

8(149)

Владимир Михайлович Чаплин (28 июля (9 августа) 1861 — 10 ноября 1931) — русский и советский учёный, специалист в области отопительно-вентиляционной техники.

Дед писательницы Веры Чаплиной[2].
Потомственный дворянин из рода Чаплиных, восходящего[3] ко Льву Чаплину (середина XV века)[4].

В 1883 году окончил Императорское Московское техническое училище (ИМТУ), а в 1898 году получил в училище должность профессора. В 1898—1909 гг. также преподавал в Московском Училище живописи, ваяния и зодчества.

В 1895 году вместе с коллегой по ИМТУ архитектором В. Г. Залесским Чаплин организовал торговый дом «В. Залесский и В. Чаплин». В 1902 году Залесский и Чаплин построили собственный дом на Большой Дмитровке, 16, в котором их семьи имели по отдельному этажу и где располагались помещения их технической конторы[5]. Среди реализованных проектов торгового дома «В. Залесский и В. Чаплин» — системы отопления и вентиляции почти 1500 зданий[6] в десятках городах Российской Империи: Музей изящных искусств имени императора Александра III, Румянцевский музей, Политехнический музей, Аудиторный корпус Московского университета, Императорское Московское техническое училище, Московское училище живописи, ваяния и зодчества, Александровское военное училище, Брестский (Белорусский) вокзал, автозавод А. М. О., Сандуновские бани, гостиница Метрополь, ресторан Эрмитаж, здание страхового общества «Россия», Алексеевская глазная больница, странноприимный дом Шереметева, храм Василия Блаженного, склеп великого князя Сергея Александровича в Чудовом монастыре, Перервинский монастырь, Заиконоспасский монастырь, храм Марфо-Мариинской обители — все в Москве; храм-усыпальница Юсуповых в Архангельском, Петербургская городская детская больница, Путиловский завод, Архангельские городские ряды, Нижегородский городской театр, Киевский коммерческий институт, царский дворец в Ливадии, Иркутский завод «Треугольник», детская больница в Баку, фабрика Столыпина в Пензе, храм Казанской Божией матери в Риге, электрическая станция в Рязани, Тамбовский пороховой завод, Волжский Канальный банк в Самаре, Калужское Епархиальное училище, Императорский Харьковский университет и многие другие.

В 1903 году В. М. Чаплин создал первую в России систему водяного отопления с радиаторами. Предложенная им водяная система была прототипом широко применяемых в настоящее время систем отопления с радиаторами. Система была запатентована, а также получила признание на всемирной выставке в Париже 1904 года.



165 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ
9 августа 2026 г.

ЧАПЛИН
ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ
1861-1931 гг.



UNIVERSUM: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научный журнал

Издается ежемесячно с ноября 2013 года

Выпуск: 8(149)

Август 2026 г.

Часть 4

Новосибирск
2026

Главный редактор журнала:

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

Редакционная коллегия:

Абдуллин Тимур Зуфарович – канд. техн. наук;

Колесников Александр Сергеевич – канд. техн. наук, проф.;

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

Мартышкин Алексей Иванович – канд. наук, доц.;

Мерганов Аваз Мирсултанович – 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.;

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.;

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

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

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

Кокшаров Сергей Александрович – д-р техн. наук, проф.

U55 Universum: технические науки : электронный научный журнал. — № 8(149). — Часть 4. — Новосибирск : Изд-во «Юниверсум», 2026. — 72 с. — Текст : электронный. — URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/category/8149> (дата публикации: 28.08.2026).

Содержание

Статьи на русском языке

Промышленность и производство

Металлургия, материаловедение и горное дело

- Математическое моделирование процесса очистки нефти от ультрадисперсных абразивных частиц** 4

Алимбабаева Зулхумор Латиповна

Каримов Шоирджан Ахралович

Шакиров Шухрат Мусаевич

Камилова Гулчехра Муратджановна

- Технико-экономический анализ технологий формирования скважинных зарядов и применения комбинированных взрывчатых веществ в обводнённых скважинах** 13

Насиров Уткир Фатидинович

Сапаров Мейлис Аннакличевич

Сафарова Мафтуна Давроновна

Заирова Рушана Шерзодовна

- Полупромышленные испытания по переработке упорных углеродистых золотосодержащих руд комбинированными методами** 25

Эргашев Улугбек Абдурасулович

Чулиев Фархад Гафурович

Кароматов Санъат Сафоевич

Фармонов Илхомжон Эркинжон угли

- Предварительная гидрометаллургическая переработка конвертерной пыли медеплавильного производства методом сернокислотного выщелачивания** 39

Эшонкулов Учкун Худайназар угли

Хакбердиев Дилшод Кодир угли

Текстильная и лёгкая промышленность

- Разработка крупноузорчатой жаккардовой махровой ткани с повышенными гигроскопическими свойствами и экономической эффективностью** 49

Расулов Хамза Юлдошевич

Узоков Умид Толибович

Ганишер Эшмаматов

- Разработка и оптимизация базальтосиликонового покрытия на основе местного сырья для противопожарной защиты транспортных средств** 60

Сиддиков Икромжон Иминжонович

Соттикулов Элёр Сотимбоевич

Эшматов Бобиржон Мамиржонович

СТАТЬИ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ**ПРОМЫШЛЕННОСТЬ И ПРОИЗВОДСТВО****МЕТАЛЛУРГИЯ, МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ГОРНОЕ ДЕЛО**

Статья поступила в редакцию: 21.07.2026

Статья принята к публикации: 31.07.2026

Статья опубликована: 25.08.2026

УДК 665.6+519.6

**Математическое моделирование процесса очистки нефти от
ультрадисперсных абразивных частиц**

Алимбабаева Зулхумор Латиповна

*доц. кафедры Общепрофессиональные дисциплины, Российский государственный
университет нефти и газа имени И.М. Губкина, Филиал в городе Ташкенте*

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: alimbabaevazulxumor@gmail.com

Каримов Шоирджан Ахрарович

проф. кафедры Материаловедение

Ташкентский государственный технический университет им. Ислама Каримова

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: karimovsh@mail.ru

Шакиров Шухрат Мусаевич

д-р техн. наук

доц. кафедры Материаловедение, Ташкентский государственный технический университет

им. Ислама Каримова

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: shuhratshakirov71@gmail.com

Камилова Гулчехра Муратджановна

ст. преп. кафедры Материаловедение, Ташкентский государственный технический

университет им. Ислама Каримова

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: kamilova1988@internet.ru

Mathematical modeling of the process of oil purification from ultradispersed abrasive particles

Alimbabaeva Zulkhumor Latipovna

Associate Professor

of the Department of General Professional Disciplines Branch of the Russian State University of Oil and Gas (National Research University) named after I.M. Gubkin in Tashkent

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Karimov Shoirjan Akhralovich

professor

Department of Materials Science Tashkent State Technical University named after Islam Karimov

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Shakirov Shukhrat Musaeovich

doctor of Technical Sciences, Associate Professor

of the Department of Materials Science, Tashkent State Technical University named after Islam

Karimov

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Kamilova Gulchekhra Muratjanovna

senior Lecturer

Department of Materials Science, Tashkent State Technical University named after Islam Karimov

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Очистка нефти от ультрадисперсных абразивных частиц является актуальной задачей, поскольку наличие твердых примесей в нефтяных потоках приводит к повышенному износу оборудования и снижению качества технологических процессов. Эффективность работы фильтрующих элементов во многом определяется особенностями поровой структуры и характером распределения задерживаемых частиц внутри материала. Целью исследования является разработка математической модели процесса очистки нефти с использованием пористого проницаемого материала с градиентным изменением диаметра поровых каналов по толщине фильтрующей стенки. Применены методы математического моделирования фильтрационных процессов в неоднородных пористых средах с использованием закона Дарси, уравнения Козени–Кармана и подходов теории гомогенизации. Разработана одномерная модель фильтрующего элемента, учитывающая изменение диаметра каналов от входной к выходной поверхности при сохранении постоянной общей пористости. Уменьшение диаметра поровых каналов в направлении движения жидкости обеспечивает более равномерное распределение загрязнений и снижает вероятность локального закупоривания фильтра. Математическая модель позволяет оценивать изменение локальных характеристик фильтрационного процесса по толщине фильтрующего элемента с учетом его геометрических и структурных параметров. Градиентное распределение размеров поровых каналов обеспечивает последовательное задержание частиц различного размера и

Библиографическое описание: Математическое моделирование процесса очистки нефти от ультрадисперсных абразивных частиц // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Алимбаева З.Л. [и др.]. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23256>

способствует увеличению срока службы фильтрующего материала. Разработанный подход может применяться при создании металлокерамических фильтров с заданными эксплуатационными свойствами для глубокой очистки нефти и нефтепродуктов.

