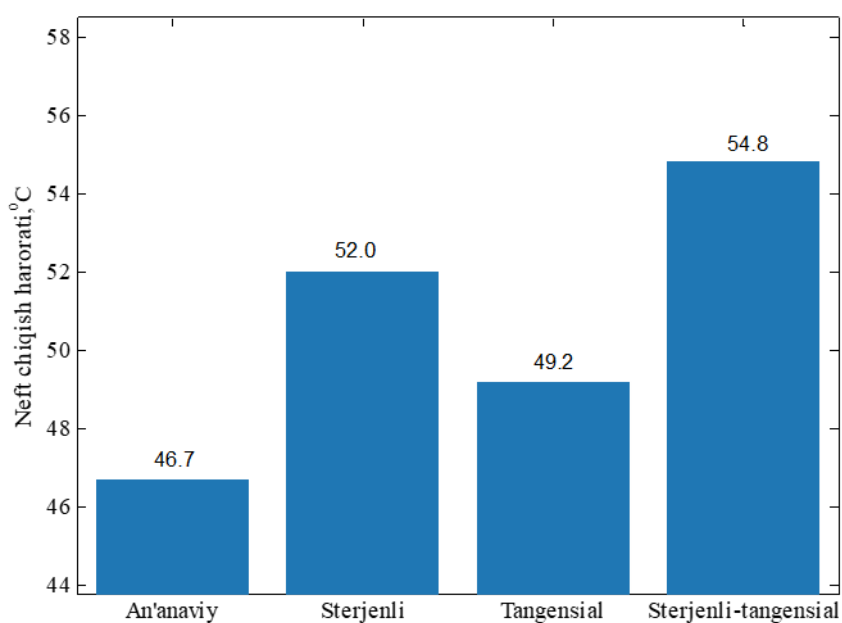


Рисунок 9. Сравнительная эффективность конструктивных режимов в оптимальной точке

Контур интегрального критерия показывает наличие области предпочтительных режимов, а Парето-граница демонстрирует компромисс между ростом тепловой нагрузки и увеличением относительной гидравлической энергии. Таким образом, оптимальный режим следует выбирать не по одному показателю, а с учетом технологического назначения аппарата и допустимого энергетического бюджета.

Заключение

1. Разработан физико-статистический подход к моделированию кожухотрубного теплообменного аппарата с четырьмя конструктивными режимами, включая стержневую, тангенциальную и комбинированную интенсификацию.

2. В качестве управляемых факторов использованы расходы холодного и горячего потоков в диапазонах 5–25 и 10–40 л/мин соответственно. Экспериментальная база составила 160 наблюдений.

3. Для каждой среды и конструктивного режима получены квадратичные регрессионные модели. Для нефти $R^2 = 0,9693$ – $0,9904$, для газового конденсата $R^2 = 0,9719$ – $0,9923$. Наименьшие значения RMSE составили 0,529 и 0,396 °C соответственно.

4. Стержнево-тангенциальная конструкция обеспечила наибольшие расчетные температуры выхода — 53,08 °C для нефти и 57,01 °C для газового конденсата. При этом максимальный интегральный критерий получен для стержневой конструкции, что подтверждает необходимость многокритериальной оптимизации.

5. Полученные зависимости применимы только в пределах экспериментально исследованных диапазонов. Для промышленного использования требуется независимая валидация, прежде всего по перепаду давления, насосной мощности и устойчивости оптимального режима.

6. Практическая ценность разработанного подхода состоит в возможности предварительного выбора рациональных расходов и конструктивного режима до проведения расширенной серии испытаний.

Список литературы

1. Чэнгель Ю.А., Гаджар А.Дж. Çengel Y.A., Ghajar A.J. Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications. 6th ed. – New York: McGraw-Hill Education, 2020. – 1018 P.
2. Bergman T.L., Lavine A.S., Incropera F.P. DeWitt D.P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 8th ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2017. – 992 P.
3. Chang S.W., Yang T.L., Liou J.S. Heat transfer and pressure drop in tubes fitted with compound enhancement elements // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2007.
4. Gnielinski V. New Equations for Heat and Mass Transfer in Turbulent Pipe and Channel Flow // International Chemical Engineering. – 1976.
5. Green D.W., Southard M.Z. eds. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 9th ed. – New York: McGraw-Hill Education, 2019. – 2272 P.
6. Ismailov O., Auesbaev A., Yusupov R., Abdurakhmonov I., Baltabaeva M. Experimental investigation of heat transfer enhancement in a double-pipe heat exchanger using solid rod inserts with crude oil and gas condensate. Discover Mechanical Engineering. 2025. Vol. 4. Article 64. DOI: 10.1007/s44245-025-00150-2.
7. Kakac S., Liu H., Pramuanjaroenkij A. Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design. 4th ed. – Boca Raton: CRC Press, 2020. – 528 P.
8. Kays W.M., London A.L. Compact Heat Exchangers. 3rd ed. – New York: McGraw-Hill, 1984. – 335 P.

9. Khurmamatov A., Ismailov O., Yusupov R., Isamatova J., Aminova G. Study of hydrodynamics of the condensation process in heat exchanger devices. E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 497. Article 01022. 11 P. DOI: 10.1051/e3sconf/202449701022.
10. Moon H., Boyina K., Miljkovic N., King W.P. Heat Transfer Enhancement of Single-Phase Internal Flows using Shape Optimization and Additively Manufactured Flow Structures. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. Vol. 177. Article 121510. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121510.
11. Obaid A.J., Hameed V.M. An experimental and numerical comparison study on a heat sink thermal performance with new fin configuration under mixed convective conditions // South African Journal of Chemical Engineering. – 2023. – DOI: 10.1016/j.sajce.2023.01.009.
12. Patankar S.V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. – New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980. – 197 P.
13. Shah R.K. Sekulić D.P. Fundamentals of Heat Exchanger Design. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2003. – 941 P.
14. Speight J.G. Handbook of Petroleum Processing. 2nd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2023. – 415 P.

References

1. Cengel Y.A., Ghajar A.J. Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications. 6th ed. – New York: McGraw-Hill Education, 2020. – 1018 P.
2. Bergman T.L., Lavine A.S., Incropera F.P. DeWitt D.P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 8th ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2017. – 992 P.
3. Chang S.W., Yang T.L., Liou J.S. Heat transfer and pressure drop in tubes fitted with compound enhancement elements // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2007.
4. Gnielinski V. New Equations for Heat and Mass Transfer in Turbulent Pipe and Channel Flow // International Chemical Engineering. – 1976.
5. Green D.W., Southard M.Z. eds. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 9th ed. – New York: McGraw-Hill Education, 2019. – 2272 P.
6. Ismailov O., Auesbaev A., Yusupov R., Abdurakhmonov I., Baltabaeva M. Experimental investigation of heat transfer enhancement in a double-pipe heat exchanger using solid rod inserts with crude oil and gas condensate. Discover Mechanical Engineering. 2025. Vol. 4. Article 64. DOI: 10.1007/s44245-025-00150-2.
7. Kakac S., Liu H., Pramuanjaroenkij A. Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design. 4th ed. – Boca Raton: CRC Press, 2020. – 528 P.
8. Kays W.M., London A.L. Compact Heat Exchangers. 3rd ed. – New York: McGraw-Hill, 1984. – 335 P.
9. Khurmamatov A., Ismailov O., Yusupov R., Isamatova J., Aminova G. Study of hydrodynamics of the condensation process in heat exchanger devices. E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 497. Article 01022. 11 P. DOI: 10.1051/e3sconf/202449701022.

10. Moon H., Boyina K., Miljkovic N., King W.P. Heat Transfer Enhancement of Single-Phase Internal Flows using Shape Optimization and Additively Manufactured Flow Structures. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. Vol. 177. Article 121510. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121510.
11. Obaid A.J., Hameed V.M. An experimental and numerical comparison study on a heat sink thermal performance with new fin configuration under mixed convective conditions // South African Journal of Chemical Engineering. – 2023. – DOI: 10.1016/j.sajce.2023.01.009.
12. Patankar S.V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. – New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980. – 197 P.
13. Shah R.K., Sekulic D.P. Fundamentals of Heat Exchanger Design. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2003. – 941 P.
14. Speight J.G. Handbook of Petroleum Processing. 2nd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2023. – 415 P.

МЕТАЛЛУРГИЯ, МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ГОРНОЕ ДЕЛО

Статья поступила в редакцию: 12.09.2026

Статья принята к публикации: 20.09.2026

Статья опубликована: 28.09.2026

УДК 622.7+004.9+333.3

Инновационные технологии для выработки и переработки минералов в южных регионах Узбекистана

Боймуродов Нажмиддин Абдукодирович

доц. кафедры

Геология и горное дело, Каршинский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Карши

ORCID iD: 0009-0007-7820-7799

E-mail: najmiddinboy-94@mail.ru

Раббимов Жахонгир Шодмонкулович

доц. кафедры

Геология и горное дело, Каршинский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Карши

ORCID iD: 0009-0007-0967-9741

E-mail: rabbimov.jahongir1933@gmail.com

Innovative technologies for the extraction and processing of minerals in the southern regions of Uzbekistan

Boymurodov Najmiddin Abdukodirovich

Associate Professor of the Department of Geology and Mining

Karshi State Technical University

Uzbekistan, Karshi

Rabbimov Jakhongir Shodmonkulovich

Associate Professor of the Department of Geology and Mining

Karshi State Technical University

Uzbekistan, Karshi

Аннотация

В статье проанализированы перспективы применения современных инновационных технологий для эффективного освоения минерально-сырьевого потенциала южных регионов Узбекистана, прежде всего Кашкадарьинской и Сурхандарьинской областей. Цель исследования заключается в систематизации технологических решений, способных повысить эффективность поисков, добычи и переработки полезных ископаемых при одновременном снижении экологической нагрузки. На основе сравнительного анализа научных публикаций и

Библиографическое описание: Боймуродов Н.А., Раббимов Ж.Ш. Инновационные технологии для выработки и переработки минералов в южных регионах Узбекистана // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 9(150). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23435>

открытых отраслевых данных рассмотрены геоинформационные системы, 3D-моделирование, дистанционный мониторинг, автоматизация, технологии IoT и искусственного интеллекта. Особое внимание уделено биогидрометаллургическим методам, современным технологиям переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья. Рассмотрены перспективы освоения металлических, редких и стратегически важных видов минерального сырья, включая вольфрам, олово, ниобий, бериллий и литий. Показано, что сочетание цифровых методов геологоразведки, автоматизированного контроля, современных технологий добычи и экологически ориентированной переработки позволяет повысить полноту использования минеральных ресурсов, снизить производственные и экологические риски и сформировать более устойчивую модель развития горнодобывающей промышленности южных регионов Узбекистана. Полученные результаты могут быть использованы при выборе приоритетных направлений технологической модернизации горнодобывающих и перерабатывающих объектов.

Abstract

The article analyzes the prospects for applying modern innovative technologies to the efficient development of the mineral-resource potential of southern Uzbekistan, primarily the Kashkadarya and Surkhandarya regions. The study aims to systematize technological solutions capable of improving the efficiency of mineral exploration, extraction, and processing while reducing environmental impacts. Based on a comparative analysis of scientific publications and open industry data, the paper considers geographic information systems, 3D modeling, remote monitoring, automation, Internet of Things technologies, and artificial intelligence. Particular attention is paid to biohydrometallurgical methods and modern technologies for processing refractory ores and technogenic raw materials. The prospects for developing metallic, rare, and strategically important mineral resources, including tungsten, tin, niobium, beryllium, and lithium, are considered. The analysis shows that combining digital exploration methods, automated control, modern mining technologies, and environmentally oriented processing can improve the comprehensive utilization of mineral resources, reduce operational and environmental risks, and contribute to a more sustainable model for the development of the mining industry in southern Uzbekistan. The results can be used to identify priority areas for the technological modernization of mining and mineral-processing facilities.

Ключевые слова: южные регионы Узбекистана, Кашкадарья, Сурхандарья, минеральные ресурсы, инновационные технологии, ГИС, 3D-моделирование, автоматизация, искусственный интеллект, био-гидрометаллургия, флотация, полиметаллические руды, редкие и рассеянные элементы, устойчивое развитие.

Keywords: southern regions of Uzbekistan, Kashkadarya, Surkhandarya, mineral resources, innovative technologies, GIS, 3D modeling, automation, artificial intelligence, biohydrometallurgy, flotation, polymetallic ores, rare and dispersed elements, sustainable development.

Введение

Узбекистан обладает значительным и разнообразным минерально-сырьевым потенциалом. Важную роль в его структуре играют металлические и редкие виды минерального сырья, освоение которых имеет стратегическое значение для дальнейшего развития горнодобывающей и металлургической промышленности страны [10, 3]. Южные регионы Узбекистана, включая Кашкадарьинскую область, характеризуются наличием разнообразных минеральных ресурсов и перспективных объектов их освоения [1, 4]. Повышение эффективности освоения минерально-сырьевой базы требует более широкого внедрения цифровых технологий, автоматизации и интеллектуальных систем управления горными процессами [8, 7].



Рисунок 1. Узбекистан – страна богатая месторождениями

В связи с этим возникает необходимость внедрения инновационных методов, которые не только улучшат эффективность добычи и переработки, но и способствуют устойчивому экологическому и социально-экономическому развитию региона.

Актуальность темы. Современные вызовы, связанные с охраной окружающей среды, энергоэффективностью и ресурсосбережением, выдвигают новые требования к горнодобывающей отрасли. В условиях глобальных изменений климата и растущей потребности в устойчивом управлении природными ресурсами становится особенно важным переход к инновационным и экологически безопасным методам добычи и переработки. Развитие высоких технологий, включая цифровизацию, автоматизацию процессов и интеллектуальные системы управления, выступает одним из ключевых факторов повышения эффективности горнодобывающего производства [8, 7]. Одновременно возрастает значение экологически ориентированных технологий переработки минерального сырья, включая биогидрометаллургические методы и извлечение ценных компонентов из труднообогатимых руд и отходов [9]. Эти направления создают технологическую основу для более устойчивого развития горнодобывающей отрасли.

Цель исследования заключается в систематизации и сравнительной оценке современных цифровых, горнотехнических и перерабатывающих технологий, перспективных для повышения эффективности освоения минерально-сырьевой базы Кашкадарьинской и Сурхандарьинской областей с учетом технологических и экологических факторов.

Материалы и методы

Материалами исследования послужили опубликованные научные работы и открытые отраслевые данные, посвященные развитию минерально-сырьевой базы Узбекистана [1, 3, 4, 10, 6], цифровизации геологоразведки и горных процессов [8, 7, 11], а также современным технологиям переработки минерального сырья [9]. В работе применены обзорно-аналитический, сравнительный и системный методы. Технологические решения сгруппированы по основным этапам освоения месторождений: поиски и разведка, добыча, обогащение и гидрометаллургическая переработка, экологический мониторинг. Для Кашкадарьинской и Сурхандарьинской областей выполнено сопоставление возможностей ГИС и 3D-моделирования [11], дистанционного контроля, автоматизации, IoT и искусственного интеллекта [8, 7], а также флотационных и биогидрометаллургических технологий [9].

Сравнительная оценка технологических решений проводилась по следующим критериям: область применения, уровень цифровизации, потенциальное повышение эффективности извлечения полезных компонентов, экологическая направленность и применимость к геолого-технологическим условиям южных регионов Узбекистана. Полученные данные систематизированы по четырем основным направлениям: геологоразведка, добыча, переработка минерального сырья и экологический мониторинг.

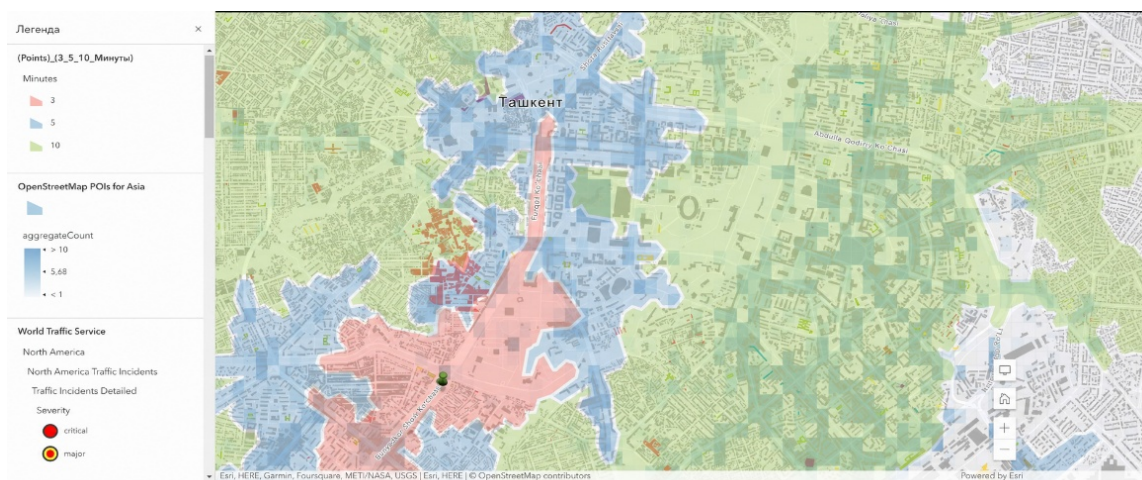


Рисунок 2. Доступные геоданные на Узбекистан: векторные карты, космоснимки, карты землепользования, цифровые модели местности и другие слои, которую можно использовать для ГИС анализа

Результаты и обсуждение

Основные направления инноваций

1. Геоинформационные системы (ГИС) Использование ГИС-технологий для построения 3D-моделей месторождений, оценки рентабельности разработки, мониторинга состояния карьеров и шахт [11].
2. Автоматизация и дистанционное управление Внедрение автономных буровых установок, роботизированных систем погрузки и транспортировки, дистанционное управление горной техникой [8, 7].
3. Энергоэффективные и экологически чистые методы переработки Применение биогидрометаллургии, флотационных методов нового поколения, переработка шламов и отходов с извлечением ценных компонентов [9].
4. Цифровизация процессов Использование датчиков, IoT, Big Data и искусственного интеллекта для оптимизации производственных процессов и прогнозирования техногенных рисков [8, 7].
5. Инновационные методы подземной добычи В южных регионах, где горные условия сложные, актуальны технологии подземной выработки с использованием буровзрывных и камерно-столбовых систем нового поколения.