Abstract

Removing ultrafine abrasive particles from oil is a pressing issue, as the presence of solid impurities in oil streams leads to increased equipment wear and reduced process quality. The efficiency of filter elements is largely determined by the pore structure and the distribution of retained particles within the material. The aim of this study is to develop a mathematical model of the oil purification process using a porous permeable material with a gradient change in pore channel diameter across the filter wall thickness. Methods of mathematical modeling of filtration processes in heterogeneous porous media are applied, employing Darcy's law, the Kozeny-Karman equation, and approaches from homogenization theory. A one-dimensional model of the filter element has been developed, accounting for the change in channel diameter from the inlet to the outlet surface while maintaining constant overall porosity. A decrease in pore channel diameter in the direction of fluid flow ensures a more uniform distribution of contaminants and reduces the likelihood of localized filter clogging. The mathematical model allows for the evaluation of changes in local filtration characteristics across the thickness of the filter element, taking into account its geometric and structural parameters. The gradient distribution of pore channel sizes ensures consistent retention of particles of varying sizes and helps extend the service life of the filter material. The developed approach can be applied to the creation of metal-ceramic filters with specified performance properties for the deep purification of oil and petroleum products.

Ключевые слова: математическое моделирование, пористый проницаемый материал, градиентная пористость, фильтрация нефти, ультрадисперсные частицы, гомогенизация, проницаемость.

Keywords: mathematical modeling, porous permeable material, gradient porosity, oil filtration, ultrafine particles, homogenization, permeability.

Введение

Современные нефтеперерабатывающие процессы предъявляют повышенные требования к качеству очистки нефти от механических примесей. Особую опасность представляют ультрадисперсные абразивные частицы, которые способны проникать в рабочие узлы оборудования, вызывая интенсивный износ поверхностей и снижение эксплуатационной надежности технологических систем. Одним из эффективных способов удаления твердых загрязнений является применение пористых проницаемых материалов, в которых очистка осуществляется за счет глубинного механизма фильтрации. В отличие от поверхностных фильтров, такие материалы обеспечивают задержание частиц в объеме поровой структуры, однако их эксплуатационные характеристики существенно зависят от распределения размеров поровых каналов и характера заполнения пор загрязняющими компонентами. [1, с. 15–25; 7, с. 20–30]. Известно, что традиционные пористые фильтрующие материалы с однородной структурой часто имеют ограниченный ресурс работы вследствие локального накопления частиц в области входной поверхности. В связи

с этим одним из перспективных направлений является создание материалов с градиентной структурой порового пространства, позволяющей регулировать движение жидкости и распределение задерживаемых частиц внутри фильтра [1, с. 25–35; 10, с. 6–8]. Для описания процессов переноса жидкости и твердых частиц в пористых средах применяются различные математические подходы, включая методы математического моделирования и теории усреднения (гомогенизации) [9, с. 20–35; 8, с. 40–55; 5, с. 30–45]. Теория гомогенизации — один из многомасштабных методов, позволяющих определять эффективные свойства гетерогенных сред с микро- и макроскопическими структурами. Наиболее важным преимуществом этого метода при моделировании материалов является его способность учитывать постепенное изменение диаметра пористых каналов или пористости в макроскопическом масштабе (вдоль толщины стенки). Поэтому сегодня теория гомогенизации является наиболее эффективным инструментом для изучения материалов с градиентной структурой [3, с. 60–80]. Несмотря на существенный прогресс в области численного моделирования, существующие модели недостаточно полно описывают процессы постепенного засорения поровых каналов фильтрующих материалов с градиентной структурой. Это обуславливает необходимость разработки более адекватных математических моделей, учитывающих изменение пористой структуры по толщине фильтра и накопление механических примесей в процессе эксплуатации [4, с. 40–60; 11, с. 80–100; 2, с. 560–570]. Целью исследования является разработка математической модели процесса очистки нефти от ультрадисперсных абразивных частиц через пористый проницаемый материал с градиентной структурой порового пространства. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: разработка геометрической модели фильтрующего материала с изменением диаметра поровых каналов по толщине стенки; определение зависимостей изменения проницаемости и параметров переноса частиц; исследование распределения давления и концентрации загрязняющих частиц в процессе фильтрации.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования рассматривается процесс очистки нефти от ультрадисперсных абразивных частиц с использованием пористого проницаемого металлокерамического материала с градиентной структурой порового пространства. В отличие от фильтрующих материалов с однородной структурой, в рассматриваемом материале диаметр поровых каналов изменяется по толщине фильтрующей стенки, что позволяет регулировать процесс задержания твердых частиц и распределение загрязнений внутри фильтра [3, с. 60–80]. Для построения модели, основанной на теории гомогенизации, необходимо сначала разработать геометрию пористого абсорбирующего материала и основные физические параметры процесса. На рисунке 1 показана принятая схема для пористого абсорбирующего материала для разработки математической модели, основанной на теории гомогенизации пористого абсорбирующего материала.

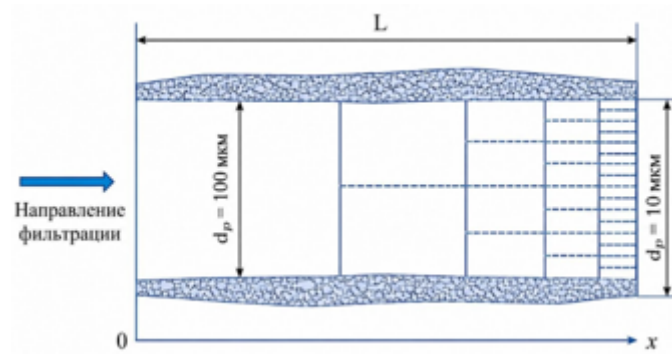


Рисунок 1. Схема пористого фильтра с градиентным изменением диаметра пор по толщине фильтрующего элемента

Для математического описания процесса фильтрации принята одномерная модель пористого материала по толщине фильтрующей стенки. На рис.1 представлена толщина материала обозначена через L , координата x направлена вдоль движения нефтяного потока, $x = 0$ — начало координат. Диаметр пор на входе $d_{p0} = 100$ мкм; $d_{pL} = 10$ мкм диаметр пор на выходе [1, с. 50–60]. При этом $x = 0$ соответствует входной поверхности фильтра, через которую поступает загрязненная нефть, $x = L$ — выходной поверхности, через которую выходит очищенная нефть. Общая пористость материала принимается постоянной величиной $\varepsilon = 0,6$ (60 %) [2, с. 50–60]. При этом диаметр поровых каналов изменяется по толщине фильтрующей стенки по линейному закону:

$$d_p(x) = d_{p0} - \frac{d_{p0} - d_{pL}}{L} \cdot x$$

где: d_{p0} — диаметр порового канала на входной поверхности фильтра, мкм;

d_{pL} — диаметр порового канала на выходной поверхности фильтра, мкм;

L — толщина фильтрующей стенки фильтра, мм;

x — координата, отсчитываемая от входной поверхности фильтра вдоль толщины стенки, мм.

Пористость пористого проницаемого материала не изменяется с толщиной стенки, т.е. $\varepsilon = \text{const}$, но поперечный диаметр пористых каналов уменьшается с толщиной стенки, и в результате общая пористость ε не изменяется, а число пористых каналов n увеличивается. Математическое выражение для этого приведено ниже:

$$n(x) = \frac{4\varepsilon}{\pi \cdot d_p^2(x)}$$

где $n(x)$ — число пористых каналов в поперечном сечении пористого материала. Из приведенного выражения видно, что с уменьшением $d_p(x)$ число $n(x)$ увеличивается [4, с. 100–110; 11, с. 50–60].

Рисунок 1 полностью отражают геометрические параметры пористого абсорбирующего материала, которые изменяются в зависимости от диаметра пористого канала и толщины стенки материала.