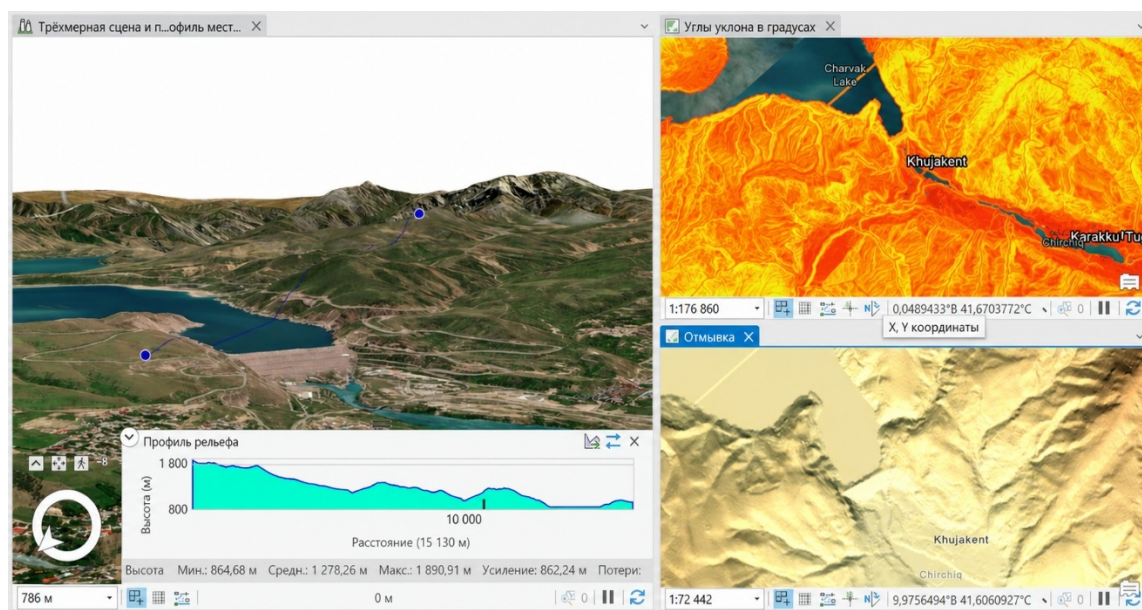


Рисунок 3. Цифровая модель местности с более высокой точностью

Примеры внедрения инноваций в южных регионах Узбекистана

1. Кашкадарьинская область. Кашкадарьинская область характеризуется разнообразной минерально-сырьевой базой и наличием перспективных объектов металлических полезных ископаемых [1, 4]. Для повышения эффективности их освоения перспективными направлениями являются применение цифровых методов геологоразведки и 3D-моделирования [11], автоматизированного и дистанционного контроля горных процессов [8, 7], а также современных биогидрометаллургических методов переработки труднообогатимых руд и отходов [9].

Для сурьмяных и комплексных руд региона перспективным является сочетание современных методов геологоразведки, селективной разработки и последующей переработки минерального сырья. Использование цифрового моделирования позволяет повысить точность интерпретации геологического строения и морфологии рудных тел [11], тогда как биогидрометаллургические подходы могут рассматриваться как одно из перспективных направлений переработки сложных и труднообогатимых руд [9].

Важным направлением дальнейшего развития является также внедрение автоматизированных систем мониторинга и дистанционного контроля горных процессов, способствующих повышению технологической управляемости и снижению производственных рисков [8, 7].

Таблица 1.

**Перспективные направления технологического развития минерально-сырьевой базы
Кашкадарьинской области**

Направление	Перспективные технологии	Ожидаемый эффект
Геологоразведка	ГИС, дистанционное зондирование, 3D-моделирование [10]	Повышение точности интерпретации геологического строения и выделения перспективных участков
Добыча	Автоматизированный и дистанционный контроль горных процессов [2, 5]	Повышение управляемости и снижение производственных рисков
Переработка труднообогатимых руд	Биогидрометаллургические методы [4]	Повышение полноты извлечения ценных компонентов
Переработка техногенного сырья	Современные методы обогащения и комплексной переработки [4]	Снижение потерь полезных компонентов и вовлечение вторичных ресурсов
Цифровой мониторинг	IoT, интеллектуальные системы контроля и анализа данных [2, 5]	Оперативный мониторинг технологических процессов и повышение эффективности управления

Комплексное применение цифровых, автоматизированных и биогидрометаллургических технологий может повысить эффективность освоения минерально-сырьевой базы Кашкадарьинской области и снизить производственные и экологические риски.

2. Сурхандарьинская область. Сурхандарьинская область характеризуется сложным геологическим строением и перспективами освоения полиметаллического минерального сырья. Для повышения эффективности геологоразведочных и горных работ перспективными направлениями являются применение ГИС, дистанционного зондирования и цифрового моделирования [11], автоматизированных систем управления и мониторинга [8, 7], а также современных методов переработки комплексных и низкосортных руд [9].

В условиях сложного рельефа и удалённости отдельных объектов особый интерес представляет использование мобильных и модульных технологических решений, позволяющих повысить гибкость организации переработки минерального сырья. Перспективным направлением также является применение биогидрометаллургических методов при переработке сложных и труднообогатимых руд [9].

Таблица 2.

**Перспективные технологии для освоения минерально-сырьевой базы
Сурхандарьинской области**

Технология	Потенциальное применение	Ожидаемый эффект
ГИС, дистанционное зондирование и цифровое моделирование [10]	Геологоразведка и уточнение строения перспективных участков	Повышение точности интерпретации геологических данных
Автоматизированные системы мониторинга и управления [2, 5]	Контроль горных и технологических процессов	Повышение оперативности управления и снижение производственных рисков
Мобильные и модульные технологические решения	Организация переработки сырья в удалённых и сложных по условиям освоения районах	Снижение транспортной нагрузки и повышение гибкости производства
Биогидрометаллургические методы [4]	Переработка сложных и труднообогатимых руд	Повышение полноты извлечения полезных компонентов
Цифровые системы анализа данных [2, 5]	Прогнозирование и оптимизация производственных процессов	Повышение эффективности принятия технологических решений

Для перспективных полиметаллических объектов Сурхандарьинской области особое значение имеет сочетание современных методов геологоразведки, цифрового моделирования, автоматизированного мониторинга и технологий переработки сложного минерального сырья. Применение таких решений может повысить качество геолого-технологической оценки объектов, снизить производственные риски и повысить эффективность последующего освоения минеральных ресурсов [8, 9, 7, 11].

Таблица 3.

Приоритетные направления технологического развития горных и перерабатывающих процессов в Сурхандарьинской области

Направление	Технологические решения	Ожидаемый результат
Геологоразведка	ГИС, дистанционное зондирование, цифровое и 3D-моделирование [10]	Уточнение геологического строения и повышение достоверности оценки перспективных участков
Управление горными работами	Автоматизированные системы мониторинга, дистанционный контроль, интеллектуальные системы управления [2, 5]	Повышение управляемости процессов и снижение производственных рисков
Переработка комплексных руд	Современные методы обогащения и биогидрометаллургические технологии [4]	Повышение полноты извлечения ценных компонентов
Переработка сырья в удалённых районах	Мобильные и модульные технологические решения	Снижение транспортной нагрузки и повышение гибкости организации производства
Анализ и прогнозирование	IoT, Big Data, искусственный интеллект [2, 5]	Оптимизация технологических параметров, прогнозирование рисков и повышение эффективности принятия решений

Одним из перспективных направлений дальнейшего развития является интеграция технологий искусственного интеллекта и цифрового мониторинга в управление горными и перерабатывающими процессами. Такие решения могут использоваться для моделирования производственных сценариев, прогнозирования технологических рисков и повышения эффективности управления минерально-сырьевыми объектами [8, 7].

3. Редкие и стратегически важные элементы южных регионов Узбекистана. Южно-Узбекистанский горнорудный район характеризуется наличием и перспективами выявления ряда редких и стратегически важных компонентов. В пределах Кашкадарьинской и Сурхандарьинской областей особый интерес представляют вольфрам, олово, ниобий, бериллий, литий и другие металлы, имеющие важное значение для современной металлургии, энергетики и высокотехнологичных производств [10, 1].

Вольфрам относится к числу стратегически значимых металлов минерально-сырьевой базы Узбекистана. Его комплексное освоение требует совершенствования методов геологоразведки, оценки качества рудного сырья и технологий последующей переработки. Перспективным направлением является использование цифровых геологоразведочных методов и современных аналитических подходов при оценке потенциальных вольфрамоносных участков [10, 11, 6].

Олово представляет интерес как компонент комплексных редкометалльных руд. Его перспективность связана прежде всего с необходимостью комплексного изучения минерального состава сырья и определения технологически рациональных методов извлечения сопутствующих полезных компонентов.

Ниобий и бериллий относятся к редким металлам, востребованным в производстве специальных сплавов и других высокотехнологичных материалов. При оценке перспектив их освоения важное значение имеют детальное геологическое изучение, выявление форм нахождения полезных компонентов и определение возможности комплексной переработки рудного сырья.

Литий является одним из наиболее востребованных стратегических элементов современной мировой промышленности. Перспективы его освоения требуют проведения дальнейших геолого-геохимических исследований, оценки минеральных форм нахождения лития и определения рациональных методов его извлечения из соответствующих типов минерального сырья.

Для изучения перспективных редкометалльных объектов особое значение приобретает интеграция геологических, геохимических и пространственных данных. Использование ГИС, дистанционного зондирования и цифрового моделирования позволяет систематизировать большие массивы геологоразведочной информации, выделять перспективные участки и повышать обоснованность последующих поисково-оценочных работ [11].

Таким образом, развитие редкометалльной сырьевой базы южных регионов Узбекистана целесообразно осуществлять на основе комплексного подхода, сочетающего современные методы геологоразведки, цифровой анализ данных, минералого-технологические исследования и оценку возможностей комплексного извлечения ценных компонентов [10, 1, 11, 6].

Таблица 4.

Перспективные редкие и стратегически важные элементы и направления их изучения

Элемент	Значение и перспективность	Основные направления дальнейшего изучения
Вольфрам (W)	Стратегически важный металл, представляющий значительный интерес для минерально-сырьевой базы Узбекистана	Геологоразведка, минералого-технологическое изучение, совершенствование методов переработки и комплексного извлечения
Олово (Sn)	Перспективный компонент комплексных редкометалльных руд	Изучение минеральных форм, оценка технологических свойств сырья и возможности комплексной переработки
Ниобий (Nb)	Востребован при производстве специальных и высокопрочных сплавов	Геолого-геохимическое изучение, оценка содержания и форм нахождения в комплексных рудах
Бериллий (Be)	Используется в высокотехнологичных материалах и специальных сплавах	Выявление перспективных участков, минералогическое изучение и оценка возможностей извлечения
Литий (Li)	Стратегический металл, значение которого возрастает в современной энергетике и высокотехнологичных производствах	Геолого-геохимические исследования, определение минеральных форм и выбор рациональных технологий извлечения

Заключение

Применение инновационных технологий в горнодобывающей промышленности южных регионов Узбекистана обладает значительным потенциалом для повышения эффективности освоения минерально-сырьевой базы. Проведённый анализ показывает, что наиболее перспективными направлениями являются внедрение геоинформационных систем и 3D-моделирования, автоматизация и дистанционный контроль горных процессов, применение технологий искусственного интеллекта, а также развитие современных биогидрометаллургических методов переработки минерального сырья.

Комплексное использование цифровых и экологически ориентированных технологий позволяет повысить полноту использования минеральных ресурсов, снизить производственные и экологические риски и улучшить качество технологического управления. Для Кашкадарьинской и Сурхандарьинской областей особое значение имеет сочетание цифровых методов геологоразведки, современных технологий добычи и переработки с системами экологического мониторинга. Интеграция этих решений может стать одним из ключевых факторов устойчивого развития горнодобывающей промышленности южных регионов Узбекистана.

Список литературы

1. Министерство горнодобывающей промышленности и геологии Республики Узбекистан. Минеральные и сырьевые ресурсы Кашкадарьинской области по состоянию на 01.06.2024 [Электронный ресурс]. URL: <https://gov.uz/en/mingeo/pages/foydali-qazilmalarning-davlat-balansi> (дата обращения: 11.09.2026).
2. Пирматов Э.А., Шодиев А.Н.У., Боймуродов Н.А. Изучение растворимых форм вольфрама и условий кристаллизации шеелита и вольфрамитов // Universum: технические науки. – 2023. – № 11–2 (116). – С. 15–19.

3. Сафиров Е. Горнодобывающая промышленность Узбекистана // U.S. Geological Survey Minerals Yearbook. – 2023.
4. Султонов Ш.А., Навотова Д.И., Алиева Д.И. Географо-экономические особенности использования минеральных ресурсов Кашкадарьинской области // Science and Education in the Modern World: Challenges of the XXI Century. Нур-Султан, Казахстан. – 2020. – С. 12–15.
5. Фаизуллаев М.А., Нурматов А.У., Хужакулов С.У. Экономико-географические характеристики развития промышленных сетей Кашкадарьинской области // Proceedings of International Conference on Modern Science and Scientific Studies. Париж, Франция. – 2023. – С. 125–134.
6. Хужакулов А.М., Боймуродов Н.А. О базе вольфрамового минерального сырья Узбекистана и её основных проблемах // Цифровые технологии в промышленности. – 2024. – Т. 2. – С. 40–45.
7. Янг А., Роджерс У.П. Обзор цифровой трансформации в горнодобывающей промышленности // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2019. – Т. 36. – С. 683–699. – DOI: 10.1007/s42461-019-00103-w.
8. Ali D., Frimpong S. Artificial intelligence, machine learning and process automation: Existing knowledge frontier and way forward for mining sector // Artificial Intelligence Review. – 2020. – Т. 53. – P. 6025–6042. – DOI: 10.1007/s10462-020-09841-6.
9. Johnson D.B. Biomining–Biotechnologies for extracting and recovering metals from ores and waste materials // Current Opinion in Biotechnology. – 2014. – Т. 30. – P. 24–31. – DOI: 10.1016/j.copbio.2014.04.008.
10. Safirova E., Golovko Y., Dulabova N. Analysis of the potential effects of Uzbekistan’s mineral endowment on the critical mineral supply of tungsten. Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2025. Open-File Report 2025–1032. 14 P. DOI: 10.3133/ofr20251032.
11. Tagwai M.G., Jimoh O.A., Shehu S.A., Zabidi H. Application of GIS and remote sensing in mineral exploration: Current and future perspectives // World Journal of Engineering. – 2024. – Т. 21, № 3. – P. 487–502. – DOI: 10.1108/WJE-09-2022-0395.

References

1. Ministry of Mining Industry and Geology of the Republic of Uzbekistan. Mineral and Raw Material Resources of the Kashkadarya Region according to the State Balance of Mineral Reserves of the Republic of Uzbekistan (as of 01.06.2024) [Electronic resource]. – URL: <https://gov.uz/en/mingeo/pages/foydali-qazilmalarning-davlat-balansi> (дата обращения: 11.09.2026).
2. Pirmatov E.A., Shodiev A.N.U., Boymurodov N.A. Izuchenie rastvorimykh form volframa i usloviy kristallizatsii sheelita i volframita [Study of soluble forms of tungsten and conditions for crystallization of scheelite and wolframite]. Universum: Technical Sciences. – 2023. – No. 11–2 (116). – P. 15–19. (In Russ.)
3. Safirova E. The mineral industry of Uzbekistan // U.S. Geological Survey Minerals Yearbook. – 2023.

4. Sultonov Sh.A., Navotova D.I., Aliyeva D.I. Qashqadaryo viloyati mineral resurslari va ulardan foydalanishning geografik xususiyatlari [Mineral resources of the Kashkadarya region and geographical features of their use] // Science and Education in the Modern World: Challenges of the XXI Century. – 2020. – P. 12–15.
5. Faizullaev M.A., Nurmatov A.U., Khujakulov S.U. Economic geographical characteristics of the development of industrial networks of Kashadarya region // Proceedings of International Conference on Modern Science and Scientific Studies. – 2023. – P. 125–134.
6. Xujakulov A.M., Boymurodov N.A. O‘zbekistonda volfram mineral xom ashyo bazasi va uning asosiy muammolari [Tungsten mineral raw material base in Uzbekistan and its main problems] // Sanoatda raqamli texnologiyalar / Digital Technologies in Industry. – 2024. – Vol. 2, No. 1. – P. 40–45.
7. Young A., Rogers W.P. A review of digital transformation in mining // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2019. – Vol. 36. – P. 683–699. – DOI: 10.1007/s42461-019-00103-w.
8. Ali D., Frimpong S. Artificial intelligence, machine learning and process automation: Existing knowledge frontier and way forward for mining sector. Artificial Intelligence Review. – 2020. – Vol. 53. – P. 6025–6042. – DOI: 10.1007/s10462-020-09841-6.
9. Johnson D.B. Biomining–Biotechnologies for extracting and recovering metals from ores and waste materials. Current Opinion in Biotechnology. – 2014. – Vol. 30. – P. 24–31. – DOI: 10.1016/j.copbio.2014.04.008.
10. Safirova E., Golovko Y., Dulabova N. Analysis of the potential effects of Uzbekistan’s mineral endowment on the critical mineral supply of tungsten. – Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2025. – Open-File Report 2025–1032. – 14 P. – DOI: 10.3133/ofr20251032.
11. Tagwai M.G., Jimoh O.A., Shehu S.A., Zabidi H. Application of GIS and remote sensing in mineral exploration: Current and future perspectives. World Journal of Engineering. – 2024. – Vol. 21, No. 3. – P. 487–502. – DOI: 10.1108/WJE-09-2022-0395.