Разработка физических параметров для математической модели

Для потока жидкости (масла или нефтепродуктов) через пористый проницаемый материал используется закон Дарси, [8, с. 100–120] который выражается следующим образом:

$$u(x) = -\frac{k(x)}{\mu} \cdot \frac{dp}{dx},$$

где $u(x)$ — скорость фильтрации в пористом проницаемом материале, м/с;

$k(x)$ – проницаемость пористого проницаемого материала, м³;

μ – вязкость очищаемой жидкости, Па·с;

$p(x)$ – давление очищаемой жидкости, Па.

Согласно закону сохранения массы, скорость потока жидкости в стационарном состоянии постоянна. Подобные математические зависимости применяются при моделировании процессов переноса в пористых средах [5, с. 100–120].

$$\frac{du}{dx} = 0 \Rightarrow u(x) = U = \text{const},$$

где U — скорость фильтрации, постоянная по всему пористому материалу.

Уравнение сохранения массы для частиц в фильтруемой жидкости выражается следующим образом [3, с. 120–130; 10, с. 70–80]:

$$U \cdot \frac{dc}{dx} = -\Lambda(x) \cdot c(x),$$

где $c(x)$ — концентрация абразивных частиц в жидкости, кг/м³;

$\Lambda(x)$ — локальный коэффициент поглощения пористых каналов 1/с.

Проницаемость $k(x)$ пористого проницаемого материала, используя уравнение Козени-Кармана, применяемого для оценки характеристик пористых материалов, определяется следующим выражением [1, с. 100–110; 7, с. 120–130].

$$k(x) = \frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^2} \cdot \frac{d_p^2(x)}{180},$$

Коэффициент поглощения $\Lambda(x)$ пористых каналов пористого проницаемого материала определяется числом пористых каналов и абсорбционной способностью одного пористого канала следующим образом.

$$\Lambda(x) = n(x) \cdot \frac{3(1-\epsilon)}{2d_p(x)} \cdot \eta \cdot U,$$

где η — эффективность столкновения частиц, не имеющая единиц измерения и обычно принимаемая в диапазоне 0,01...0,05.

Окончательное выражение для определения локального коэффициента поглощения имеет следующий вид [4, с. 150–160; 11, с. 80–90]:

$$\Lambda(x) = \frac{6\varepsilon(1-\varepsilon)}{\pi} \cdot \eta \cdot U \cdot \frac{1}{d_p^3(x)}.$$

Результаты и обсуждение

На основе разработанной математической модели выполнено численное исследование процесса очистки нефти от ультрадисперсных абразивных частиц в пористом материале с градиентной структурой порового пространства. Моделирование позволило оценить влияние структурных параметров материала на процессы переноса жидкости и удержания твердых частиц [8, с. 100–120; 4, с. 80–100]. Расчеты проведены для фильтрующего элемента толщиной 3 мм при постоянной пористости $\varepsilon = 0,6$. Диаметр поровых каналов изменялся по толщине материала от 100 мкм на входной поверхности до 10 мкм на выходной поверхности. Подобное изменение структуры порового пространства позволяет регулировать фильтрационные характеристики материалов и повышать эффективность очистки.

В результате расчета установлено, что уменьшение диаметра поровых каналов приводит к снижению проницаемости материала и увеличению способности удержания абразивных частиц. Вследствие этого концентрация механических примесей постепенно уменьшается по толщине фильтра, что обеспечивает повышение эффективности очистки и увеличение срока службы фильтрующего элемента. Изменение геометрических параметров порового пространства по толщине фильтра представлено в таблице 1.

Таблица 1.

Исходные параметры математической модели пористого проницаемого материала

Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
Толщина фильтрующей стенки	L	3	мм
Координата входной поверхности	$x = 0$	Вход нефти	—
Координата выходной поверхности	$x = L$	3	мм
Общая пористость материала	ε	0,6	—
Диаметр порового канала на входе	$d(0)$	100	мкм
Диаметр порового канала на выходе	$d(L)$	10	мкм
Характер изменения диаметра пор	$d(x)$	$100 \rightarrow 10$	мкм

Анализ результатов численного моделирования показывает, что по мере уменьшения диаметра поровых каналов проницаемость материала снижается, а эффективность задержания абразивных частиц возрастает. В результате концентрация механических примесей постепенно уменьшается по толщине фильтрующего материала. На выходной поверхности фильтра обеспечивается высокая эффективность очистки, что свидетельствует о преимуществах применения градиентной структуры порового пространства [8, с. 100–120; 4, с. 80–100]. При этом распределение частиц по толщине фильтра становится более равномерным, что уменьшает вероятность локального закупоривания входной зоны

и способствует увеличению срока службы фильтрующего элемента. Анализ результатов моделирования показывает, что уменьшение диаметра поровых каналов по направлению движения потока приводит к снижению проницаемости материала и одновременному увеличению коэффициента задержания абразивных частиц. В результате концентрация механических примесей постепенно уменьшается по толщине фильтра, что подтверждает эффективность применения градиентной структуры порового пространства и способствует более равномерному распределению загрязняющих частиц в объеме материала.

Заключение

Разработана математическая модель процесса очистки нефти и нефтепродуктов от ультрадисперсных абразивных частиц с использованием пористого проницаемого материала с градиентной структурой порового пространства. Модель учитывает изменение диаметра поровых каналов по толщине фильтрующей стенки при постоянной общей пористости материала. На основе закона Дарси, уравнения Козени–Кармана и уравнения переноса частиц получены зависимости для оценки проницаемости, распределения давления и концентрации частиц в процессе фильтрации. Результаты моделирования показали, что градиентная структура порового пространства обеспечивает более равномерное распределение задерживаемых частиц, снижает вероятность локального закупоривания пор и способствует увеличению срока службы фильтрующего элемента.

Список литературы

1. Александрова, С.С. Процессы и теория статического уплотнения порошковых материалов: учебное пособие / С.С. Александрова, М.М. Серов. – Москва: МАИ, 2022. – 86 с.
2. Веригин, Н.Н. Моделирование фильтрационных процессов в пористых средах / Н.Н. Веригин, В.В. Жолобов // Водные ресурсы. – 2019. – Т. 46, № 5. – С. 560–570.
3. Жиков, В.В. Усреднение дифференциальных операторов / В.В. Жиков. – Москва: Физматлит, 2003. – 464 с.
4. Кузнецов, А.В. Моделирование фильтрации жидкостей через пористые материалы / А.В. Кузнецов, А.М. Максимов. – Москва: Издательство МГУ, 2020. – 220 с.
5. Кутепов, А.М. Математическое моделирование процессов переноса в пористых средах / А.М. Кутепов, В.Н. Соколов. – Москва: Наука, 2016. – 280 с.
6. Либенсон, Г.А. Процессы порошковой металлургии. Т. 1. Производство металлических порошков / Г.А. Либенсон, В.Ю. Лопатин, Г.В. Комарницкий. – Москва: МИСиС, 2001. – 368 с.
7. Нечаев, В.В. Металлокерамические материалы и фильтрующие элементы/ В.В. Нечаев, В.А. Сафонов. – Москва: Интернет Инжиниринг, 2002. – 256 с.
8. Полежаев, В.И. Математическое моделирование процессов переноса в многофазных средах / В.И. Полежаев, А.В. Вязьмин. – Москва: Наука, 2008. – 320 с.
9. Самарский, А.А. Математическое моделирование: идеи, методы, примеры / А.А.Самарский, А.П. Михайлов. – Москва: Физматлит, 2005. – 320 с.

10. Федотов, А.С. Основные свойства, способы получения и направления применения пористых керамических материалов / А.С. Федотов, Д.Ю. Грачев, Р.Д. Капустин // Нефтехимия. – 2024. – Т. 64, № 4. – С. 1–34.
11. Шеремет, М.А. Численное моделирование процессов переноса в пористых средах / М.А. Шеремет. – Москва: Юрайт, 2021. – 260 с.