Статья поступила в редакцию: 09.09.2026

Статья принята к публикации: 20.09.2026

Статья опубликована: 28.09.2026

УДК 621.771+519.6

DOI: 10.32743/UniTech.2026.150.9.23440

Математическое моделирование кинематики формообразования металла в винтовых калибрах шаропрокатного стана

Каримов Камалхан Аббасович
проф.

Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: rus-0373@mail.ru

Шахобутдинов Рустам Эркинбаевич
доц., PhD

Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: rus-0373@mail.ru

Каримова Аноргул Рузимовна
доц. (PhD)

Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: kanorgul@gmail.com

Носиров Тулкинжан Нарзулла угли
зам. начальника шаропрокатного отделения АО Узметкомбинат
Республика Узбекистан, г. Бекабад
E-mail: t.nosirov@uzbeksteel.uz

Хужамов Акмал
ст. преп

Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: xojatovakmal46@gmail.com

Хуррамов Достонжон Хусан угли
ст. преп

Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: rus-0373@mail.ru

Библиографическое описание: Математическое моделирование кинематики формообразования металла в винтовых калибрах шаропрокатного стана // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Каримов К.А. [и др.]. 2026. 9(150). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23440>

Mathematical modeling of the kinematics of metal forming in the screw calibers of a ball rolling mill

Karimov Kamolkhon Abbasovich
professor

*Tashkent State Technical University named after Islam Karimov
Uzbekistan, Tashkent*

Shakhobutdinov Rustam Erkinbayevich
Associate Professor

*Tashkent State Technical University named after Islam Karimov
Uzbekistan, Tashkent*

Karimova Anorgul Ruzimovna
Associate Professor

*Tashkent State Technical University named after Islam Karimov
Uzbekistan, Tashkent*

Nosiriv Tulkinjon Narzulla ugli

*Deputy Head of the Ball Rolling Department Uzmekombinat JSC
Uzbekistan, Bekabad*

Khudjamov Akmal
senior Lecturer

*Tashkent State Technical University named after Islam Karimov
Uzbekistan, Tashkent*

Khurramov Dostonjon Khusan ugli
senior Lecturer

*Tashkent State Technical University named after Islam Karimov
Uzbekistan, Tashkent*

Аннотация

В данной статье представлена математическая модель кинематики процесса формообразования металла при поперечно-винтовой прокатке. Модель основана на совместном описании геометрии винтовых калибров через функции переменного шага нарезки $T(x)$ и радиуса вала $R_b(x)$. Разработаны системы дифференциальных уравнений первого порядка в матричной форме Коши для шести фазовых координат (перемещений, скоростей и ускорений заготовки по осевой, тангенциальной и радиальной составляющим) а также получены непрерывные функции распределения высоты, ширины, площади поперечного сечения и продольной скорости течения металла по всей длине очага деформации. Приведен алгоритм численного интегрирования системы методом Рунге-Кутты 4-го порядка в среде MathCAD с заданием начальных условий на входе заготовки в валки. Адекватность и математическая корректность модели верифицированы с помощью расчета закона постоянства секундного объема металла $V_{сек} = const$, где среднее отклонение не превышает 3–5 %.

В ходе анализа установлены параболический характер высотного обжатия и затухающий характер бокового уширения, а также определена точка критического сечения, отражающая трансформацию геометрии заготовки из цилиндрической в шаровидную. Рассчитанная эпюра продольных скоростей наглядно иллюстрирует монотонное замедление течения металла, определяющее положительный коэффициент и подтверждающее устойчивость кинематического режима прокатки.

Abstract

This article presents a mathematical model of the kinematics of the metal forming process during transverse helical rolling. The model is based on a combined description of the geometry of helical calibers using functions of the variable pitch $T(x)$ and the roll radius $R_b(x)$. Systems of first-order differential equations in Cauchy matrix form have been developed for six phase coordinates (displacements, velocities, and accelerations of the workpiece along the axial, tangential, and radial components) and continuous distribution functions for the height, width, cross-sectional area, and longitudinal flow velocity of the rolled material have been obtained along the entire length of the deformation zone. An algorithm for the numerical integration of the system using the 4th-order Runge-Kutta method in MathCAD is presented, with initial conditions specified at the workpiece's entry into the rolls. The adequacy and mathematical correctness of the model were verified by calculating the law of conservation of the instantaneous volume of metal, where the average deviation does not exceed 3–5 %.

The calculations revealed a parabolic nature of the vertical compression and a damped lateral expansion, as well as the determination of the critical section point, reflecting the transformation of the shape from circular to spherical. The calculated short-speed diagram illustrates a monotonic deceleration of the flow, determining a positive coefficient and confirming the stability of the kinematic rolling regime.

Ключевые слова: шаропрокатный стан, прокатные валки, винтовая линия, реборда, ось прокатки, математическая модель, кинематика, MathCAD 15.

Keywords: ball rolling mill, rolling rolls, screw line, flange, rolling axis, mathematical model, kinematics, MathCAD 15.

Введение

Винтовая прокатка стальных помольных шаров (поперечно-винтовая прокатка) – это высокопроизводительный процесс деформации, при котором круглая заготовка, постепенно меняя форму, превращается в цепочку шаров под действием двух вращающихся в одном направлении валков с непрерывной винтовой нарезкой (винтовыми калибрами). Шаропрокатные валки устанавливаются под небольшим углом друг к другу и к оси прокатки, что обеспечивает заготовке не только вращательное, но и поступательное движение.

Кинематика привода шаропрокатного стана построена по принципу передачи крутящего момента от одного центрального электродвигателя к двум рабочим шаропрокатным валкам. Схема обеспечивает их синхронное вращение в одном направлении, что необходимо для реализации процесса поперечно-винтовой прокатки стальных помольных шаров.

Процесс поперечно-винтовой прокатки помольных шаров характеризуется сложным вращательно-поступательным движением деформируемой заготовки при непрерывном изменении её формы, размеров и кинематических параметров в очаге деформации [6, 1]. Для полного теоретического описания кинематики формообразования разработана

математическая модель, выраженная системой дифференциальных уравнений, связывающая геометрические характеристики винтового инструмента и кинематические параметры течения металла.

Материалы и методы

Поверхность винтового калибра в цилиндрической системе координат описывается переменным радиусом валка по вершине реборды и переменным шагом винтовой линии вдоль оси прокатки [5]. Длина очага деформации включает зоны захвата, интенсивного формообразования и калибровки (рис. 1).

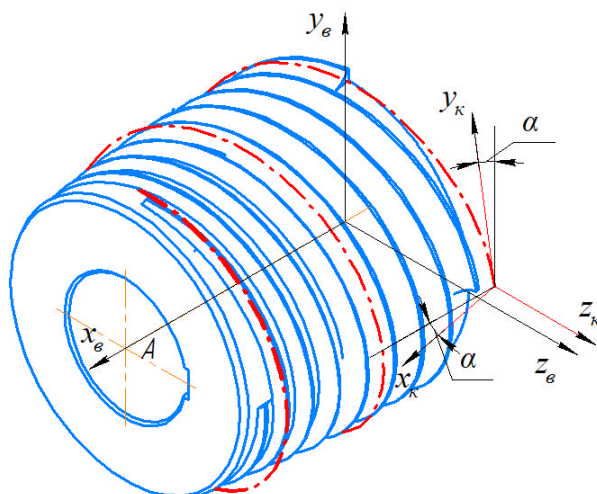


Рисунок 1. Схема для определения проекций векторов скоростей заготовки

При параллельной или скрещенной установке валков с межцентровым расстоянием A текущий радиус валка $R_v(x)$ и текущий радиус шейки (перемычки) заготовки $r_n(x)$ связаны соотношением:

$$R_v(x) = \frac{A}{2} - r_n(x) \quad (1)$$

Для непрерывного дифференцирования геометрии в среде численного интегрирования профили валка $R_v(x)$, шейки заготовки $r_n(x)$ и шага калибра $T_k(x)$ задаются в виде кубических сплайнов или полиномиальных функций вида:

$$T_v(x) = T_{v0} - A_t \cdot x^2 + B_t \cdot x^3 \quad (2)$$

$$r_n(x) = r_{n0} - \left(\frac{r_{n0} - r_{\min}}{l_d^2} \right)^2 \quad (3)$$

где T_{k0} – начальный шаг винтовой линии в зоне захвата; r_{n0} – начальный радиус цилиндрической заготовки; $r_{\min}$ – радиус перемычки в зоне отделения шара; A_t , B_t – коэффициенты аппроксимации геометрии калибра.

Вектор полной скорости движения точек поверхности металлической заготовки в любой момент времени раскладывается на три основные компоненты [4]:

1. Осевая (поступательная) скорость (v_x): задает скорость продвижения заготовки вдоль оси стана с учетом шага калибра $T_k(x)$ и коэффициента осевого скольжения η_x :

$$v_x = \frac{\omega_B}{2\pi} \cdot T_k(x) \cdot \eta_x \quad (4)$$

где ω_B – угловая скорость вращения валков.

2. Тангенциальная (окружная) скорость v_τ : определяет угловую скорость вращения заготовки $\omega_{заг}$ с учетом тангенциального коэффициента скольжения η_τ :

$$v_\tau = \omega_{заг} \cdot r_{заг}(x) = \omega_B \cdot R_B(x) \cdot \eta_\tau \Rightarrow \omega_{заг} = \omega_B \cdot \frac{R_B(x)}{r_{заг}(x)} \cdot \eta_\tau \quad (5)$$

3. Радиальная скорость v_r : характеризует скорость обжатия металла внедряющимися ребрами валков:

$$v_r = \frac{dr_{заг}}{dt} = \frac{dr_{заг}}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{dr_{заг}}{dx} \cdot v_x \quad (6)$$

Дифференцированием выражений скоростей по времени получены уравнения ускорений заготовки в очаге деформации:

Осевое ускорение:

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{\omega_B \cdot \eta_x}{2\pi} \cdot \frac{dT_k(x)}{dx} \cdot v_x \quad (7)$$

Угловое ускорение (с учётом правила дифференцирования сложной функции):

$$\epsilon_{заг} = \frac{d\omega_{заг}}{dt} = \omega_B \cdot \eta_\tau \cdot \left[\frac{1}{r_{заг}(x)} \cdot \frac{dR_B}{dx} \cdot v_x - \frac{R_B(x)}{r_{заг}(x)^2} \cdot v_r \right] \quad (8)$$

Радиальное ускорение:

$$a_r = \frac{dv_r}{dt} = \frac{d^2 r_{заг}(x)}{dx^2} \cdot v_x^2 + \frac{dr_{заг}(x)}{dx} \cdot a_x \quad (9)$$

Матричная форма системы дифференциальных уравнений (Форма Коши) Для численного решения кинематической задачи методом Рунге-Кутты 4-го порядка сформирован вектор фазовых координат, состоящий из осевого перемещения S_x , угла поворота $\varphi_{заг}$, текущего радиуса $r_{заг}$, а также их первых производных (скоростей) v_x , $\omega_{заг}$, v_r .

$$\left\{ \begin{array}{l} \& \frac{d^2 S_x}{dx^2} = \frac{\omega_B \cdot \eta_x}{2\pi} \cdot \frac{dT_k(S_x)}{dx} \cdot \frac{dS_x}{dt} \\ \& \frac{d^2 \varphi_{заг}}{dt^2} = \omega_B \cdot \eta_\tau \cdot \left(\frac{1}{r_{заг}} \cdot \frac{dR_B(S_x)}{dx} \cdot \frac{dS_x}{dt} - \frac{R_B(S_x)}{r_{заг}^2} \cdot \frac{dr_{заг}}{dt} \right) \\ \& \frac{d^2 r_{заг}}{dt^2} = \frac{d^2 r_{заг}(S_x)}{dx^2} \cdot \left(\frac{dS_x}{dt} \right)^2 + \frac{dr_{заг}(S_x)}{dx} \cdot \left(\frac{\omega_B \cdot \eta_x}{2\pi} \cdot \frac{dT_k(S_x)}{dx} \cdot \frac{dS_x}{dt} \right) \end{array} \right. \quad (10)$$

Результаты

Интегрирование системы дифференциальных уравнений (10) позволяет получить массивы кинематических параметров $S_x(t)$, $\varphi_{\text{заг}}(t)$, $r_{\text{заг}}(t)$, $v_x(t)$, $\omega_{\text{заг}}(t)$, $v_r(t)$, на основе которых построены основные расчетные графики формообразования.

Для оценки интенсивности формообразования заготовки и проверки соответствия заданной геометрии винтового инструмента технологическим ограничениям по результатам численного интегрирования системы дифференциальных уравнений построен график изменения текущего радиуса шейки (перемычки) заготовки вдоль оси прокатки (рис. 2).

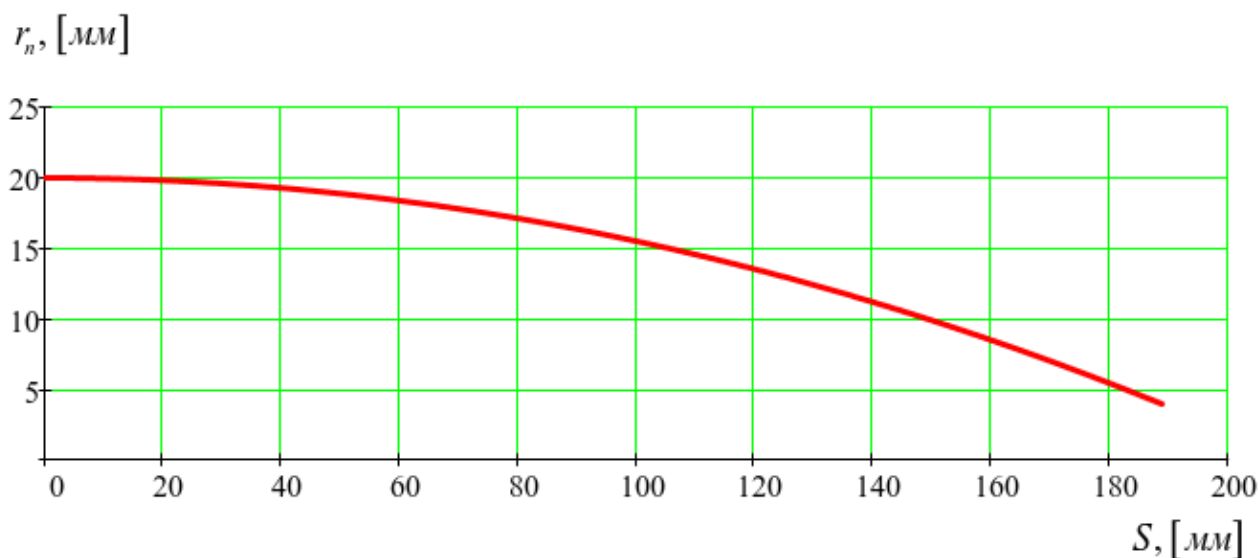


Рисунок 2. Изменение радиуса перемычки заготовки по длине очага деформации S

Полученная кривая $r_n = f(S_x)$ иллюстрирует непрерывный характер радиусной деформации заготовки при её движении сквозь очаг деформации длиной $l_d = 200$ мм.

Кинематика вращательного движения металла и интенсивность скручивания заготовки в процессе винтовой перекалки исследованы на основе зависимости угловой скорости заготовки $\omega_{\text{заг}}$ от её осевого перемещения S_x (рис. 3).

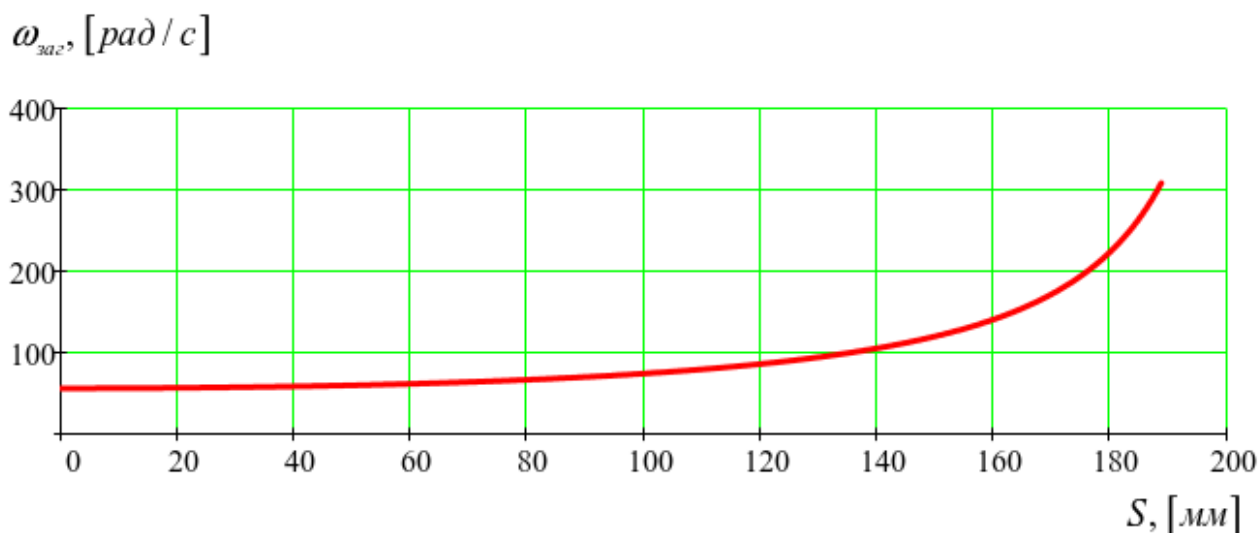


Рисунок 3. Зависимость угловой скорости вращения заготовки от осевого перемещения

Анализ зависимости $\omega_{\text{заг}} = f(S_x)$ показывает нелинейный гиперболический характер роста угловой скорости заготовки по мере её продвижения вглубь очага деформации.

Закономерности поступательного перемещения металла вдоль оси прокатки и динамика его вытяжки оценены по полученному графику изменения осевой скорости заготовки v_x от координаты очага деформации S_x (рис. 4).

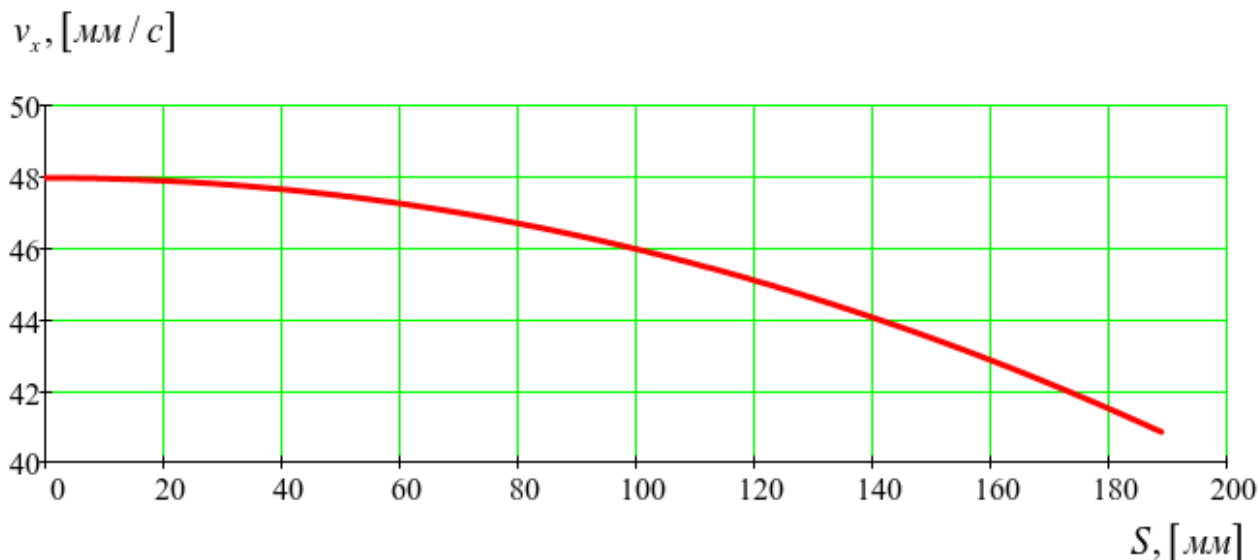


Рисунок 4. Изменение осевой скорости движения заготовки вдоль оси прокатки S

Характер кривой $v_x = f(S_x)$ отражает монотонное замедление осевого продвижения заготовки по длине бочки вала.

Снижение осевой скорости задается законом профилирования винтовой линии вала $T_k(x)$, шаг которой сужается к зоне калибровки до диаметра готового изделия $2R_{\text{ш}}$. Такое замедление создает в очаге деформации эффект осевого подпора: идущие сзади слои металла с большей скоростью протяжки уплотняют металл в зоне интенсивного обжатия.

Выводы

1. Разработана аналитическая модель геометрии и кинематики, описывающая вращательно-поступательное движение заготовки в очаге деформации винтового калибра. Модель учитывает непрерывное изменение профиля шейки шара $r_{\text{заг}}(x)$, шага винтовой линии $T_k(x)$ и коэффициентов скольжения металла η_x, η_r .

2. Сформирована система дифференциальных уравнений в матричной форме, пригодная для реализации в современных пакетах компьютерного моделирования (MathCAD). Представление уравнений в форме Коши позволяет рассчитывать полные кинематические поля (траектории, осевые v_x , угловые $\omega_{\text{заг}}$ и радиальные v_r скорости, а также соответствующие ускорения заготовки) на любом этапе формообразования.

Список литературы

1. Аносов А.С., Голубчик Э.М. Прокатка помольных шаров в винтовых калибрах: теория и практика. С. 95–103. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2012. – 185 с.

2. Выдрин В.Н., Черных И.Н. Динамика и кинематика процессов поперечно-винтовой прокатки. С. 70–120. – Челябинск: ЮУрГУ, 2005. – 160 с.
3. Котенок В.И., Подобедов С.И. Создание эффективных калибровок валков шаропрокатных станов и расширение сортамента шаров на действующих и новых станках // Труды III конгресса прокатчиков, Липецк, 19–22 окт. – 2000. – С. 438–441.
4. Романенко В.П., Степанов А.И. Моделирование формоизменения металла в очаге деформации шаропрокатного стана // Обработка материалов давлением. – 2015. – № 2.
5. Филатов А.А. Кинематика течения металла при винтовой прокатке заготовок постоянного и переменного сечения // Известия вузов. Черная металлургия. – 2018. – Т. 61, № 4.
6. Целиков А.И., Барбар В.И., Василев Я.Д. Специальные станы для поперечно-винтовой прокатки. С. 185–210. – М.: Металлургия, 1971. – 248 с.
7. Целиков А.И., Барбарич М.В., Васильчиков М.В., Грановский С.П., Жукевич-Стоша Е.А. Специальные прокатные станы // М.: Металлургия. – 1971.
8. Granovski S.P. New Technologies and Mills for Rolling of Products in Screw Calibers. Moscow: Metallurgiya. – P. 62–87. – 1980.
9. Shakhobutdinov R.E., Karimova A.R. & Nosirov T.N. Tasks of mastering the production of import-substituting steel grinding balls products. Science and Innovative Development, – P. 36–44. – 2024.
10. Tofil, A. Overview of the research on roll forging process / A. Tofil, Z. Pater // Advances in Science and Technology Research Journal. – 2017. – Т. 11, № 2. – P. 72–86.
11. Tofil, A. Overview of the research on roll forging process / A. Tofil, Z. Pater // Advances in Science and Technology Research Journal. – 2017. – Т. 11, № 2. – P. 72–86.

References

1. Anosov A.S., Golubchik E.M. [Rolling of grinding balls in screw calibers: theory and practice]. Magnitogorsk, Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012. 185 P. (In Russ.)
2. Vydrin V.N., Chernykh I.N. [Dynamics and kinematics of cross-screw rolling processes]. Chelyabinsk, South Ural State University, 2005. 160 P. (In Russ.)
3. Kotenok V.I., Podobedov S.I. [Creation of effective roll calibrations for ball rolling mills and expansion of ball assortment on existing and new machines]. Trudy III kongressa prokatchikov, Lipetsk, October 19–22, 1999. Moscow, JSC «Chermetinformatsiya», 2000, P. 438–441. (In Russ.)
4. Romanenko V.P., Stepanov A.I. [Modeling of metal deformation in the deformation zone of a ball rolling mill]. Obrabotka materialov davleniem, 2015, no. 2, P. 112–119. (In Russ.)
5. Filatov A.A. [Kinematics of metal flow during screw rolling of billets of constant and variable cross-section]. Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya, 2018, vol. 61, no. 4, P. 295–302. (In Russ.)
6. Tselikov A.I., Barbar V.I., Vasilev Ya.D. [Special mills for cross-screw rolling]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1971. 248 P. (In Russ.)

7. Tselikov A.I., Barbarich M.V., Vasilchikov M.V., Granovsky S.P., Zhukevich-Stosha E.A. [Special rolling mills]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1971. 336 P. (In Russ.)
8. Granovski S.P. New Technologies and Mills for Rolling of Products in Screw Calibers. Moscow, Metallurgiya. – 1980. – 87 P.
9. Import-substituting steel grinding balls products. Science and Innovative Development, 2024, P. 36–44. (In Russ.)
10. Tofil A., Pater Z. Overview of the research on roll forging process // Advances in Science and Technology Research Journal, June. – 2017. – P. 72–86.
11. Tofil A., Pater Z. Overview of the research on roll forging process // Advances in Science and Technology Research Journal, June. – 2017. – P. 72–86.

Статья поступила в редакцию: 14.09.2026

Статья принята к публикации: 19.09.2026

Статья опубликована: 28.09.2026

УДК 622.7+622.341

Исследование флотационного обогащения серебросодержащих руд с целью повышения извлечения серебра

Насирова Нигора Рамазановна

PhD, ст. преп

кафедры Металлургия, Навоийский государственный горно-технологический университет

Республика Узбекистан, г. Навои

E-mail: nigora.nasirova0502@gmail.com

Investigation of the flotation beneficiation of silver-bearing ores to increase silver recovery

Nasirova Nigora

PhD

in Technical Sciences Senior Lecturer, Department of Metallurgy, Navoi State University of Mining and Technologies

Republic of Uzbekistan, Navoi

Аннотация

В работе представлены результаты лабораторных исследований по разработке и обоснованию технологической схемы переработки смешанной серебросодержащей руды. Исследован химический состав исходной руды и проведена серия флотационных опытов для определения рациональной степени измельчения и оптимизации реагентного режима. Установлено, что исходная руда содержит 2,2 г/т серебра, 1,0 % общей серы и 0,87 % сульфидной серы. Флотационные исследования выполнены при степени измельчения от 50 до 80 % класса –0,074 мм с использованием соды, аполярного собирателя И-20, ксантогената и медного купороса. Установлено, что повышение степени измельчения до 80 % класса – 0,074 мм способствует увеличению извлечения серебра в концентрат. Дополнительное введение соды и И-20 при измельчении улучшает показатели флотации, а эффективность медного купороса зависит от точки его подачи. В замкнутых опытах исследованы схемы прямого измельчения и мельнично-циклонизирующей флотации. Полученные результаты позволили обосновать рациональные условия флотационного обогащения и выбрать технологическую схему переработки исследуемой серебросодержащей руды.

Библиографическое описание: Насирова Н.Р. Исследование флотационного обогащения серебросодержащих руд с целью повышения извлечения серебра // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 9(150). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23425>

Abstract

The paper presents the results of laboratory studies on the development and substantiation of a technological flowsheet for processing mixed silver-bearing ore. The chemical composition of the initial ore was studied, and a series of flotation experiments was carried out to determine the rational degree of grinding and optimize the reagent regime. It was established that the initial ore contains 2.2 g/t of silver, 1.0 % total sulfur, and 0.87 % sulfide sulfur. Flotation studies were conducted at a grinding degree ranging from 50 to 80 % passing 0.074 mm, using soda ash, the non-polar collector I-20, xanthate, and copper sulfate. It was established that increasing the grinding degree to 80 % passing 0.074 mm contributes to an increase in silver recovery into the concentrate. Additional addition of soda ash and I-20 during grinding improves flotation performance, while the effectiveness of copper sulfate depends on its point of addition. Closed-circuit tests were conducted using direct grinding and mill–cyclone flotation flowsheets. The obtained results made it possible to substantiate the rational conditions for flotation concentration and select a technological flowsheet for processing the investigated silver-bearing ore.

Ключевые слова: серебросодержащая руда, флотация, серебро, измельчение, реагентный режим, медный купорос, аполярный собиратель И-20, сода, технологическая схема.

Keywords: silver-bearing ore, flotation, silver, grinding, reagent regime, copper sulfate, non-polar collector I-20, soda ash, technological flowsheet.

Введение

Серебросодержащие руды характеризуются сложным вещественным составом и различными формами нахождения ценных компонентов, что обуславливает необходимость совершенствования и оптимизации процессов их обогащения. Флотация является одним из наиболее распространённых методов переработки такого сырья, позволяющим концентрировать ценные минералы и повышать эффективность последующей металлургической переработки. При этом основные технологические показатели флотации существенно зависят от степени измельчения руды, состава и расхода реагентов, а также порядка и места их подачи.

Особое значение при переработке смешанных серебросодержащих руд имеет выбор рациональной степени измельчения, обеспечивающей необходимое раскрытие серебросодержащих минералов, и установление эффективного реагентного режима. Оптимизация данных параметров позволяет повысить извлечение серебра в концентрат и одновременно снизить его потери с хвостами флотации.

Материалы и методы исследования

Целью настоящей работы является определение рациональной степени измельчения и реагентного режима, а также обоснование технологической схемы флотационного обогащения смешанной серебросодержащей руды. Для достижения поставленной цели изучен химический состав исходной руды и проведена серия лабораторных флотационных опытов при различной степени измельчения. Дополнительно исследовано влияние соды,

аполярного собирателя И-20, ксантогената и медного купороса на показатели процесса и определены рациональные условия их применения. Результаты сокращённого и полного химических анализов исходной руды представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1.**Результаты сокращенного химического анализа исходной руды**

Содержание, %							
Ag, г/т	S _{общ.}	S _s	Fe _{общ.}	C _{орг.}	C _{общ.}	As	Sb
2,2	1,0	0,87	3,41	0,17	0,27	0,15	0,002

По результатам химического анализа содержания ценного компонента в исходной руде составляет 2,2 г/т. А также содержание S_{общ.} 1 %, S_s 0,87 %.

Таблица 2.**Результаты полного химического (силикатного) анализа исходной руды**

Содержание компонентов, %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	MnO
70,5	10,7	0,6	0,9	1,9	1,8	2,2	0,3	0,08

Флотационное обогащение

При проведении тестовых опытов по флотационному обогащению исходной руды первоначально были поставлены опыты по уточнению конечной степени измельчения, опыты ставились при помолах 50 %, 60 %, 70 % и 80 % класса -0,074 мм, в открытом цикле на исходном реагентном режиме:

1-я основная флотация – 10 мин.; Kst -140г/т; Т-92 – 80г/т;

2-я основная флотация – 20 мин.; Kst -70г/т; Т-92-30г/т;

контрольная флотация – 15мин.; Kst -30г/т; Т-92-10г/т.

В последующих опытах проверялась целесообразность использования соды, аполярного собирателя И-20 и медного купороса, отрабатывались точки подачи и расходов реагентов. Опыты по уточнению реагентного режима проводились на помол до 80 % класса – 0,074мм.

Результаты тестовых опытов по флотационному обогащению и корректировки реагентного режима представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3.**Результаты флотационных опытов при различной тонине помола исходной руды**

Наименование продуктов	Выход, %	Содержание, %			Извлечение, %		
		Ag, г/т	Ss	Cорг	Ag	Ss	Cорг
Опыт 1. 50% класса -0,074мм							
Концентрат 1	3,56	22,50	8,80	2,10	35,64	27,70	20,28
Концентрат 2	4,36	7,70	6,00	0,96	14,91	23,09	11,33
Концентрат 3	2,77	4,70	5,60	0,73	5,79	13,71	5,48
кон-т об.	10,69	11,86	6,83	1,28	56,34	64,50	37,09

Наименование продуктов	Выход, %	Содержание, %			Извлечение, %		
		Ag, г/т	Ss	Сорг	Ag	Ss	Сорг
Хвосты	89,31	1,10	0,45	0,26	43,66	35,50	62,91
Руда	100,00	2,25	1,13	0,37	100,00	100,00	100,00
Опыт 2. 60% класса -0,074мм							
Концентрат 1	3,80	21,50	8,60	1,79	36,69	29,74	18,84
Концентрат 2	5,60	7,30	6,50	0,83	18,36	33,12	12,88
Концентрат 3	2,80	4,40	3,60	0,65	5,53	9,17	5,04
кон-т об.	12,20	11,06	6,49	1,09	60,57	72,04	36,76
Хвосты	87,80	1,00	0,35	0,26	39,43	27,96	63,24
Руда	100,00	2,23	1,10	0,36	100,00	100,00	100,00
Опыт 3. 70% класса -0,074мм							
Концентрат 1	4,50	19,80	8,00	1,62	40,27	33,93	20,63
Концентрат 2	6,60	6,40	5,20	0,82	19,09	32,34	15,32
Концентрат 3	3,80	3,50	2,70	0,58	6,01	9,67	6,24
кон-т об.	14,90	9,71	5,41	1,00	65,38	75,94	42,19
Хвосты	85,10	0,90	0,30	0,24	34,62	24,06	57,81
Руда	100,00	2,21	1,06	0,35	100,00	100,00	100,00
Опыт 4. 80% класса -0,074мм							
Концентрат 1	6,00	15,10	6,63	1,73	41,81	36,47	26,85
Концентрат 2	7,30	5,30	3,74	0,73	17,85	25,03	13,79
Концентрат 3	4,70	2,90	3,70	0,52	6,29	15,94	6,32
кон-т об.	18,00	7,94	4,69	1,01	65,95	77,45	46,96
Хвосты	82,00	0,90	0,30	0,25	34,05	22,55	53,04
Руда	100,00	2,17	1,09	0,39	100,00	100,00	100,00
Опыт 5. 70% класса -0,074мм, в изм,- сода-1000г/т, И-20-60г/т,							
Концентрат 1	5,90	13,80	6,78	1,90	37,79	37,97	29,51
Концентрат 2	8,70	6,60	3,66	0,70	26,65	30,22	16,03
Концентрат 3	3,60	3,10	3,40	0,52	5,18	11,62	4,93
кон-т об.	18,20	8,24	4,62	1,05	69,62	79,81	50,47
Хвосты	81,80	0,80	0,26	0,23	30,38	20,19	49,53
Руда	100,00	2,15	1,05	0,38	100,00	100,00	100,00
Опыт 6. 80% класса -0,074мм, в изм,- сода-1000г/т, И-20-60г/т,							
Концентрат 1	6,04	12,60	6,20	1,73	34,77	36,33	28,14
Концентрат 2	9,67	6,90	3,70	0,64	30,47	34,69	16,65
Концентрат 3	4,33	2,80	2,10	0,49	5,54	8,82	5,71
кон-т об.	20,04	7,73	4,11	0,94	70,78	79,84	50,50
Хвосты	79,96	0,80	0,26	0,23	29,22	20,16	49,50
Руда	100,00	2,19	1,03	0,37	100,00	100,00	100,00
Опыт 7. 80% класса -0,074мм, в изм,- сода-1000г/т, И-20-60г/т, Kst-80г/т, в 1-осн, Kst-60г/т							
Концентрат 1	7,20	16,70	9,90	1,70	55,83	64,35	30,10
Концентрат 2	8,10	3,70	2,40	0,74	13,91	17,55	14,74
Концентрат 3	4,20	2,10	0,94	0,55	4,10	3,56	5,68
кон-т об.	19,50	8,16	4,85	1,05	73,84	85,47	50,52

Наименование продуктов	Выход, %	Содержание, %			Извлечение, %		
		Ag, г/т	Ss	C _{орг}	Ag	Ss	C _{орг}
Хвосты	80,50	0,70	0,20	0,25	26,16	14,53	49,48
Руда	100,00	2,15	1,11	0,41	100,00	100,00	100,00

При увеличении выхода готового класса при измельчении с 50 % до 80 %, извлечение серебра в концентрат увеличивается на 12,6 % (таблица 3, опыты 1 – 4).