References

1. Aleksandrova S.S., Serov M.M. [Processes and theory of static compaction of powder materials]. Moscow, MAI Publ., 2022. 86 P. (In Russ.)
2. Verigin N.N., Zholobov V.V. [Modeling of filtration processes in porous media]. Vodnye resursy, 2019, vol. 46, no. 5, P. 560–570. (In Russ.)
3. Zhikov V.V. [Averaging of differential operators]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 464 P. (In Russ.)
4. Kuznetsov A.V., Maksimov A.M. [Modeling of fluid filtration through porous materials]. Moscow, Moscow State University Publ., 2020. 220 P. (In Russ.)
5. Kutepov A.M., Sokolov V.N. [Mathematical modeling of transport processes in porous media]. Moscow, Nauka Publ., 2016. 280 P. (In Russ.)
6. Libenson G.A., Lopatin V.Yu., Komarnitskiy G.V. [Powder metallurgy processes. Vol. 1. Production of metal powders]. Moscow, MISiS Publ., 2001. 368 P. (In Russ.)
7. Nechaev V.V., Safonov V.A. [Cermets materials and filter elements]. Moscow, Internet Inzhiniring Publ., 2002. 256 P. (In Russ.)
8. Polezhaev V.I., Vyaz'min A.V. [Mathematical modeling of transport processes in multiphase media]. Moscow, Nauka Publ., 2008. 320 P. (In Russ.)
9. Samarskiy A.A., Mikhaylov A.P. [Mathematical modeling: ideas, methods, examples]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005. 320 P. (In Russ.)
10. Fedotov A.S., Grachev D.Yu., Kapustin R.D. [Basic properties, production methods, and application areas of porous ceramic materials]. Neftekhimiya, 2024, vol. 64, no. 4, P. 1–34. (In Russ.)
11. Sheremet M.A. [Numerical modeling of transport processes in porous media]. Moscow, Yurayt Publ., 2021. 260 P. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию: 26.06.2026

Статья принята к публикации: 04.07.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 622.235+662.2

DOI: 10.32743/UniTech.2026.149.8.23148

Технико-экономический анализ технологий формирования скважинных зарядов и применения комбинированных взрывчатых веществ в обводнённых скважинах

Насиров Уткир Фатидинович

д-р техн. наук, проф.

Филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСИС» в г.

Алмалык

Республика Узбекистан, г. Алмалык

E-mail: u_nosirov@mail.ru

Сапаров Мейлис Аннакличевич

начальник

производственно-технического отдела рудника Ауминзо-Амантой Северного рудоуправления

АО Навоийский ГМК

Республика Узбекистан, г. Зарафшан

E-mail: m.saparov@ngmk.uz

Сафарова Мафтуна Давроновна

докторант кафедры

Горное дело, Навоийский государственный горно-технологический университет

Республика Узбекистан, г. Навои

E-mail: maftunasafarova2806@gmail.com

Заирова Рушана Шерзодовна

студент

Филиала Национального исследовательского технологического университета МИСИС в г.

Алмалык

Республика Узбекистан, г. Алмалык

E-mail: sher-z@mail.ru

Technical and economic analysis of borehole charge formation technologies and the use of combined explosives in water-saturated boreholes

Nasirov Utkir Fatidinovich

doctor of Technical Sciences, Professor

Branch of the National Research Technological University MISIS in Almalyk

Uzbekistan, Almalyk

Saparov Meilis Annaklichevich

Head of the Production and Technical Department of the Auminzo-Amantoy mine of the Northern

Mining Department of Navoi MMC JSC

Uzbekistan, Zarafshan

Safarova Maftuna Davronovna

Doctoral student

at the Department of Mining at Navoi State University of Mining and Technology

Uzbekistan, Navoi

Zairova Rushana Sherzodovna

student at the Branch of the National Research, Technological University MISIS in Almalyk

Uzbekistan, Almalyk

Аннотация

Целью настоящего исследования является анализ современного состояния и технико-экономическая оценка технологий формирования скважинных зарядов взрывчатых веществ в условиях обводнённых горных пород. Методологическую основу работы составляет систематический обзор отечественных и зарубежных литературных источников, посвящённых методам взрывания в водонасыщенных скважинах, с применением сравнительного анализа технологических решений по критериям надёжности, экономической эффективности и управляемости взрывного воздействия. В ходе исследования выявлены и систематизированы шесть основных направлений технологий взрывания в обводнённых скважинах: применение водоустойчивых взрывчатых веществ, использование гидроизолирующих оболочек, предварительное осушение скважин, формирование комбинированных зарядов, предварительное разупрочнение массива и применение специальных конструкций зарядов. Установлено, что каждое из рассмотренных технологических направлений обладает определёнными преимуществами, однако характеризуется существенными ограничениями в части управления энергетическим воздействием на приконтурную зону. Показано, что вопросы сохранения устойчивости приконтурного массива, ограничения глубины техногенной нарушенности и снижения интенсивности заколообразования при контурном взрывании в условиях обводнения остаются недостаточно изученными. Практическая значимость работы состоит в систематизации существующих технологических решений, выявлении пробелов в научно-технической базе и обосновании направлений дальнейшего совершенствования технологий контурного взрывания в обводнённых скважинах, в том числе с применением комбинированной инертной забойки.

Библиографическое описание: Техничко-экономический анализ технологий формирования скважинных зарядов и применения комбинированных взрывчатых веществ в обводнённых скважинах // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Насиров У.Ф. [и др.]. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23148>

Abstract

The purpose of this study is to analyse the current state and provide a technical-economic assessment of borehole charge formation technologies for explosives under water-saturated rock conditions. The methodological basis of the work is a systematic review of domestic and foreign literature on blasting methods in water-filled boreholes, using comparative analysis of technological solutions by criteria of reliability, economic efficiency, and controllability of the blast impact. Six main directions of blasting technologies in water-saturated boreholes were identified and systematised: the use of water-resistant explosives, waterproof shells, preliminary borehole dewatering, combined charge formation, preliminary rock weakening, and special charge designs. It was established that each of the reviewed technological directions has certain advantages but is characterised by significant limitations in managing the energy impact on the contour zone. It is shown that the issues of maintaining the stability of the contour rock mass, limiting the depth of man-induced disturbance, and reducing spalling intensity during contour blasting under water-saturated conditions remain insufficiently studied. The practical significance of the work lies in the systematisation of existing technological solutions, identification of gaps in the scientific and technical knowledge base, and justification of directions for further improvement of contour blasting technologies in water-saturated boreholes, including the use of combined inert stemming.

Ключевые слова: обводнённые скважины, скважинный заряд, водоустойчивые взрывчатые вещества, комбинированный заряд, контурное взрывание, гидроизолирующая оболочка, приконтурный массив.

Keywords: water-saturated boreholes, borehole charge, water-resistant explosives, combined charge, contour blasting, waterproof shell, contour rock mass.

Введение

Выполнение буровзрывных работ в обводнённых скважинах относится к числу наиболее сложных задач взрывного дела. Присутствие воды изменяет условия размещения заряда в скважине, ограничивает применение неводоустойчивых взрывчатых веществ, влияет на характер передачи энергии взрыва и затрудняет управление процессами разрушения породного массива. В связи с этим разработаны различные подходы к решению данной проблемы, включая применение водоустойчивых ВВ, гидроизолирующих оболочек, предварительное осушение скважин, использование комбинированных зарядов и специальных конструкций скважинных зарядов [1–22].

Вместе с тем большинство известных технологических решений ориентировано на обеспечение надёжной детонации зарядов и повышение эффективности дробления массива, тогда как вопросы управления геомеханическим состоянием приконтурной зоны при контурном взрывании в обводнённых условиях остаются недостаточно изученными. В условиях обводнения вода выступает не только как фактор, осложняющий ведение буровзрывных работ, но и как среда, способствующая более интенсивной передаче взрывного импульса в массив, что приводит к увеличению зоны разрушения, развитию заколов, раскрытию трещин и снижению устойчивости приконтурных участков.

Целью настоящей работы является анализ и технико-экономическая оценка существующих технологий формирования скважинных зарядов и применения комбинированных взрывчатых веществ в обводнённых скважинах, а также определение направлений дальнейшего совершенствования технологий контурного взрывания в водонасыщенных условиях.

Материалы и методы

Методологическую основу исследования составляет систематический обзор и сравнительный анализ отечественных и зарубежных научно-технических источников по вопросам взрывания в обводнённых скважинах [1–22]. Анализ публикаций проводился по следующим критериям: технологическая надёжность предлагаемого решения, экономическая эффективность, управляемость энергетического воздействия на приконтурный массив, возможность применения в условиях контурного взрывания.