Дозирование в измельчение соды 1000г/т и аполярного собирателя И-20 - 60г/т увеличивает извлечение металла во флотоконцентрат на 1 %, содержание серебра в хвостах флотации 0,80г/т в обоих случаях (таблица 3, опыты 5 и 6).

При частичном переводе подачи ксантогената в мельницу (80г/т в изм-е и 60г/т в 1-ю основ.), извлечение повышается на 3%, содержание серебра в хвостах флотации снижается с 0,80г/т до 0,70г/т (таблица 3, опыты 6 и 7).

Заключительные опыты по флотации на пробе проводились в замкнутом цикле, имитирующем непрерывный процесс. Каждый опыт ставился на пяти и трех-килограммовых навесках. Опыты ставились по схеме прямого обогащения руды при помоле 80 % класса – 0,074мм и м/ц флотацией, при содержании готового класса в питании м/ц флотации 55 %, в питании основной 80 % класса -0,074мм.

Реагентный режим для опытов включал дозировку следующих реагентов:

- в измельчение сода – 1000г/т, И-20 – 60г/т. CuSO₄ -100г/т;
- м/ц флотация – 7 мин, Kst -140г/т, Т – 92 -80г/т;
- основная флотация – 20 мин, Kst -90г/т, Т- 92 – 30г/т;
- контрольная флотация – 18мин, Kst -40г/т, Т- 92 -10г/т.

Данные полученные по последним навескам представлены в таблицах 4 и 5.

Как видно из представленных результатов, извлечение серебра во флотоконцентрат при прямом обогащении руды получено 64,41%, при содержании в хвостах флотации 0,80 г/т. При стадийном обогащении с м/ц флотацией извлечение составило 67,66%, при содержании серебра в хвостах флотации 0,80 г/т.

Таблица 4.

Результаты замкнутых опытов по флотации с прямым измельчением руды

Наименование продуктов	Выход, %	Содержание, %			Извлечение, %		
		Ag,г/т	S _s	C _{орг}	Ag	S _s	C _{орг}
Конц-т 1осн - 5	5,92	14,9	8,50	1,90	43,08	49,34	29,90
Конц-т переч - 5	3,01	14,5	10,50	1,80	21,33	31,01	14,41
Об-ный кон-т	8,93	14,8	9,17	1,87	64,41	80,35	44,31
Хвосты	91,07	0,8	0,22	0,23	35,59	19,65	55,69
Руда	100,00	2,0	1,02	0,38	100,00	100,00	100,00

Таблица 5.

Результаты замкнутых опытов с м/ц флотацией

Наименование продуктов	Выход, %	Содержание, %			Извлечение, %		
		Ag, г/т	S _s	C _{орг}	Ag	S _s	C _{орг}
Конц-т м/ц 5	6,53	17,1	9,30	1,56	49,76	57,88	26,36
Конц-т пер 5	2,77	14,5	9,4	1,43	17,90	24,82	10,25
Об-ный кон-т	9,30	16,3	9,33	1,52	67,66	82,70	36,61
Хвосты	90,70	0,8	0,20	0,27	32,34	17,30	63,39
Руда	100,00	2,2	1,05	0,39	100,00	100,00	100,00

Заключение

По результатам лабораторных исследований установлено, что рациональная степень измельчения исследуемой руды составляет 80 % класса -0,074 мм. Дополнительная подача соды и аполярного собирателя И-20 в измельчение, а также перераспределение части ксантогената способствуют повышению извлечения серебра.

В замкнутых опытах извлечение серебра при прямом обогащении составило 64,06–64,41 %, тогда как при стадийной схеме с мельнично-циклонирующей флотацией достигло 66,36–67,66 %. Таким образом, стадийная схема обеспечивает более высокое извлечение серебра и может быть рекомендована для дальнейшей переработки исследуемой руды.

Список литературы

1. Доняров Н.А. Нодир металлар металлургияси / Н.А. Доняров [и др.]. – Ташкент. – 2021.
2. Лодейщиков В.В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд: в 2 т. / В.В. Лодейщиков. – Иркутск: ОАО «Иргиредмет», 1999. – 786 с.
3. Самадов А.У., Буруно А.Б., Хужакулов Н.Б. Биогидрометаллургический способ переработки сульфидных руд Узбекистана // Научное обозрение технических наук. – 2019. – С. 100–106.
4. Самадов А.У. Изучение возможности усовершенствования технологии переработки руд месторождения «Аджибугут» / А.У. Самадов [и др.] // Academy. – 2021. – № 5 (68). – С. 11–14.
5. Самадов А.У. [и др.] // Горный вестник Узбекистана. – 2019. – № 3 (78). – С. 9–12.
6. Санакулов К.С., Саломов Ф.И., Хасанов А.С. Всё о золоте. – Ташкент: Turon Zamin Ziyoy, 2017. – 456 с.
7. Санакулов К.С. Теория и практика освоения переработки золотосодержащих упорных руд Кызылкумов / К.С. Санакулов, У.А. Эргашев. – Ташкент: ГП «НИИМР», 2014. – 297 с.
8. Семенович А.В., Лоскутов С.Р. Кинетика сорбции катионных красителей модифицированной корой хвойных древесных пород Сибири // Химия растительного сырья. – 2015. – № 4. – С. 101–109.
9. Chugaeva L.V. Metallurgy of noble metals / L.V. Chugaeva [et al.]. – 2nd ed., rev. and suppl. – Moscow: Metallurgy, 1987. – 432 P.

10. Sanakulov K. A new approach to the classification of refractory gold ores: a case study of Kyzylkum deposits / K. Sanakulov, U.A. Ergashev, I.O. Khamroev, O.U. Fuzaylov // Non-ferrous Metals. – 2023. – № 9. – P. 22–30.

References

1. Donyarov N.A., Khuzhakulov N.B., Vokhidov B.R., Azimov O.A., Aripov A.R. [Rare Metals Metallurgy]. – Tashkent. – 2021. (In Russ.)
2. Lodejshchikov V.V. [Technology of Gold and Silver Extraction from Refractory Ores: in 2 volumes]. – Irkutsk: OAO «Irgiredmet», 1999 (In Russ.)
3. Samadov A.U., Burono A.B., Khuzhakulov N.B. [Biohydrometallurgical Method of Processing Sulfide Ores of Uzbekistan] // Nauchnoe obozrenie tekhnicheskikh nauk. – 2019. (In Russ.)
4. Samadov A.U., Ergashev U.A., Khuzhamov U.U., Makhmudova F.M. [Study of the Possibility of Improving the Technology of Processing Ores from the Adjibugut Deposit] // Academy. – 2021. (In Russ.)
5. Samadov A.U., Khuzhakulov N.B., Burono A.B. i dr. [Mining Bulletin of Uzbekistan]. – Navoi, 2019. – T. 11, № 3 (In Russ.)
6. Sanakulov K.S., Salomov F.I., Khasanov A.S. [All About Gold]. – Tashkent: Turon Zamin Ziyo, 2017. – 456 s (In Russ.)
7. Sanakulov K.S., Ergashev U.A. [Theory and Practice of Development of Processing Gold-Bearing Refractory Ores of Kyzylkum]. – Tashkent. – 2014. (In Russ.)
8. Semenov A.V., Loskutov S.R. [Kinetics of Sorption of Cationic Dyes on Modified Bark of Coniferous Wood Species of Siberia] // Khimiya rastitel'nogo syr'ya. – 2015. – No. 4. (In Russ.)
9. Chugaeva L.V. Metallurgy of noble metals. – Moscow: Metallurgy, 1987.
10. Sanakulov K., Ergashev U.A., Khamroev I.O., Fuzaylov O.U. A new approach to the classification of refractory gold ores: a case study of Kyzylkum deposits // Non-ferrous Metals. – 2023. – No. 9.

Статья поступила в редакцию: 03.07.2026

Статья принята к публикации: 16.07.2026

Статья опубликована: 28.09.2026

УДК 622.8+539.3

Численное моделирование и оценка закономерностей развития зон концентрации напряжений в массиве горных пород при влиянии горных работ

Салямова Клара Джаббаровна

д-р. техн. наук, проф.

вед. науч. сотр. Институт механики и сейсмостойкости сооружений АН РУз

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: klara_51@mail.ru

Меликулов Абдусаттар Джаббарович

канд. техн. наук, доц.

заместитель генерального директора ООО Спецуправление № 75

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: konchilk@mail.ru

Уралбаев Абдукахар Джаппарович

ведущий инженер

производственного контроля АРУ АО Алмалыкский ГМК

Республика Узбекистан, г. Алмалык

E-mail: Абдукахар_дж@mail.ru

Бакиров Гайрат Холикбердиевич

PhD, доц., доц.

кафедры Горное дело Алмалыкского государственного технического ин-та

Республика Узбекистан, г. Алмалык

E-mail: gayratbakirov3004@gmail.com

Абдувахобов Жавохир Собир угли

магистр кафедры Горное дело, Алмалыкский государственный технический институт

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: J.S.Abduvahobov@gmail.com

Библиографическое описание: Численное моделирование и оценка закономерностей развития зон концентрации напряжений в массиве горных пород при влиянии горных работ // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Салямова К.Д. [и др.]. 2026. 9(150). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23370>

Numerical modeling and evaluation of the development patterns of stress concentration zones in a rock mass under the influence of mining operations

Salyamova Klara Dzhabarovna

DSc, Professor, Leading Science Researcher

Institute of Mechanics and Seismic Stability of Constructions of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Melikulov Abdusattar Dzhabbarovich

PhD, Associate Professor

Deputy General Director, Special Administration Co., LLC

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Uralbaev Abdukakhar Dzhabbarovich

Leading Engineer of Production Control,

Angren Mining Administration,

JSC "Almalyk Mining and Metallurgical Complex"

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Bakirov Gayrat Kholikberdievich

PhD, Associate Professor

of the Department of Mining Engineering, Almalyk State Technical Institute

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Abduvahobov Javohir Sobir o'g'li

Master's Student Department of Mining Engineering Almalyk State Technical Institute Tashkent

Region

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

В статье представлены результаты исследований, направленных на оценку геомеханического состояния массива горных пород в условиях ведения горных работ на рудниках, входящих в состав Ангренского рудоуправления. Актуальность исследований обусловлена существенным изменением исходного напряжённого состояния массива горных пород вследствие увеличения глубины освоения месторождений, роста объёмов и интенсивности горных работ, а также расширения выработанных пространств. В данных условиях под воздействием горных работ происходит перераспределение естественного поля напряжений, что может приводить к формированию локальных зон концентрации напряжений и областей разгрузки массива. Указанные геомеханические процессы способны вызывать деформацию контура подземных сооружений, разрушение горных пород, снижение устойчивости кровли горных выработок и, как следствие, оказывать негативное влияние на безопасность ведения горных работ. Основной целью исследования является установление закономерностей изменения напряжённо-деформированного состояния окружающего массива горных пород в результате ведения горных работ на рудниках Ангренского рудоуправления, оценка механизмов перераспределения напряжений, а также определение условий формирования зон их концентрации и релаксации.

На основе полученных результатов обеспечивается возможность оценки геомеханического состояния массива горных пород, заблаговременного выявления потенциально опасных зон концентрации напряжений и областей релаксации, а также прогнозирования устойчивости подземных сооружений. Результаты исследования могут быть использованы в качестве научно-практической основы для выбора рациональной

последовательности ведения горных работ на рудниках Ангренского рудоуправления, обоснования параметров крепления горных выработок и разработки технических мероприятий, направленных на повышение устойчивости горных выработок и безопасности ведения подземных горных работ.

Abstract

The article presents the results of research aimed at assessing the geomechanical state of the rock mass under mining conditions at the mines operated by the Angren Mining Administration. The relevance of the study is determined by significant changes in the initial stress state of the rock mass resulting from increasing mining depth, growing mining volumes and intensity, as well as the expansion of mined-out areas. Under these conditions, mining operations induce a redistribution of the natural stress field, which may lead to the formation of localized zones of stress concentration and areas of stress relief within the rock mass. These geomechanical processes can cause deformation of the contours of underground structures, rock failure, and a reduction in the stability of mine excavation roofs, thereby adversely affecting the safety of mining operations. The main objective of the study is to establish the patterns of changes in the stress–strain state of the surrounding rock mass resulting from mining operations at the mines of the Angren Mining Administration, to assess the mechanisms of stress redistribution, and to determine the conditions governing the formation of zones of stress concentration and relaxation.

Based on the results obtained, it is possible to assess the geomechanical state of the rock mass, identify potentially hazardous zones of stress concentration and areas of stress relaxation in advance, and predict the stability of underground structures. The results of the study can be used as a scientific and practical basis for selecting a rational sequence of mining operations at the mines of the Angren Mining Administration, substantiating the parameters of mine excavation support, and developing technical measures aimed at improving the stability of mine excavations and ensuring the safety of underground mining operations.

Ключевые слова: численное моделирование, концентрация напряжений, горные выработки, геомеханика, перераспределение напряжений, напряжённое состояние, горным давлением, релаксационные зоны, тектонических нарушений.

Keywords: numerical modeling, stress concentration, mine workings, geomechanics, stress redistribution, stress state, rock pressure, relaxation zones, tectonic disturbances.

Введение

В современных условиях углубления горных работ и повышения интенсивности добычи полезных ископаемых в массиве горных пород под влиянием совокупности природных и техногенных факторов происходит формирование сложного напряжённо-деформированного состояния. В связи с этим разработка и совершенствование методов эффективного управления горным давлением, а также установление количественных закономерностей воздействия горных работ на массив пород, вмещающий подземные горные выработки, представляют собой важную и актуальную научно-практическую задачу.

На рудном поле месторождения «Кызыл-Олма» участки Самарчук являются основными участками ведения горных работ. При отработке промышленных запасов на данных участках деформационные процессы в окружающем массиве горных пород распространяются на значительные расстояния, вплоть до приповерхностной зоны. Кроме того, для обеспечения сохранности подземных сооружений возникает необходимость оставления охранных целиков в определённом количестве и в соответствии с установленным порядком их расположения.

Развитие фронта горных работ на месторождении требует реализации комплекса определённых мероприятий, направленных на обеспечение устойчивости и сохранности подземных сооружений. Одновременное развитие горных работ на различных участках месторождения существенно усложняет процесс обеспечения устойчивости подземных сооружений, поскольку реализация необходимых защитных мероприятий требует значительных финансовых инвестиций и продолжительного времени. Разлом Гушсай, расположенный в центральной части месторождения, имеет мощность до 400–550 м и протяжённость до 850–1100 м. Рудное тело, расположенное в центральной части месторождения. Его мощность изменяется от 30–40 м до 180–200 м, а протяжённость достигает 1000 м.

Материалы и методы

Достижения многих отраслей промышленности неразрывно связаны с широким внедрением компьютерных технологий. В настоящее время ведутся интенсивные исследования и разрабатываются различные программные комплексы, предназначенные для анализа параметров геомеханических процессов, происходящих в массиве горных пород при ведении горных работ. К таким параметрам относятся напряжённо-деформированное состояние массива, смещения отдельных участков массива, развитие процессов деформирования горных пород вокруг горных выработок во времени, укрепление нарушенными породами, их взаимодействие и влияние на напряжённое состояние и смещение горных пород, а также воздействие горнотехнических работ на состояние массива. Вместе с тем существующие программные разработки сталкиваются с рядом существенных трудностей, связанных с вероятностным характером и недостаточной достоверностью исходных данных, необходимостью учёта сложной иерархической и неоднородной структуры массива, технологических особенностей строительства и эксплуатации шахт, а также их изменений во времени и пространстве [1].

Результаты и обсуждение

В связи с этим построение реальных расчётных схем без применения специальных методов расчёта становится практически невозможным. Реализация таких расчётов осуществляется исключительно с использованием компьютерных технологий. Среди указанных методов расчёта в первую очередь следует выделить метод конечных элементов (МКЭ) [2].

В процессе завершения горных работ на подэтажах горизонта +925, Характер распределения тангенциальных напряжений t_m в массиве горных пород после проведения горных работ на площади месторождения «Кызыл-Алма» представлены на рисунке 1.

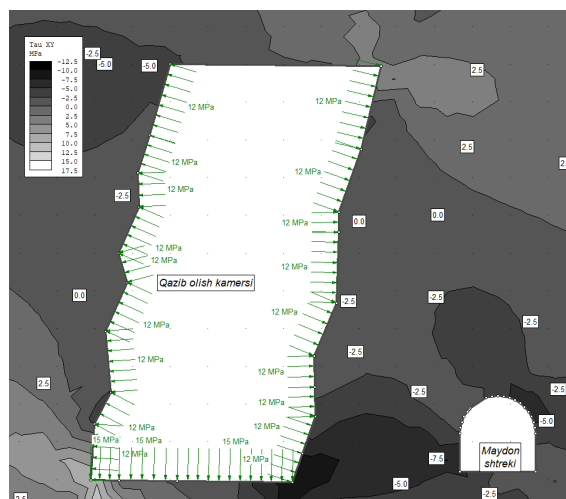


Рисунок 1. Характер распределения тангенциальных напряжений τ_t в массиве горных пород после проведения горных работ на площади месторождения «Кызыл-Алма»

При проведении подземных горных работ важное значение имеет оценка устойчивости массива горных пород, окружающего очистное пространство. В условиях интенсивного деформирования породного массива возможно возникновение локальных разрушений, способных негативно повлиять на устойчивость горных выработок и безопасность технологического процесса. В связи с этим выявление потенциально опасных участков массива на стадии прогнозирования и разработка соответствующих мер по предупреждению разрушений являются необходимыми условиями обеспечения безопасного и бесперебойного ведения горных работ.

Для количественной оценки характера деформирования и возможного разрушения породного массива выполнено численное геомеханическое моделирование с использованием программного комплекса ROCSCIENCE (Examine 2D). Результаты расчетов показали, что сформировавшаяся вокруг очистного блока зона разрушения имеет сравнительно небольшие размеры и не оказывает существенного влияния на устойчивость окружающего массива при рассматриваемых условиях.

При построении расчетной модели первоначально формируется геометрическая схема исследуемого участка, после чего определяются соответствующие начальные и граничные условия. Особое внимание при моделировании напряжённо-деформированного состояния трещиноватого массива уделяется учёту его природной структурной неоднородности. В зависимости от характера пространственной ориентировки и взаимного расположения трещин породный массив может быть представлен тремя основными структурными типами: массивом с системой протяжённых параллельно ориентированных трещин; массивом с выраженной блочной структурой; массивом с системой трещин, характеризующихся неупорядоченной, или хаотической, пространственной ориентировкой.

Выбор соответствующей расчётной схемы позволяет более адекватно учитывать особенности деформирования и разрушения различных структурных разновидностей породного массива. При этом механическое поведение трещиноватого массива в значительной степени определяется его прочностными и деформационными характеристиками, которые должны быть обоснованы до выполнения численных расчётов.

В рамках метода конечных элементов (МКЭ) определение механических параметров массива осуществляется с использованием усовершенствованного варианта методики, основанной на критерии прочности Хука–Брауна (Hook–Brown). Данный подход позволяет учитывать влияние структурных особенностей и степени нарушенности массива на его прочностное состояние и деформационные свойства. Для массива, характеризующегося системой параллельно ориентированных трещин, расчёт упругих характеристик выполняется на основе соответствующих зависимостей с дополнительным учётом состояния трещин. В частности, отдельно рассматривается случай открытых (несомкнутых) трещин, поскольку их наличие существенно влияет на эффективные деформационные характеристики и перераспределение напряжений в окружающем массиве.

Модуль упругости массива в вертикальном направлении:

$$E_v = \frac{E}{1 + \sum_{i=1}^n \mu_i (1 - \sin^4 \theta_i)} \quad (1)$$

Модуль упругости массива в горизонтальном направлении:

$$E_v = \frac{E}{1 + \sum_{i=1}^n \mu_i (1 - \cos^4 \theta_i)} \quad (2)$$

Коэффициент Пуассона:

$$\nu_1 = \nu + \sum_{i=1}^n \mu_i \cos^4 \theta_i \sin^4 \theta_i \quad (3)$$

где: μ_i – геометрическая характеристика i -й системы трещин, отражающая ориентацию; плотность и особенности пространственного расположения трещин; θ_i – угол внутреннего трения сыпучего материала; E и ν – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона пород, слагающих массив горных пород.

Результаты численного моделирования напряжённо-деформированного состояния массива горных пород по компоненте горизонтальных напряжений после отработки двух маломощных рудных тел, расположенных на горизонте +925 м центрального участка рудника «Кызыл-Алма», представлены на рисунке 2. Полученные результаты характеризуют пространственное перераспределение горизонтальных напряжений в массиве горных пород под влиянием проведённых горных выработок и позволяют оценить изменение напряжённого состояния в окрестности отработанных рудных тел. На основе результатов моделирования установлены области повышенной и пониженной концентрации горизонтальных напряжений, формирующиеся вследствие изменения первоначального равновесного состояния массива при ведении горных работ.

В процессе численного моделирования были приняты следующие механические характеристики рудного тела и вмещающих горных пород, определяющие их напряжённо-деформированное состояние и механическое поведение при воздействии горных работ:

объёмный вес горных пород $\gamma = 0,025 \text{ МН/м}^3$; модуль Юнга для рудного тела $E = 3850 \text{ МПа}$, для вмещающих горных пород $E = 6100 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона руды – $0,27$; удельный вес горных пород принят равным $0,022 \text{ МН/м}^3$.

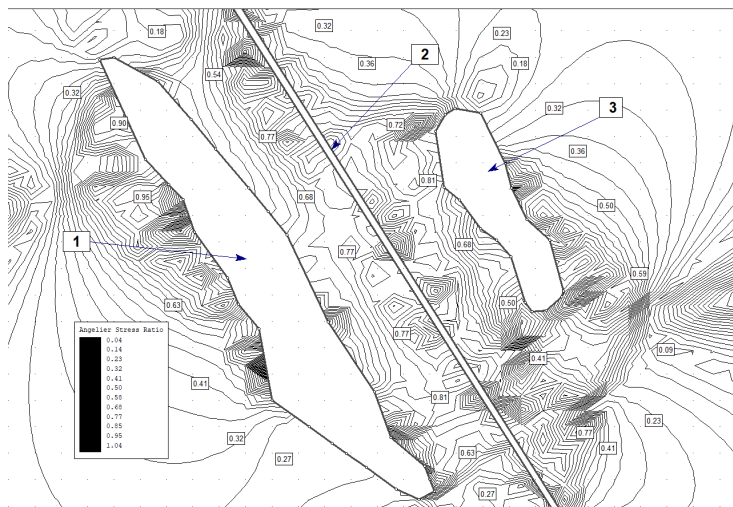


Рисунок 2. Особенности формирования зон опорного давления и релаксации в массиве горных пород вблизи горной выработки после отработки рудных тел на горизонте +925 м рудника «Кызыл-Алма»: 1 – рудное тело 10-Б; 2 – транспортный штрек; 3 – рудное тело 1-Г;

На рисунке 3 представлен график распределения тангенциальных напряжений τ_m вдоль контура рудного тела 10 Б. Согласно результатам моделирования, значения тангенциальных напряжений по контуру рудного тела изменяются в диапазоне от 3 МПа до 44 МПа. Такой диапазон изменения напряжений характеризует неоднородность их распределения по контуру выработанного пространства, сформированного в результате отработки рудного тела.

По горизонтальной оси ОХ графика отложена длина контура выработанного пространства, образовавшегося в результате отработки 10 Б рудного тела. По мере перемещения вдоль контура наблюдаются изменения величины тангенциальных напряжений τ_m , обусловленные перераспределением напряжений в массиве горных пород после удаления рудного тела. Полученная зависимость позволяет оценить характер распределения тангенциальных напряжений по контуру выработанного пространства и выделить участки с повышенными значениями напряжений.

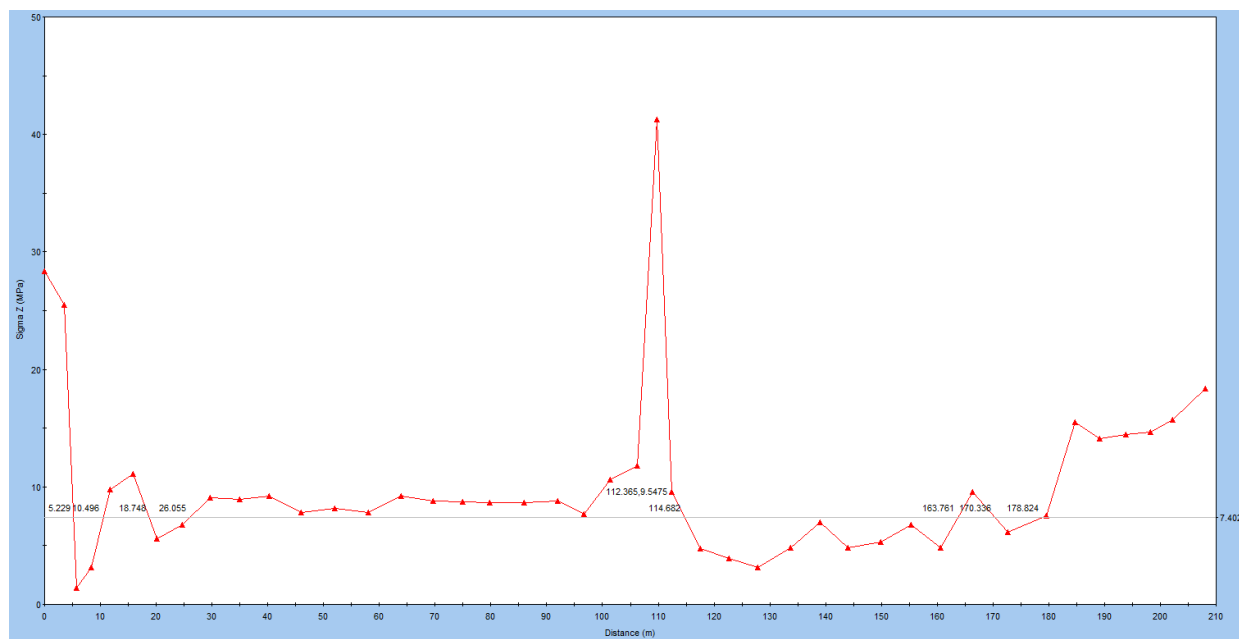


Рисунок 3. График распределения тангенциальных напряжений τ_m вдоль контура выработанного пространства, образовавшегося после выемки рудного тела 10 Б

На данном графике представлена динамика неравномерного распределения тангенциальных напряжений τ_m в массиве горных пород по периметру рудного тела, на основании чего можно сделать следующие выводы: наблюдается зона высоких напряжений в начальном участке; затем зона релаксации; зона сильной локальной концентрации в интервале 105–112 м; после нее резкое снижение напряжений на участке 113–128 м и, наконец, зоны повторно возрастающего опорного давления в заключительной части. Подобное состояние обычно объясняется взаимным влиянием фронта очистных работ, тектонических нарушений и зон опорного давления

Заключение

Проведённое моделирование напряжённого состояния массива горных пород в зоне формирующегося выработанного пространства при разработке месторождения на горизонте +925 м центрального участка рудника «Кызыл-Алма», а также в пределах транспортного штрека этого горизонта позволило установить характерные особенности перераспределения горизонтальных напряжений в массиве:

1. На боковой границе выработанного пространства со стороны расположения горной выработки, а также вблизи боковых стенок полевого штрека формируются зоны концентрации горизонтальных сжимающих напряжений. Данное явление объясняется перераспределением нагрузки под влиянием выработанного пространства и возникновением дополнительного поля сжатия в опорных частях массива.
2. В угловой части, примыкающей к висячему боку рудного тела выработанного пространства, фиксируются максимальные значения тангенциальных напряжений (рисунок 2). Данный участок является локальным очагом концентрации напряжений и оценивается как зона с высокой вероятностью развития потенциальных деформационных процессов.

3. Согласно результатам моделирования, величина растягивающих и сжимающих напряжений, формирующихся вблизи боковых стенок камеры, ниже соответствующих пределов прочности горных пород, что свидетельствует об относительно ограниченном риске резкого нарушения устойчивости на данных участках.

Использование установленных закономерностей формирования зон повышенных напряжений в дальнейшем позволит научно обоснованно разрабатывать геотехнологические схемы и оптимизировать параметры ведения горных работ при освоении участков, расположенных в пределах зон концентрации динамических проявлений.

Выявление и количественная оценка таких зон создают возможность заблаговременно прогнозировать напряжённо-деформированное состояние массива горных пород, определять потенциально опасные участки с повышенной вероятностью развития геомеханических и динамических явлений, а также учитывать особенности перераспределения напряжений при проектировании технологии отработки месторождения.

На основе полученных закономерностей могут быть обоснованы рациональные параметры систем разработки, последовательность и направление ведения очистных работ, размеры очистных пространств, параметры оставляемых целиков и мероприятия по управлению горным давлением. Кроме того, появляется возможность корректировки параметров крепления, схем поддержания горных выработок и мер по обеспечению устойчивости массива в условиях повышенной концентрации напряжений.

Применение данного подхода позволит повысить безопасность ведения горных работ, снизить вероятность возникновения динамических проявлений горного давления, обеспечить устойчивое состояние горных выработок и повысить эффективность освоения месторождения в сложных геомеханических условиях.

Список литературы

1. Абдурахманов Х.Х., Меликулов А.Д., Салямова К.Д., Гасанова Н.Ю., Бакиров Г.Х. Геомеханические факторы повышения эффективности геотехнологий с учетом их ресурсопроизводства и ресурсосбережения в современных рыночных условиях // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. – 2020. – № 1.
2. Акбаров Т.Г., Уразов Ж.Д. Оработка месторождения Кызылалма системой разработки горизонтальными слоями с закладкой выработанного пространства // Горный вестник Узбекистана. – 2011. – № 3.
3. Акбаров Х.А. Состояние, проблемы и пути расширения минерально-сырьевой базы золота Узбекистана // Горный вестник Узбекистана. – 2014. – № 3.
4. Арипова Ф.М., Каримов Н.Т., Иноятлов М.Ф., Таджибаев А.А. Некоторые результаты измерений напряженного состояния горных пород в массиве // Узбекский геологический журнал. – 1975. – № 3.
5. Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Ибрагимова Т.Л., Мирзаев М.А. Модели макросейсмического поля землетрясений Центральной Азии и их влияние на результирующие оценки сейсмической опасности // Геодинамика и тектонофизика. – 2020. – Т. 11, № 3. – DOI: 10.5800/GT-2020-11-3-0494.

6. Бакиров Г.Х. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ АРОЧНОЙ КРЕПИ ОТКАТОЧНОГО ШТРЕКА В УСЛОВИЯХ ШАХТЫ «КЫЗЫЛ-АЛМА» // *Universum: технические науки*. – 2022.
7. Бакиров Г.Х. и др. ОБОСНОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ВЫБОРА КОНСТРУКЦИИ И ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КРЕПИ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК // *ЎЗДКОР О'ЎТУВЧИ*. – 2023. – Т. 3.
8. Бакиров Г.Х. УПРАВЛЕНИЕ СОСТОЯНИЕМ МАССИВА В ЗОНАХ ОПОРНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ СИСТЕМАХ С ОБРУШЕНИЕМ ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД // *European Journal of Interdisciplinary Research and Development*. – 2022. – Т. 3.
9. Бакиров Г.Х. Распределение напряжений вокруг выработанного пространства // *Экономика и социум*. – 2021.
10. Балек А.Е., Харисов Т.Ф., Авдеев А.Н., Харисова О.Д. Обоснование оптимального порядка отработки рудной залежи в условиях высоких напряжений и низкой прочности массива // *Известия вузов. Горный журнал*. – 2023. – № 3. – С. 55–65. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-55-65.
11. Балов С.В., Борщевский С.В., Капран Л.Н., Мельников С.А. Совершенствование элементов конструкции крепи, повышающих устойчивость горных выработок // *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. – 2025.
12. Меликулов А.Д. и др. Статья. Геомеханические факторы повышения эффективности геотехнологий с учетом их ресурсопродуктивности и ресурсосбережения в современных рыночных условиях // *Журнал «Проблемы энерго-и ресурсосбережения*. – 2019.
13. Меликулов А.Д. и др. Факторы обеспечения длительной устойчивости и безопасности подземных горных выработок шахт и рудников в условиях проявления тектонических процессов // *Вопросы науки и образования*. – 2019.
14. Bakirov G. et al. METALL ROMLI MUSTAHKAMLAGICH EGILUVCHAN QISMINING ISH SHAROITLARINI BAHOLASH VA UNING REJIMINI BOSHQARISH // *Sanoatda raqamli texnologiyalar/Цифровые технологии в промышленности*. – 2023. – Т. 1.
15. Sohibov I.Y. et al. “QIZIL-OLMA” KONI SHAROITIDA KON LAHIMLARIDAGI KON BOSIMINI EXAMINE 2D KOMPYUTER DASTURIDA HISOBLASH ISHLARINING TAHLILI // *Finland International Scientific Journal of Education, Social Science & Humanities*. – 2023. – Т. 11.
16. Yu G.N. et al. MAINTENANCE OF UNDERGROUND MINING DEVELOPMENTS IN SEISMIC-TECTONIC ACTIVE AREAS // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. – 2022.