Для структурирования результатов анализа применён метод классификации технологических решений по направлениям, что позволило выявить основные тенденции развития технологий и определить недостаточно изученные аспекты проблемы. Степень научной проработанности каждого аспекта оценивалась по качественной шкале: высокая, достаточная, средняя, недостаточная.

Основу для исследования составили работы по применению «плавающих зарядов» [11], использованию неводоустойчивых ВВ при разрушении обводнённых горных пород [2, 3, 7, 12], гидроизоляции скважинных зарядов [5, 6, 10, 14], предварительному осушению скважин [18], а также обобщающие работы по теории взрывного разрушения горных пород [16, 20, 21].

Результаты и обсуждение

Одним из ранних направлений совершенствования технологии взрывания в обводнённых скважинах стали исследования применения «плавающего заряда» [11]. Необходимость разработки данной конструкции была обусловлена тем, что при традиционном размещении заряда в обводнённой скважине значительная часть энергии расходуется неэффективно из-за непосредственного контакта ВВ с водой, неравномерного распределения заряда по длине скважины и изменения условий распространения ударных волн в системе «заряд – вода – горный массив».

Предложенная конструкция основывалась на пространственном разделении заряда и водной среды за счёт размещения ВВ в подвешенном либо плавающем положении относительно водяного столба. Конструкция сплошного комбинированного скважинного заряда (а) и «плавающего заряда» с водным промежутком (б) показана на рис. 1, где: 1 – водоустойчивое ВВ; 2 – неводоустойчивое ВВ; 3 – забойка; 4 – водный промежуток (столб воды); 5 – поплавки из лёгкого материала; d – диаметр скважины.

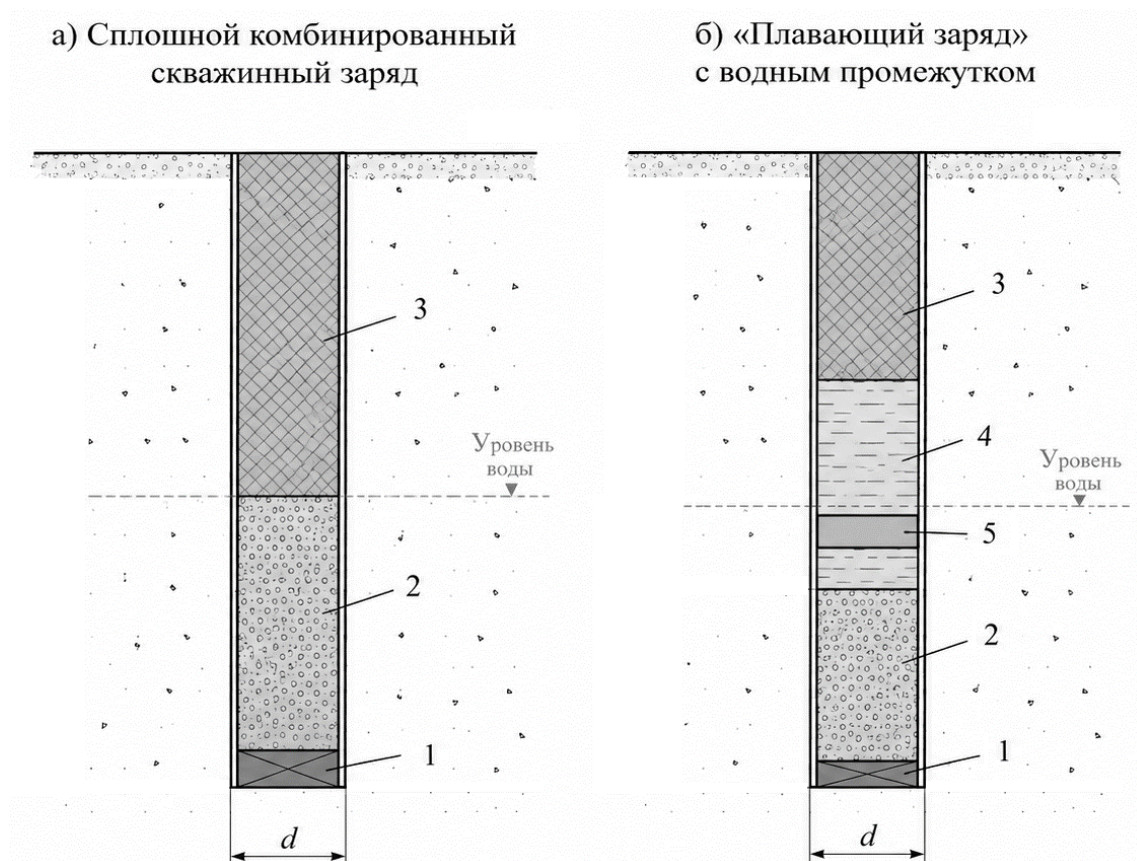


Рисунок 1. Конструкция сплошного комбинированного скважинного заряда (а) и «плавающего заряда» с водным промежутком (б)

Экспериментальные исследования [11] показали, что положение заряда относительно уровня воды существенно влияет на характер разрушения пород, степень их дробления и распределение энергии по длине скважины. Вместе с тем данная схема имеет существенный недостаток: повышенный расход сравнительно дорогостоящих водоустойчивых ВВ, особенно отчётливо проявляющийся в интенсивно трещиноватых породных массивах.

Значительный вклад в развитие технологий взрывания в обводнённых скважинах внесли исследования, направленные на обоснование возможности применения неводоустойчивых ВВ [2, 3, 7, 12]. В работе [3] предложен подход, основанный на рациональном распределении различных типов ВВ по длине скважины: нижняя обводнённая часть заряда формировалась из водоустойчивых компонентов, тогда как в верхнем интервале допускалось применение неводоустойчивых ВВ. Это позволило сократить расход дорогостоящих водоустойчивых ВВ при сохранении устойчивости детонационного процесса.

Исследования [7], выполненные для условий обводнённых горизонтов карьера ИнГОКа, показали, что с увеличением глубины разработки влияние гидрогеологических факторов существенно возрастает. Результаты подтвердили, что применение усовершенствованных технологий заряжания повышает качество дробления пород и улучшает технико-экономические показатели взрывных работ. В работе [12] показано, что эффективность применения неводоустойчивых ВВ определяется не только свойствами взрывчатого вещества, но и конструкцией заряда и условиями его функционирования в обводнённой среде.

В ряде исследований [5, 6, 10] основное внимание уделено применению гидроизолирующих оболочек для защиты неводоустойчивых ВВ от воздействия воды. Производственные испытания [23] подтвердили работоспособность подобных решений, однако выявили их ограничения при изменяющемся уровне обводнения, неустойчивых стенках скважин и высокой трещиноватости массива. Применение защитных оболочек усложняет процесс заряжания, повышает требования к герметичности конструкции и увеличивает трудоёмкость работ.

В работах [4, 17] предложены технологические схемы формирования зарядов с учётом фактического уровня воды в скважине: в нижней обводнённой части размещаются водоустойчивые ВВ (гранулотол, алюмотол и др.), а в верхнем интервале – более экономичные неводоустойчивые взрывчатые вещества. Данные решения ориентированы на обеспечение работоспособности заряда и эффективность разрушения массива, тогда как вопросы управления передачей энергии в приконтурную зону остаются недостаточно проработанными.

Предварительное осушение скважин [18] позволяет применять традиционные схемы заряжания, однако требует дополнительного оборудования и увеличивает трудоёмкость работ. Существенным ограничением является невозможность полного удаления воды из трещиноватого массива. Работы [16, 20, 21] формируют методологическую основу для анализа скважинных зарядов, однако вопросы контурного взрывания в обводнённых скважинах с применением комбинированной инертной забойки в них не получили достаточного развития.