References

1. Abdurakhmanov Kh.Kh. [Geomechanical Factors for Improving the Efficiency of Geotechnologies with Consideration of Resource Reproduction and Resource Conservation in Modern Market Conditions] // *Problemy energo- i resursosberezheniya*. – 2020. – No. 1. (In Russ.)

2. Akbarov T.G., Urazov Zh.D. [Development of the Kyzylalma Deposit Using a Horizontal Layer Mining System with Backfilling of Mined-Out Space] // Gornyj vestnik Uzbekistana. – 2011. – No. 3. (In Russ.)
3. Akbarov Kh.A. [Status, Problems, and Ways of Expanding the Mineral and Raw Material Base of Gold in Uzbekistan] // Gornyj vestnik Uzbekistana. – 2014. – No. 3. (In Russ.)
4. Aripova F.M., Karimov N.T., Inoyatov M.F., Tadzhibaev A.A. [Some Results of Measurements of the Stress State of Rock Masses in a Massif] // Uzbekskij geologicheskij zhurnal. – 1975. – No. 3. (In Russ.)
5. Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A. [Models of the Macroseismic Field of Earthquakes in Central Asia and Their Influence on Resulting Seismic Hazard Assessments] // Geodinamika i tektonofizika. – 2020. – Vol. 11, No. 3. – DOI: 10.5800/GT-2020-11-3-0494. (In Russ.)
6. Bakirov G.Kh. [Calculation of Parameters of Arched Support in the Haulage Drift under the Conditions of the Kyzyl-Alma Mine] // Universum: tekhnicheskie nauki. – 2022. (In Russ.)
7. Bakirov G.X. i dr. [Substantiation of Principles for Selecting the Design and Optimal Parameters of Support for Underground Excavations] // IJODKOR O'QITUVCHI. – 2023. – Vol. 3. (In Russ.)
8. Bakirov G.Kh. [Management of Massif Condition in Zones of Abutment Pressure in Systems with Caving of Surrounding Rocks] // European Journal of Interdisciplinary Research and Development. – 2022. – Vol. 3. (In Russ.)
9. Bakirov G.Kh. [Distribution of Stresses Around Mined-Out Space] // Ekonomika i sotsium. – 2021. (In Russ.)
10. Balek A.E., Kharisov T.F., Avdeev A.N., Kharisova O.D. [Substantiation of the Optimal Sequence of Mining an Ore Deposit under Conditions of High Stresses and Low Massif Strength] // Izvestiya vuzov. Gornyj zhurnal. – 2023. – No. 3. – DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-55-65. (In Russ.)
11. Balov S.V., Borshchevskij S.V., Kapran L.N., Mel'nikov S.A. [Improvement of Support Structure Elements that Increase the Stability of Underground Excavations] // Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle. – 2025. (In Russ.)
12. Melikulov A.D. i dr. [Article. Geomechanical Factors for Improving the Efficiency of Geotechnologies with Consideration of Resource Reproduction and Resource Conservation in Modern Market Conditions] // Zhurnal «Problemy energo-i resursoberezheniya. – 2019. (In Russ.)
13. Melikulov A.D. i dr. [Factors Ensuring Long-Term Stability and Safety of Underground Mining Excavations in Mines and Ore Deposits under Conditions of Tectonic Process Manifestation] // Voprosy nauki i obrazovaniya. – 2019. (In Russ.)
14. Bakirov G. et al. METALL ROMLI MUSTAHKAMLAGICH EGILUVCHAN QISMINING ISH SHAROITLARINI BAHOLASH VA UNING REJIMINI BOSHQARISH // Sanoatda raqamli texnologiyalar/Цифровые технологии в промышленности. – 2023. – Vol. 1.

-
15. Sohibov I.Y. et al. “QIZIL-OLMA” KONI SHAROITIDA KON LAHIMLARIDAGI KON BOSIMINI EXAMINE 2D KOMPYUTER DASTURIDA HISOBLASH ISHLARINING TAHLILI // Finland International Scientific Journal of Education, Social Science & Humanities. – 2023. – Vol. 11.
 16. Yu G.N. et al. MAINTENANCE OF UNDERGROUND MINING DEVELOPMENTS IN SEISMIC-TECTONIC ACTIVE AREAS // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. – 2022.

Статья поступила в редакцию: 28.07.2026

Статья принята к публикации: 07.08.2026

Статья опубликована: 28.09.2026

УДК 669.213:622.775

Современные технологии извлечения серебра из медно-порфировых руд

Хасанов Абдурашид Солиевич

д-р техн. наук, проф.

Алмалыкский филиал Национального исследовательского технологического университета

«МИСус»

Республика Узбекистан, г. Алмалык

Мамаисакова Зебо Баходир кизи

базовый докторант

Алмалыкский филиал Национального исследовательского технологического университета

«МИСус»

Республика Узбекистан, г. Алмалык

E-mail: mamaisakovazebo@gmail.com

Modern technologies for silver extraction from copper-porphyry ores

Khasanov Abdurashid Solievich

doctor of Technical Sciences, Professor

Almalyk Branch of the National University of Science and Technology MISIS

Republic of Uzbekistan, Almalyk

Mamaisakova Zebo Bakhodir kizi

Basic Doctoral Student

Almalyk Branch of the National University of Science and Technology MISIS

Republic of Uzbekistan, Almalyk

Аннотация

Цель исследования — систематизировать и критически проанализировать современные технологические решения извлечения серебра, ассоциированного с медно-порфировыми рудами, с учётом специфики вещественного состава таких месторождений, где серебро преимущественно рассеяно в решётке сульфидов меди и не образует самостоятельных промышленных скоплений. Методология работы основана на анализе и обобщении отечественных и зарубежных научных публикаций 2018–2026 гг., патентных материалов, а также технологических данных действующих предприятий, в частности АО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат», и сравнительном сопоставлении показателей извлечения серебра при флотационном обогащении, автоклавном (окислительном) вскрытии, гидрометаллургическом (цианидном и тиосульфатном) и биогидрометаллургическом выщелачивании, а также электролитическом рафинировании меди. В результате показано,

Библиографическое описание: Хасанов А.С., Мамаисакова З.Б. кизи Современные технологии извлечения серебра из медно-порфировых руд // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 9(150). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23431>

что наибольшая доля серебра из медно-порфировых руд извлекается попутно с медным концентратом уже на стадии флотации, а последующее концентрирование происходит в металлургическом переделе и завершается в цехе аффинажа при переработке анодных шламов. Установлено, что перспективными направлениями повышения комплексности извлечения серебра являются оптимизация реагентных режимов флотации, применение автоклавного окисления упорных сульфидных концентратов и внедрение бесцианидных (тиосульфатных) и биогидрометаллургических методов доизвлечения. Сделан вывод о необходимости комплексного подхода, объединяющего обогащательный и металлургический переделы. Практическая значимость работы заключается в возможности использования результатов при обосновании направлений модернизации технологических схем переработки медно-порфировых руд Узбекистана и других регионов.

Abstract

The aim of the study is to systematize and critically analyze current technological solutions for extracting silver associated with copper-porphyry ores, taking into account the specific mineralogical composition of such deposits, where silver is predominantly dispersed within the lattice of copper sulfides rather than forming independent industrial concentrations. The methodology is based on the analysis and generalization of domestic and foreign scientific publications for 2018–2026, patent materials, and technological data of operating enterprises, in particular JSC Almalyk Mining and Metallurgical Combine, together with a comparative assessment of silver recovery achieved through froth flotation, pressure (autoclave) oxidation, hydrometallurgical (cyanide and thiosulfate) leaching, bio-hydrometallurgical leaching, and electrolytic copper refining. The results show that the largest share of silver contained in copper-porphyry ores is recovered jointly with the copper concentrate already at the flotation stage, with further concentration occurring during smelting and final recovery in the refinery through processing of anode slimes. Promising directions for increasing the completeness of silver recovery include optimization of flotation reagent regimes, the use of pressure oxidation of refractory sulfide concentrates, and the introduction of non-cyanide (thiosulfate) and bio-hydrometallurgical methods of additional recovery. It is concluded that an integrated approach combining beneficiation and metallurgical stages is required. The practical significance of the study lies in the possibility of using its results to justify directions for modernizing existing processing schemes for copper-porphyry ores in Uzbekistan and other regions.

Ключевые слова: серебро, медно-порфировые руды, флотационное обогащение, автоклавное окисление, гидрометаллургия, биовыщелачивание, аффинаж.

Keywords: silver, copper-porphyry ores, froth flotation, pressure oxidation, hydrometallurgy, bioleaching, refining.

Введение

Серебро остаётся одним из наиболее востребованных металлов современной промышленности: помимо традиционного ювелирного и монетарного применения, оно широко используется в электронике, фотовольтаике, каталитических системах и медицине. Специфика мирового рынка серебра состоит в том, что подавляющая его часть добывается не

на собственно серебряных месторождениях, а попутно при переработке свинцово-цинковых, медных и золотых руд. По данным The Silver Institute, в 2024 г. мировая добыча серебра из руд составила 819,7 млн унций [19], при этом, по оценкам отраслевых обзоров, от 70 до 80 % данного объёма приходится на попутное извлечение из руд иных металлов [19, 12].

Медно-порфировые месторождения занимают в этой структуре особое место. Серебро в них практически никогда не образует самостоятельных минеральных фаз и промышленных скоплений: оно рассеяно в виде изоморфных примесей и субмикроскопических включений в решётке сульфидов меди — халькопирита, борнита, теннантита, а также встречается в сростках с молибденитом, галенитом и сульфосолями свинца и сурьмы [9, 5, 14]. Данная особенность принципиально отличает медно-порфировые объекты от собственно серебряных и серебряно-полиметаллических месторождений: технология извлечения серебра здесь неотделима от общей технологической цепочки переработки медной руды — от обогащения до аффинажа.

Для Республики Узбекистан данная проблематика имеет непосредственное практическое значение. АО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат» (АГМК) является единственным производителем рафинированной меди в стране и одновременно обеспечивает около 90 % национального производства серебра [2, 1]. Минерально-сырьевой базой комбината служат медно-порфировые месторождения Кальмакыр и Сары-Чеку, а также вводимое в отработку месторождение Ёшлик-1, суммарные запасы которых оцениваются более чем в 45 млн т меди и свыше 5 тыс. т золота при сопоставимой значимости серебра как попутного компонента [1]. В рамках реализуемой до 2030 г. концепции развития комбината предусматривается увеличение годового производства меди почти в 3,3 раза — до 500 тыс. т — при инвестициях порядка 15 млрд долл., строительство обогатительной фабрики №3 и нового металлургического комплекса [10]. Подобная модернизация неизбежно затрагивает вопросы повышения комплексности извлечения драгоценных металлов, в том числе серебра.

Актуальность работы обусловлена, с одной стороны, стабильно высоким спросом на серебро и ограниченностью первичных сереброрудных объектов, а с другой — необходимостью повышения полноты извлечения попутных компонентов из перерабатываемого медного сырья в условиях ужесточения экологических требований и удорожания минерального сырья.

Целью настоящего исследования является систематизация и критический анализ современных технологических решений извлечения серебра из медно-порфировых руд на всех переделах — от обогащения до аффинажа, а также оценка перспектив их применения в условиях действующих и модернизируемых предприятий, в частности АО «Алмалыкский ГМК».

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: 1) проанализировать особенности вещественного состава медно-порфировых руд, определяющие поведение серебра в процессах переработки; 2) обобщить современные данные о флотационном обогащении как первичной стадии концентрирования серебра; 3) рассмотреть гидрометаллургические и биогидрометаллургические методы доизвлечения серебра, включая автоклавное окисление и бесцианидное выщелачивание; 4) описать финальные

металлургические переделы (плавка, электролитическое рафинирование, аффинаж), обеспечивающие получение товарного серебра; 5) провести сравнительный анализ рассмотренных технологий и сформулировать рекомендации для условий Узбекистана.

Материалы и методы

Методологическую основу исследования составил комплексный анализ и обобщение отечественных и зарубежных научных публикаций 2018–2026 гг., патентных материалов, а также открытых технологических и производственных данных действующих предприятий, в первую очередь АО «Алмалыкский ГМК» [2, 1, 10]. Поиск и отбор источников осуществлялся по базам данных КиберЛенинка, ResearchGate, ScienceDirect, MDPI, Springer, Nature, а также по материалам отраслевых организаций — The Silver Institute и Геологической службы США (USGS) [12–19].

В качестве объекта анализа рассматривались медно-порфировые руды, для которых характерна вкрапленная сульфидная минерализация — халькопирит, пирит, молибденит, борнит — с содержанием меди от 0,3 до 1,0 % и попутным содержанием серебра, как правило, не превышающим первые десятки граммов на тонну, что делает экономически оправданной лишь комплексную переработку руды с извлечением серебра совместно с медью и золотом.

Сравнительный анализ технологий проводился по следующим критериям: 1) степень извлечения серебра в готовый продукт (концентрат, слиток), %; 2) селективность процесса по отношению к сопутствующим компонентам (медь, железо, мышьяк); 3) расход реагентов и энергозатраты; 4) экологическая безопасность, в частности отказ от цианидов и снижение выбросов диоксида серы; 5) применимость к упорному сульфидному сырью, в том числе к халькопиритовым концентратам, трудно поддающимся вскрытию.

Для оценки технологических показателей использовались данные лабораторных и полупромышленных испытаний, приводимые в проанализированных публикациях [3, 4–9, 17, 18, 14], а также сведения о промышленной практике аффинажного производства [2]. Метод сравнительного сопоставления дополнялся анализом временной динамики развития технологий — от традиционного цианирования до современных бесцианидных и биогидрометаллургических решений [1, 8, 13, 15, 16].

Результаты и обсуждение

Флотационное обогащение как первичная стадия концентрирования серебра

Первичное концентрирование серебра из медно-порфировых руд происходит на стадии флотационного обогащения совместно с сульфидами меди. Поскольку серебро физически ассоциировано с решёткой халькопирита и других медных сульфидов, а также частично со сфалеритом, галенитом и блёклыми рудами, повышение селективности и полноты флотации медных минералов напрямую увеличивает извлечение серебра в концентрат [4, 9].

Традиционные реагентные схемы флотации медно-порфировых руд основаны на использовании ксантогенатов в сочетании с дитиофосфатами и известью в качестве регулятора среды [14]. Применение комбинированных собирателей позволяет одновременно

повысить извлечение меди, сурьмы и серебра: при флотации медно-полиметаллической руды месторождения Асгат (Монголия) смесь собирателей ADD и Z-200 в сочетании с жидким стеклом, гуматом и сульфитом натрия обеспечила прирост извлечения серебра на 9,26 % по сравнению с одним Z-200 при снижении расхода реагентов на 12,75 % [14]. Дополнительным резервом является электрохимическая обработка пульпы: поскольку большинство сульфидных минералов являются полупроводниками, такое воздействие изменяет их поверхностные свойства, улучшая селекцию минералов и повышая извлечение ценных компонентов при сокращении расхода реагентов [9].

Важным направлением остаётся селективное разделение халькопирита и пирита без применения цианидов. Показано, что сочетание селективных собирателей (C-4132, PAX, Z11, Flomin 7240) с бесцианидными депрессорами — известью, сульфитом натрия, лигносульфонатом натрия и декстрином — позволяет получить концентрат с извлечением меди 76,4 % при содержании меди 11,18 % [18]. Такие схемы одновременно снижают экологическую нагрузку и повышают комплексность извлечения ценных компонентов, включая серебро, поскольку депрессия пирита уменьшает разубоживание концентрата инертными сульфидами. Таким образом, флотационное обогащение остаётся ключевым переделом, на котором формируется основная часть извлекаемого серебра.

Автоклавное (окислительное) вскрытие сульфидных концентратов

Часть серебра, ассоциированного с упорными сульфидами, в первую очередь с халькопиритом, не может быть эффективно доизвлечена традиционными методами без предварительного окислительного вскрытия минеральной матрицы. Наиболее технологически апробированным решением здесь является автоклавное окисление (pressure oxidation, POX) — процесс, при котором сульфидная пульпа нагревается в автоклаве до температуры 180–230°C при парциальном давлении кислорода 3–10 бар [6, 5]. Такой режим обеспечивает окисление практически всех сульфидов, включая наиболее упорный халькопирит, при существенно меньшей продолжительности процесса (10–40 мин) по сравнению с атмосферными методами [6].

По данным исследований, при переработке сульфидного золотосодержащего концентрата по схеме «автоклавное окисление — цианирование кека» степень окисления сульфидов превышает 99 %, а извлечение золота из кека достигает 97 %, серебра — 91,6 % [5]. Введение галогенсодержащих реагентов (хлоридов, бромидов, иодидов) совместно с активированным углём способствует переводу золота и частично серебра в раствор с последующей сорбцией на уголь; извлечение золота при хлорсодержащих растворителях достигает 94,7–94,8 %, при иодидах и бромидах — 98–99 % [3].

Существенным преимуществом автоклавного окисления является отсутствие выбросов диоксида серы, характерных для традиционного окислительного обжига, поскольку сера окисляется преимущественно до сульфатной формы непосредственно в водной среде автоклава [6], что делает технологию привлекательной в условиях ужесточения природоохранных нормативов. Вместе с тем автоклавные методы требуют значительных капитальных затрат и тонкого измельчения концентрата, однако опыт зарубежных

предприятий, применяющих POX и его модификации NiPOX и ACTIVOX, подтверждает промышленную зрелость технологии для упорных золото-серебросодержащих концентратов [6].

Гидрометаллургические методы доизвлечения серебра

Классическим методом извлечения серебра из руд и концентратов остаётся цианидное выщелачивание, обеспечивающее до 80–90 % извлечения металла из руд коренных месторождений [1]. Однако применительно к медьсодержащему сырью цианирование сопряжено с существенным недостатком: цианистые растворы способны растворять не только золото и серебро, но и медь, что резко увеличивает расход реагента и снижает экономическую эффективность процесса [8].