На основании анализа литературных источников [1–22] выделены основные технологические направления взрывания в обводнённых скважинах, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Основные направления развития технологий взрывания в обводнённых скважинах

Направление	Краткая характеристика	Основные преимущества	Основные ограничения
Применение водоустойчивых ВВ	Использование взрывчатых веществ, сохраняющих работоспособность при контакте с водой	Высокая надёжность работы заряда в обводнённых условиях	Повышенная стоимость, ограниченные возможности регулирования воздействия на приконтурный массив
Использование гидроизолирующих оболочек	Защита неводоустойчивых ВВ от непосредственного контакта с водой	Возможность применения более дешёвых ВВ	Сложность обеспечения герметичности и увеличение трудоёмкости работ
Предварительное осушение скважин	Удаление воды перед выполнением операций заряжания	Возможность применения традиционных схем заряжания	Увеличение продолжительности подготовительных работ и неполное удаление воды из трещин
Комбинированные заряды	Рациональное сочетание водоустойчивых и неводоустойчивых взрывчатых веществ по длине скважины	Снижение затрат и адаптация конструкции заряда к уровню воды	Недостаточная изученность влияния на состояние приконтурного массива

Предварительное разупрочнение массива	Создание условий для облегчения последующего разрушения пород	Повышение эффективности взрывного разрушения	Не ориентировано на сохранение проектного контура и ограничение заколов
Специальные конструкции зарядов	«Плавающие» заряды, защитные оболочки и другие нестандартные схемы размещения ВВ	Возможность регулирования положения заряда в скважине	Сложность практической реализации и контроля параметров заряда

Сравнение рассмотренных технологий свидетельствует о том, что применение водоустойчивых ВВ обеспечивает высокую надёжность взрывания, однако не позволяет контролировать передачу энергии в законтурный массив. Использование гидроизолирующих оболочек позволяет применять неводоустойчивые ВВ, но усложняет технологию и повышает требования к герметичности. Предварительное осушение скважин эффективно лишь при невысокой степени обводнённости. Комбинированные заряды обладают большей технологической гибкостью, но вопросы управления геомеханическим состоянием приконтурного массива остаются недостаточно изученными.

Проведённый анализ позволил оценить степень разработанности научно-технических задач, связанных с контурным взрыванием в обводнённых условиях. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Оценка степени научной проработанности существующих решений применительно к контурному взрыванию в обводнённых условиях

Научно-техническая задача	Степень изученности	Примечание
Обеспечение работоспособности заряда в водной среде	Высокая	Рассмотрены вопросы применения водоустойчивых ВВ, гидроизолирующих оболочек и предварительного осушения
Использование неводоустойчивых ВВ в обводнённых скважинах	Высокая	Разработаны технологии гидроизоляции и комбинированного формирования зарядов
Повышение эффективности дробления обводнённых пород	Достаточная	Представлены результаты производственных и экспериментальных исследований
Управление распределением энергии взрыва	Средняя	Имеются отдельные исследования, однако их связь с контурным взрыванием раскрыта недостаточно
Ограничение глубины техногенной нарушенности массива	Недостаточная	Рассматривается лишь в отдельных работах и не имеет комплексного решения
Снижение заколообразования в приконтурной зоне	Недостаточная	Отсутствуют специализированные решения для обводнённых контурных скважин
Применение комбинированной инертной забойки	Недостаточная	Требуется дополнительное научное обоснование и экспериментальная проверка

Как следует из данных табл. 2, наиболее полно в научно-технической литературе освещены вопросы обеспечения работоспособности зарядов в водной среде и применения неводоустойчивых взрывчатых веществ в обводнённых скважинах. В то же время проблемы ограничения глубины техногенной нарушенности массива, снижения интенсивности

заколообразования и применения комбинированной инертной забойки остаются недостаточно изученными и требуют дополнительного научного обоснования и экспериментальной проверки.

Заключение

1. Выявлено шесть основных направлений технологий взрывания в обводнённых скважинах: применение водоустойчивых ВВ, использование гидроизолирующих оболочек, предварительное осушение скважин, формирование комбинированных зарядов, предварительное разупрочнение массива и применение специальных конструкций зарядов. Каждое из направлений характеризуется определёнными технологическими преимуществами и существенными ограничениями.

2. Установлено, что существующие технологические решения ориентированы преимущественно на обеспечение надёжной детонации зарядов и повышение эффективности дробления горного массива. Вопросы управления геомеханическим состоянием приконтурной зоны, ограничения глубины техногенной нарушенности и снижения заколообразования при контурном взрывании в обводнённых условиях остаются недостаточно изученными.

3. Показано, что вода в скважине выступает не только как осложняющий фактор, но и как среда, способствующая более интенсивной передаче взрывного импульса в приконтурный массив. Это обуславливает необходимость разработки специализированных технологических решений, направленных на регулирование энергетического воздействия взрыва на законтурную зону.

4. Определены приоритетные направления дальнейших исследований: разработка и научное обоснование применения комбинированной инертной забойки в обводнённых контурных скважинах, а также изучение закономерностей влияния различных конструкций зарядов на состояние приконтурного массива в условиях водонасыщения.

Список литературы

1. Заиров Ш.Ш., Мавлянов А.А., Гаибназаров Б.А., Сафарова М.Д. Исследование влияния обводнённости породного массива на устойчивость откосов карьера // Горный вестник Узбекистана. – 2025. – № 4.
2. Заиров Ш.Ш., Худайбердиев О.Ж., Сапаров М.А., Мавлянов А.А., Мехмонов М.Р. Математическое моделирование и анализ влияния обводнённости скважин на эффективность буровзрывных работ // Universum: технические науки. – 2026. – № 1. – DOI: 10.32743/UniTech.2026.142.1.
3. Заиров Ш.Ш., Мавлянов А.А., Хасанов О.А. Влияние обводнённости горного массива на эффективность буровзрывных работ // Konchilik, neft va gazni qayta ishlash, energetika, temir yo‘l va kimyo sanoatlari muammolari, innovatsion va dasturiy yechimlariga bag‘ishlangan respublika ilmiy-amaliy anjuman materiallari. Бухоро,. – 2025.

4. Мавлянов А.А., Хасанов О.А., Гаибназаров Б.А. Выбор способов зарядки и взрывания скважин для условий карьера Кальмакыр // Материалы Республиканской научно-технической конференции «Горно-металлургический комплекс: проблемы и их решения». Междуреченск: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, – 2015.
5. Насиров У.Ф., Заиров Ш.Ш., Мавлянов А.А., Гаибназаров Б.А., Мехмонов М.Р. Исследование влияния обводнённости горного массива на эффективность буровзрывных работ и сейсмическое воздействие взрывов // *Universum: технические науки*. – 2026. – № 1. – DOI: 10.32743/UniTech.2026.142.1.
6. Насиров У.Ф., Мавлянов А.А., Хасанов О.А., Гаибназаров Б.А. Increasing the economic efficiency of blasting operations in watered wells through the use of reagents // XXIII Міжнародна конференція молодих вчених. Дніпро, – 2025.
7. Насиров У.Ф., Мавлянов А.А., Мельникова Т.Е. Влияние обводнённости горного массива на сейсмическое воздействие взрывов // *Konchilik, neft va gazni qayta ishlash, energetika, temir yo‘l va kimyo sanoatlari muammolari, innovatsion va dasturiy yechimlariga bag‘ishlangan respublika ilmiy-amaliy anjuman materiallari*. Бухоро, – 2025.
8. Хасанов О.А., Мавлянов А.А., Мельникова Т.Е. Снижение уровня обводненности массива на карьерах предварительным контурным взрыванием // *Инновационные технологии добычи и переработки полезных ископаемых*. – 2025.
9. Шестопалов В.М., Петренко Л.И., Романюк И.М. Повышение производительности водозаборов в трещиноватых кристаллических породах путем взрывного воздействия // *Геофизический журнал*. – 2021. – Т. 43, № 5. – DOI: 10.24028/gzh.v43i5.244039.
10. Эквист Б.В., Барнов Н.Г. Разрушение горных пород взрывом в массивах с неоднородной структурой // *Горная промышленность*. – 2021. – № 3. – DOI: 10.30686/1609-9192-2021-3-135-138.
11. Юматов Б.П., Шебаршов А.А., Власов В.М. Экспериментальные исследования конструкции «плавающего заряда» // *Взрывное дело*. – 1974. – № 74.
12. Chen D., Chen Y., Zhou Z., Tu W., Li L. Study on internal rise law of fracture water pressure and progressive fracture mechanism of rock mass under blasting impact // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2025. – DOI: 10.1016/j.tust.2025.106545.
13. Fan Y., Miao X., Gao Q., Leng Z., Zheng J., Wu J. Influence of water depth on the range of crushed zones and cracked zones for underwater rock drilling and blasting // *International Journal of Geomechanics*. – 2022. – № 10. – DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002485.
14. Gao K., Huang P., Liu Z., Liu J., Shu C.M., Qiao G. Coal-rock damage characteristics caused by blasting within a reverse fault and its resultant effects on coal and gas outburst // *Scientific Reports*. – 2021. – DOI: 10.1038/s41598-021-98581-w.
15. Li Q., Li H., Li X., Li J., Liu K., Wei X., Peng K., Wu C. Radial pressure characteristics on borehole walls at decoupled charge blasting // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2025. – № 2. – DOI: 10.1007/s00603-024-04293-8.