В связи с этим активно исследуются бесцианидные, в частности тиосульфатные, методы выщелачивания. Их интенсификация достигается введением в пульпу аммиака и катализирующих ионов меди (Cu^{2+}), а также заменой тиосульфата натрия на тиосульфат аммония [1]. Преимуществом тиосульфатной системы является отсутствие осаждения золота и серебра на активированный уголь, что открывает возможность её применения для переработки углистых и сорбционно активных концентратов, цианирование которых малоэффективно [7]. Сдерживающими факторами остаются повышенные энергозатраты на подогрев пульпы и расход тиосульфата вследствие термохимического разложения; частичным решением служит выщелачивание при пониженной температуре с разбавлением пульпы и переходом на сорбционное выщелачивание [1].

Отдельного внимания заслуживают исследования по извлечению золота и серебра непосредственно из медьсодержащих цианистых растворов, образующихся при переработке медно-колчеданных руд. Установлено, что при использовании ионообменных смол — слабо- и сильноосновных, в частности Purogold S992 и Purogold A194, — вместо активированного угля увеличение концентрации цианида натрия снижает сорбцию меди и одновременно повышает сорбцию золота и, в меньшей степени, серебра; проведение выщелачивания до контакта пульпы с сорбентом увеличивает степень и скорость сорбции благородных металлов [11]. Подобные приёмы применимы и к медно-порфировому сырью, где серебро также сопутствует растворённой меди.

Биогидрометаллургическое выщелачивание

Биогидрометаллургические методы, основанные на использовании ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов родов *Acidithiobacillus* и *Leptospirillum*, рассматриваются как экологически более щадящая и энергетически менее затратная альтернатива традиционным гидрометаллургическим схемам [13, 15]. Бактериальное окисление сульфидных минералов протекает за счёт генерации ионов Fe^{3+} и серной кислоты, что приводит к переводу металлов в раствор в форме сульфатов [15].

Кучное и чановое бактериальное выщелачивание успешно применяется для извлечения меди из низкосортных руд и одновременно рассматривается как способ попутного извлечения серебра: бактериальное и химическое выщелачивание медьсодержащих руд с последующим цианированием кека позволяет доизвлечь остаточное серебро из

низкосортного сырья [13]. Развитие биовыщелачивания сдерживается изменением минералогии перерабатываемых руд в сторону труднообогатимого халькопирита на больших глубинах порфировых месторождений, а также дефицитом воды, вынуждающим переходить на солоноватые и морские воды [16]. Рассматривается и применение биовыщелачивания непосредственно в недрах (in situ biomining) для доработки целиков, остающихся при панельном обрушении на крупных порфировых месторождениях [16]. Ограничениями метода остаются низкая скорость процесса, чувствительность микроорганизмов к условиям среды и затруднённое окисление халькопирита [15, 16]; тем не менее в сочетании с автоклавным окислением биовыщелачивание может служить дополнительным источником извлечения серебра из бедного и забалансового сырья.

Пирометаллургическая переработка и аффинаж

Полученный на стадии флотации медный концентрат в дальнейшем подвергается плавке на штейн с последующим конвертированием и огневым рафинированием, в ходе которых серебро практически полностью концентрируется в черновой, а затем анодной меди [2]. Электролитическое рафинирование анодной меди обеспечивает финальную стадию концентрирования серебра: благородные металлы, включая серебро, золото, селен и теллур, не растворяются в электролите и накапливаются в шламе, оседающем на дне электролизных ванн [2].

На АО «Алмалыкский ГМК» переработка анодных шламов и получение товарных слитков золота и серебра осуществляется в цехе аффинажа, включающем отделение переработки шламов и отделение аффинажа золота, где сырьём служат аноды сплава серебристо-золотистого металла [2]. Основное требование передела — максимально полное извлечение золота, серебра, селена и теллура [2]. Здесь завершается цепочка, начатая флотацией: серебро, потерянное в хвостах обогащения, шлаках плавки и отвальных продуктах, уже не может быть восполнено на аффинаже, что подчёркивает значимость каждого предыдущего передела.

Сравнительный анализ технологий и перспективы для условий Узбекистана

Обобщение рассмотренных технологий показывает, что не существует единого универсального решения: каждый метод решает задачу на определённом переделе и для определённого типа сырья. Флотация обеспечивает извлечение основной массы серебра при относительно невысоких затратах, но её эффективность зависит от селективности реагентного режима и степени раскрытия сульфидов [18, 14]. Автоклавное окисление и биовыщелачивание востребованы для упорных концентратов и бедных, забалансовых руд, где традиционные методы малоэффективны [6, 5, 15, 16]. Бесцианидные, в частности тиосульфатные, методы выщелачивания — экологическая альтернатива цианированию, но пока уступают ему по экономике в промышленном масштабе [1, 7]. Финальное концентрирование серебра неизбежно происходит при плавке, конвертировании и электролитическом рафинировании меди, что делает аффинажное производство критически важным звеном всей цепи извлечения [2].

Применительно к условиям АО «Алмалыкский ГМК», реализующего программу модернизации с увеличением производства меди почти в 3,3 раза к 2031 г. [10], целесообразны следующие направления: оптимизация реагентных режимов флотации с использованием комбинированных собирателей и депрессоров нового поколения; внедрение автоклавного окисления упорных промпродуктов и пиритных хвостов с повышенным содержанием благородных металлов; изучение бесцианидных и биогидрометаллургических методов доизвлечения серебра из бедных руд месторождений Кальмакыр, Сары-Чеку и Ёшлик-1; модернизация аффинажного производства для минимизации потерь серебра на всех переделах.

Заключение

Проведённый анализ современных технологий извлечения серебра из медно-порфировых руд позволяет сформулировать следующие выводы.

Во-первых, специфика вещественного состава медно-порфировых руд, при которой серебро рассеяно в решётке медных сульфидов и практически не образует самостоятельных минеральных форм, обуславливает неразрывную связь технологии извлечения серебра с общей схемой переработки медного сырья — от флотационного обогащения до электролитического аффинажа.

Во-вторых, основная часть серебра извлекается уже на стадии флотационного обогащения совместно с медным концентратом, поэтому оптимизация реагентных режимов флотации — применение комбинированных собирателей, бесцианидных депрессоров пирита, электрохимической обработки пульпы — представляет собой наиболее экономически доступный резерв повышения комплексности извлечения.

В-третьих, для переработки упорного сульфидного сырья и доизвлечения серебра из бедных руд перспективны автоклавное окисление, а также бесцианидные (тиосульфатные) и биогидрометаллургические методы выщелачивания, обеспечивающие снижение экологической нагрузки при сопоставимых или более высоких показателях извлечения по сравнению с традиционным цианированием.

В-четвёртых, окончательное концентрирование и получение товарного серебра происходит на металлургическом переделе — при плавке, конвертировании и электролитическом рафинировании меди с последующей переработкой анодных шламов в цехе аффинажа, что делает данный передел ключевым звеном, определяющим итоговый показатель комплексного извлечения металла.

Практическая значимость работы состоит в возможности использования систематизированных данных для обоснования направлений модернизации технологических схем переработки медно-порфировых руд, в частности для АО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат», реализующего программу масштабного расширения производства до 2030–2031 гг. Дальнейшие исследования целесообразно направить на экспериментальное изучение поведения серебра при комбинировании автоклавного окисления с бесцианидным выщелачиванием применительно к конкретным типам руд месторождений Кальмакыр и Ёшлик-1, а также на технико-экономическую оценку внедрения предложенных решений в действующую технологическую схему комбината.

Список литературы

1. «Алмалыкский ГМК» имеет на своих месторождениях более 5 тысяч тонн золота. // РИА Новости / Прайм. Золото: [сайт]. – 2026. (дата обращения: 20.09.2026).
2. Акционерное общество «Алмалыкский горно-металлургический комбинат»: официальный сайт. URL:.. (дата обращения: 21.09.2026).
3. Болдырев А.В., Баликов С.В., Гудков С.С., Богородский А.В., Емельянов Ю.Е. Автоклавное окисление упорных золотосодержащих концентратов с использованием галогенсодержащих растворителей и сорбента // Цветные металлы. – 2015. – № 11. – С. 29–33. – DOI: 10.17580/tsm.2015.11.04.
4. Болдырев А.В., Баликов С.В., Гудков С.С., Емельянов Ю.Е., Богородский А.В. Оптимизация процесса автоклавно-сорбционного окисления упорных золотосодержащих концентратов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – № 12 (95). – С. 191–195.
5. Епифоров А.В., Баликов С.В., Шипнигов А.А. Поведение основных элементов при автоклавном окислении полиметаллического сульфидного флотоконцентрата, содержащего вольфрам и молибден // iPolytech Journal. – 2024. – Т. 28, № 3. – С. 538–546. – DOI: 10.21285/1814-3520-2024-3-538-546.
6. Зайцев П.В., Кравченко Н.А. Гидрометаллургическое извлечение меди и серебра из концентратов флотации смешанной руды // Цветные металлы. – 2020. – № 9 (933). – DOI: 10.17580/tsm.2020.09.07.
7. Лодейщиков В.В. Возможности и перспективы промышленного использования нецианистых растворителей золота и серебра // Золотодобыча. – 2012. – № 166. – С. 8–13.
8. Определены условия эффективного извлечения золота и серебра из низкосортных руд. // Уральский федеральный университет: официальный сайт. – 2023. (дата обращения: 19.09.2026).
9. Прохоров К.В., Копылова А.Е. Перспективные способы интенсификации процесса флотации медно-порфировых и золото-серебряных руд путем применения электрохимической обработки // Проблемы недропользования. – 2020. – № 2 (25). – С. 96–106. – DOI: 10.25635/2313–1586.2020.02.096.
10. Узбекский АГМК к 2031 г увеличит выпуск меди в 3,3 раза. // РИА Новости / Прайм. Золото: [сайт]. – 2024. (дата обращения: 22.09.2026).
11. Учёные придумали, как эффективно получать благородные металлы из медно-колчеданной руды. // Naked Science: [сайт]. – 2023. (дата обращения: 22.09.2026).
12. A.M. Hartingh. U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2025: Silver. (дата обращения: 22.09.2026).
13. Abraham A., Schopf S. Bioleaching as a biotechnological tool for metal recovery: from sewage to space mining // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. – 2025. – Т. 13. – Art. 1712157. – DOI: 10.3389/fbioe.2025.1712157.

14. Bian Z., Yan B., Liu Y., Jia X., Enkhtur O., Tumendelger A. Synergistic Recovery of Copper, Antimony, and Silver Refractory Sulfide Minerals Using an ADD/Z-200 Mixed Collector System // *Minerals*. – 2025. – Т. 15, № 11. – Art. 1219. – DOI: 10.3390/min15111219.
15. Biomining: A sustainable approach for metal recovery in low-grade ores. // *ScienceDirect*: [сайт]. – 2026. (дата обращения: 22.09.2026).
16. Brierley C.L., Brierley J.A. Progress in bioleaching: part B, applications of microbial processes by the minerals industries // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2022. – Т. 106. – P. 5913–5928. – DOI: 10.1007/s00253-022-12085-9.
17. Park I., Hong S., Jeon S., Ito M., Hiroyoshi N. A Review of Recent Advances in Depression Techniques for Flotation Separation of Cu–Mo Sulfides in Porphyry Copper Deposits // *Metals*. – 2020. – Т. 10, № 9. – Art. 1269. – DOI: 10.3390/met10091269.
18. Soltani F., Darabi H., Khodabandehlou F., Parvaneh A., Salehi H. Selective flotation of chalcopyrite over pyrite in a low-grade copper sulfide ore using selective collectors and non-cyanide depressants // *Scientific Reports*. – 2026. – DOI: 10.1038/s41598-026-49274-9.
19. The Silver Institute. World Silver Survey 2025: Silver Supply & Demand. – The Silver Institute, 2025. URL:.. (дата обращения: 22.09.2026).

References

1. «Almalykskii GMK» imeet na svoikh mestorozhdeniyakh bolee 5 tysyach tonn zolota [«Almalyk MMC» holds more than 5,000 tonnes of gold at its deposits]. RIA Novosti/Prime. Zoloto [Gold], 2026, March 16. RIA Novosti, 2026. (In Russ.)
2. Aktsionernoe obshchestvo «Almalykskii gorno-metallurgicheskii kombinat»: ofitsialnyi sait [JSC Almalyk Mining and Metallurgical Combine: official website]. (In Russ.)
3. Avtoklavnoe okislenie upornykh zolotosoderzhashchikh kontsentratov s ispolzovaniem galogensoderzhashchikh rastvoritelei i sorbenta [Autoclave oxidation of refractory gold-bearing concentrates using halogen-containing solvents and a sorbent]. Tsvetnye Metally [Non-Ferrous Metals]. (In Russ.)
4. Optimizatsiya protsessa avtoklavno-sorbtsionnogo okisleniya upornykh zolotosoderzhashchikh kontsentratov [Optimization of the autoclave-sorption oxidation process for refractory gold-bearing concentrates]. CyberLeninka. (In Russ.)
5. Povedenie osnovnykh elementov pri avtoklavnom okislenii polimetallichesкого sulfidnogo flotokontsentrata, sodержashchego volfram i molibden [Behavior of the main elements during autoclave oxidation of a polymetallic sulfide flotation concentrate containing tungsten and molybdenum]. CyberLeninka. // CyberLeninka. (In Russ.)
6. Gidrometallurgicheskoe izvlechenie medi i serebra iz kontsentratov flotatsii smeshannoi rudy [Hydrometallurgical recovery of copper and silver from flotation concentrates of mixed ore]. Tsvetnye Metally [Non-Ferrous Metals]. (In Russ.)
7. Vozmozhnosti i perspektivy promyshlennogo ispolzovaniya netsianistykh rastvoritelei zolota i serebra [Prospects for the industrial use of non-cyanide solvents for gold and silver]. Zolotodobycha [Gold Mining]. (In Russ.)

8. Opredeleyeny usloviya effektivnogo izvlecheniya zolota i serebra iz nizkosortnykh rud [Conditions for efficient recovery of gold and silver from low-grade ores determined]. Uralskii federalnyi universitet: ofitsialnyi sait [Ural Federal University: official website]. Ural Federal University. (In Russ.)
9. Perspektivnye sposoby intensivifikatsii protsessa flotatsii medno-porfirovykh i zoloto-serebryanykh rud putem primeneniya elektrokhimicheskoi obrabotki [Promising ways to intensify flotation of copper-porphyry and gold-silver ores using electrochemical treatment]. CyberLeninka. (In Russ.)
10. Uzbekskii AGMK k 2031 g uvelichit vypusk medi v 3,3 raza [By 2031, Uzbekistan's Almalyk MMC to increase copper output 3.3-fold]. RIA Novosti/Prime. Zoloto [Gold], 2024, June 28. RIA Novosti, 2024. (In Russ.)
11. Uchenye pridumali, kak effektivno poluchat blagorodnye metally iz medno-kolchedannoi rudy [Scientists have found a way to efficiently recover precious metals from copper-pyrite ore]. Naked Science, 2023. (In Russ.)
12. U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2025: Silver / A.M. Hartingh. Reston, VA, USGS, 2025.
13. Bioleaching as a biotechnological tool for metal recovery: from sewage to space mining. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. – 2025.
14. Synergistic Recovery of Copper, Antimony, and Silver Refractory Sulfide Minerals Using an ADD/Z-200 Mixed Collector System. Minerals, 2025, vol. 15, ar // Minerals. – 2025. – Vol. 1219, No. 11. – Art. 1219. – DOI: 10.3390/min15111219.
15. Biomining: A sustainable approach for metal recovery in low-grade ores. ScienceDirect. – 2026.
16. Progress in bioleaching: part B, applications of microbial processes by the minerals industries. PMC (National Library of Medicine), 2022. PMC (National Library of Medicine), 2022.
17. A Review of Recent Advances in Depression Techniques for Flotation Separation of Cu–Mo Sulfides in Porphyry Copper Deposits. Metals, 2020, vol. 10, ar // Metals. – 2020. – Vol. 1269, No. 9. – Art. 1269. – DOI: 10.3390/met10091269.
18. Selective flotation of chalcopyrite over pyrite in a low-grade copper sulfide ore using selective collectors and non-cyanide depressants. Scientific Reports. – 2026. – DOI: 10.1038/s41598-026-49274-9.
19. The Silver Institute. World Silver Survey 2025: Silver Supply & Demand. 2025. The Silver Institute, 2025.

UNIVERSUM: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Электронный научный журнал

№ 9(150)

Сентябрь 2026 г.

Часть 3

Свидетельство о регистрации СМИ: ЭЛ № ФС 77 – 54434 от 17.06.2013

Мнение авторов может не совпадать с позицией редакции.

Издание содержит научную информацию и в соответствии с ч. 4 ст. 1
Федерального закона от 29.12.2010 № 436-ФЗ «О защите детей от информации,
причиняющей вред их здоровью и развитию» не подлежит классификации
(маркировке) по возрастным категориям

Издательство ООО «Юниверсум»

Объём издания: 84 с.

Минимальные системные требования: процессор с частотой от 1,3 ГГц; ОЗУ от
512 МБ; программа для чтения PDF-файлов; доступ к сети Интернет

Дата размещения в сети Интернет: 28.09.2026

Журнал размещается в:

CYBERLENINKA

e НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ
БИБЛИОТЕКА
LIBRARY.RU

Google
scholar

U **ULRICHSWEB**
GLOBAL SERIALS DIRECTORY

>BASE

СОЦИОНЕТ

OpenAIRE



Registry of Open Access
Repositories (ROAR)