16. Mavlyanov A.A., Melnikova T.E., Milyutin A. Study of the impact of preliminary contour blasting on changing the zone of intensive rock crushing and reducing the level of watering of the massif in quarry // *The Multidisciplinary Journal of Science and Technology*. – 2024. – № 5.
17. Melnikova T.E., Mavlyanov A.A., Toshtemirov U.T., Yormatov O.Sh. Types and conditions of application of excavations when conducting mining excavations // *Salud, Ciencia y Tecnología*. – 2025. – № 5.
18. Ouchterlony F. An empirical approach for predicting burden velocities in rock blasting // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2021. – № 4. – DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.04.004.
19. Peng K., Liu X., Jing M., Wu T., Luo K., Luo S. Impact-water interaction effects on mechanical and energy characteristics of granite during uniaxial compression // *Geoenergy Science and Engineering*. – 2025. – DOI: 10.1016/j.geoen.2025.214033.
20. Research on the tensile mechanical properties of saturated sandstone damaged by deep hole blasting // *Scientific Reports*. – 2025. – DOI: 10.1038/s41598-025-11925-8.
21. Salmi E.F., Sellers E.J. A review of the methods to incorporate the geological and geotechnical characteristics of rock masses in blastability assessments for selective blast design // *Engineering Geology*. – 2021. – DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105970.
22. Song J.-F., Lu C.-P., Zhang X.-F., Guo Y., Yang H.-W. Damage mechanism and wave attenuation induced by blasting in jointed rock // *Geofluids*. – 2022. – DOI: 10.1155/2022/6950335.
23. Study on the efficiency of energy transfer in the blasting with different coupling mediums for deep rock mass excavation // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2025. – T. 319. – DOI: 10.1016/j.engfracmech.2025.111048.

References

1. Zairov Sh.Sh., Mavlyanov A.A., Gaibnazarov B.A., Safarova M.D. Issledovanie vliyaniya obvodnennosti porodnogo massiva na ustoichivost' otkosov kar'era [Study of the influence of rock mass water saturation on the stability of open-pit slopes]. *Gornyi vestnik Uzbekistana*, 2025, no. 4, P. 22–26. (In Russ.)
2. Zairov Sh.Sh., Khudayberdiev O.Zh., Saparov M.A., Mavlyanov A.A., Mekhmonov M.R. Matematicheskoe modelirovanie i analiz vliyaniya obvodnennosti skvazhin na effektivnost' burovzryvnykh rabot [Mathematical modeling and analysis of the influence of water-filled boreholes on blasting efficiency]. *Universum: Tekhnicheskie nauki*, 2026, no. 1(142). DOI: 10.32743/UniTech.2026.142.1. (In Russ.)
3. Zairov Sh.Sh., Mavlyanov A.A., Khasanov O.A. Vliyanie obvodnennosti gornogo massiva na effektivnost' burovzryvnykh rabot [Influence of rock mass water saturation on blasting efficiency] // *Proceedings of the Republican Scientific and Practical Conference «Konchilik, neft va gazni qayta ishlash, energetika, temir yo'l va kimyo sanoatlari muammolari, innovatsion va dasturiy yechimlari»*. Bukhara,. – 2025.

4. Mavlyanov A.A., Khasanov O.A., Gaibnazarov B.A. Qalmoqir kar'eri sharoiti uchun portlatish skvajinalarini portlovchi modda bilan zaryadlash va portlatish usullarini tanlash [Selection of charging and blasting methods for blast holes under the conditions of the Kalmakyr open pit]. In: Proceedings of the Republican Scientific and Technical Conference «Mining and Metallurgical Complex: Problems and Their Solutions». P. 36–37. (In Uzbek). – Mezhdurechensk: T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 2015.
5. Nasirov U.F., Zairov Sh.Sh., Mavlyanov A.A., Gaibnazarov B.A., Mekhmonov M.R. Issledovanie vliyaniya obvodnennosti gornogo massiva na effektivnost' burovzryvnykh rabot i seismicheskoe vozdeistvie vzryvov [Study of the influence of rock mass water saturation on blasting efficiency and seismic effects of explosions]. Universum: Tekhnicheskie nauki, 2026, no. 1(142). DOI: 10.32743/UniTech.2026.142.1. (In Russ.)
6. Nasirov U.F., Mavlyanov A.A., Khasanov O.A., Gaibnazarov B.A. Increasing the economic efficiency of blasting operations in watered wells through the use of reagents // Proceedings of the XXIII International Conference of Young Scientists. Dnipro,. – 2025.
7. Nasirov U.F., Mavlyanov A.A., Melnikova T.E. Vliyanie obvodnennosti gornogo massiva na seismicheskoe vozdeistvie vzryvov [Influence of rock mass water saturation on the seismic impact of blasting] // Proceedings of the Republican Scientific and Practical Conference «Konchilik, neft va gazni qayta ishlash, energetika, temir yo'l va kimyo sanoatlari muammolari, innovatsion va dasturiy yechimlari». Bukhara,. – 2025.
8. Khasanov O.A., Mavlyanov A.A., Melnikova T.E. Snizhenie urovnya obvodnennosti massiva na kar'erakh predvaritel'nym konturnym vzryvaniem [Reduction of rock mass water saturation in open pits by preliminary contour blasting]. In: Innovative Technologies of Mineral Mining and Processing – II: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Buston, 2025, P. 171–173. (In Russ.)
9. Shestopalov V.M., Petrenko L.I., Romanyuk I.M. Povyshenie proizvoditel'nosti vodozaborov v treshchinovatykh kristallicheskikh porodakh putem vzryvnogo vozdeistviya [Increasing the productivity of water intakes in fractured crystalline rocks by blasting]. Geofizicheskii zhurnal, 2021, vol. 43, no. 5, P. 19–34. DOI: 10.24028/gzh.v43i5.244039. (In Russ.)
10. Ekvist B.V., Barnov N.G. Razrushenie gornyx porod vzryvom v massivakh s neodnorodnoi strukturoi [Rock blasting in heterogeneous rock masses]. Gornaya promyshlennost', 2021, no. 3, P. 135–138. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-3-135-138. (In Russ.)
11. Yumatov B.P., Shebarshov A.A., Vlasov V.M. Eksperimental'nye issledovaniya konstruksii «plavayushchego zaryada» [Experimental studies of the «floating charge» design]. Vzryvnoe delo, Moscow: Nedra Publ., 1974, no. 74/31, P. 183–188. (In Russ.)
12. Chen D., Chen Y., Zhou Z., Tu W., Li L. Study on internal rise law of fracture water pressure and progressive fracture mechanism of rock mass under blasting impact. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, Article 106545. DOI: 10.1016/j.tust.2025.106545.
13. Fan Y., Miao X., Gao Q., Leng Z., Zheng J., Wu J. Influence of water depth on the range of crushed zones and cracked zones for underwater rock drilling and blasting. International Journal of Geomechanics, 2022, vol. 22, no. 10. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002485.

14. Gao K., Huang P., Liu Z., Liu J., Shu C.M., Qiao G. Coal-rock damage characteristics caused by blasting within a reverse fault and its resultant effects on coal and gas outburst. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, Article 19158. DOI: 10.1038/s41598-021-98581-w.
15. Li Q., Li H., Li X., Li J., Liu K., Wei X., Peng K., Wu C. Radial pressure characteristics on borehole walls at decoupled charge blasting. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2025, vol. 58, no. 2. DOI: 10.1007/s00603-024-04293-8.
16. Mavlyanov A.A., Melnikova T.E., Milyutin A. Study of the impact of preliminary contour blasting on changing the zone of intensive rock crushing and reducing the level of watering of the massif in quarry. *The Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 2024, vol. 5, no. 5, P. 376–379.
17. Melnikova T.E., Mavlyanov A.A., Toshtemirov U.T., Yormatov O.Sh. Types and conditions of application of excavations when conducting mining excavations. *Salud, Ciencia y Tecnología*, 2025, no. 5, P. 887–894.
18. Ouchterlony F. An empirical approach for predicting burden velocities in rock blasting // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2021. – № 4. – DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.04.004.
19. Peng K., Liu X., Jing M., Wu T., Luo K., Luo S. Impact-water interaction effects on mechanical and energy characteristics of granite during uniaxial compression. *Geoenery Science and Engineering*, 2025, vol. 254, Article 214033. DOI: 10.1016/j.geoen.2025.214033.
20. Research on the tensile mechanical properties of saturated sandstone damaged by deep hole blasting. *Scientific Reports*. – 2025. – DOI: 10.1038/s41598-025-11925-8.
21. Salmi E.F., Sellers E.J. A review of the methods to incorporate the geological and geotechnical characteristics of rock masses in blastability assessments for selective blast design. *Engineering Geology*, 2021, vol. 290, Article 105970. DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105970.
22. Song J.-F., Lu C.-P., Zhang X.-F., Guo Y., Yang H.-W. Damage mechanism and wave attenuation induced by blasting in jointed rock. *Geofluids*, 2022, vol. 2022, Article ID 6950335. DOI: 10.1155/2022/6950335.
23. Study on the efficiency of energy transfer in the blasting with different coupling mediums for deep rock mass excavation. *Engineering Fracture Mechanics*, 2025, vol. 319, Article 111048 // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2025. – T. 319. – DOI: 10.1016/j.engfracmech.2025.111048.

Статья поступила в редакцию: 24.07.2026

Статья принята к публикации: 06.08.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 622.342+669.294

DOI: 10.32743/UniTech.2026.149.8.23276

Полупромышленные испытания по переработке упорных углеродистых золотосодержащих руд комбинированными методами

Эргашев Улугбек Абдурасулович

д-р техн. наук, проф.

заместитель начальника технологического отдела АО НГМК

Республика Узбекистан, г. Навои

E-mail: info@ngmk.uz

Чулиев Фархад Гафурович

д-р филос. по техн. наукам (PhD), директор

Гидрометаллургического завода №5 АО НГМК

Республика Узбекистан, г. Навои

E-mail: chuliev86@mail.ru

Кароматов Санъат Сафоевич

главный инженер Гидрометаллургического завода №5 АО НГМК

Республика Узбекистан, г. Навои

E-mail: skaromatov21@gmail.com

Фармонов Илхомжон Эркинжон угли

заместитель начальник

а лаборатории Гидрометаллургического завода №5 АО НГМК

Республика Узбекистан, г. Навои

E-mail: ilhom.farmonov4017@gmail.com

Semi-industrial tests on the processing of refractory carbonaceous gold-bearing ores using combined methods

Ergashev Ulugbek

doctor of Technical Sciences, Professor

Deputy Head of the Technology Department, NMMC JSC

Republic of Uzbekistan, Navoi

Chuliev Farkhad

doctor of Philosophy (PhD)

in Engineering Sciences Director of Hydrometallurgical Plant No. 5, NMMC JSC

Republic of Uzbekistan, Navoi

Karomatov Sanat

Chief Engineer, Hydrometallurgical Plant No. 5, NMMC JSC

Republic of Uzbekistan, Navoi

Farmonov Ilhomjon

Deputy Head of the Laboratory at Hydrometallurgical Plant No. 5, NMMC JSC

Republic of Uzbekistan, Navoi

Библиографическое описание: Полупромышленные испытания по переработке упорных углеродистых золотосодержащих руд комбинированными методами // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Эргашев У.А. [и др.]. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23276>

Аннотация

Упорные углеродистые золотосодержащие руды характеризуются высоким содержанием активного органического углерода и мелкодисперсного золота, что приводит к выраженному эффекту «прег-роббинга» и низкой эффективности прямого сорбционного цианирования. Повышение коэффициента извлечения золота из такого сырья требует применения комплексных технологий, обеспечивающих высвобождение золотосодержащих минеральных фаз и снижение сорбционной активности углеродистого материала. Целью данного исследования было проведение полупромышленных испытаний комбинированной технологии переработки упорных углеродистых золотосодержащих руд и оценка её эффективности в повышении коэффициента извлечения золота. Полупромышленные испытания включали ультратонкое измельчение флотационного концентрата, кислотную обработку, кислородно-известковое окисление, предварительную обработку лигносульфонатом натрия, сорбционное цианирование, окислительное обжигание и горячую щелочную обработку. Установлено, что применение комбинированного процесса способствует более полному высвобождению сульфидной матрицы, снижению сорбционной активности углеродистых веществ и уменьшению проявления эффекта «прег-роббинга». Результаты испытаний показали, что при производительности обогатительной установки 40 кг/ч общий коэффициент извлечения золота достигает 88,06 %, что на 13,4 % превышает показатель, достигнутый при использовании технологической схемы без предварительной кислотной обработки. Эти результаты подтверждают эффективность предлагаемой технологии и потенциал её дальнейшего промышленного масштабирования при переработке упорных углеродистых золотосодержащих руд.

Abstract

Refractory carbonaceous gold-bearing ores are characterised by a high content of active organic carbon and finely dispersed gold, which results in a pronounced preg-robbing effect and low efficiency of direct sorption cyanidation. Increasing the gold recovery rate from such feedstock requires the use of integrated technologies that ensure the liberation of gold-bearing mineral phases and a reduction in the sorption activity of the carbonaceous material.

The aim of this study was to conduct semi-industrial trials of a combined processing technology for refractory carbonaceous gold-bearing ores and to evaluate its effectiveness in improving gold recovery. The semi-industrial trials included ultra-fine grinding of the flotation concentrate, acid treatment, oxygen-lime oxidation, pre-treatment with sodium lignosulphonate, sorption cyanidation, oxidative roasting and hot alkali treatment. It was established that the use of a combined process contributes to more complete liberation of the sulphide matrix, a reduction in the sorption activity of carbonaceous substances and a reduction in the occurrence of the preg-robbing effect. The test results showed a total gold recovery of up to 88.06 per cent at a plant throughput of 40 kg/h, which is 13.4 per cent higher than that achieved using a process flow without preliminary acid treatment. These results confirm the effectiveness of the proposed technology and the potential for its further industrial upscaling in the processing of refractory carbonaceous gold-bearing ores.

Ключевые слова: упорное золото, прег-роббинг, углеродистое вещество, сорбционная активность, кислотная обработка, кислородно-известковое окисление, лигносульфонат натрия, обжиг, горячая щелочная обработка, сорбционное цианирование.

Keywords: refractory gold, preg-robbing, carbonaceous matter, sorption activity, acid treatment, oxygen-lime oxidation, sodium lignosulfonate, roasting, hot alkaline treatment, sorption cyanidation.

Введение

В настоящее время основные направления деятельности горно-металлургической отрасли Узбекистана сосредоточены на повышении эффективности использования минеральных ресурсов, увеличения объёмов производимой высоколиквидной продукции и ускорения развития новых видов производства. В связи с истощением легкоцианируемых окисленных золотосодержащих руд в металлургической отрасли в последние годы всё больше привлекаются в переработку упорные руды, требующие сложных технологических схем извлечения золота [6].

Одним из таких объектов являются упорные золотосодержащие руды Ауминзо-Амантайского рудного поля, переработка которых сопровождается проблемами при достижении приемлемой степени извлечения золота [1]. Причиной явилось наличие углистых веществ (УВ) в упорных рудах. Углистые вещества, представляющие собой природные органические продукты – битумы, керогены и т.п., способны адсорбировать растворенное золото из технологических растворов в процессе цианирования [6].

Повышение эффективности переработки подобных руд требует применения комплексных технологий, способных как высвободить тонковкрапленное золото, так и снизить сорбционную активность углеродистой составляющей. Перспективным направлением является сочетание методов механической, химической и термической обработки с последующим сорбционным цианированием, что позволяет смягчить эффект «прег-роббинга» и значительно повысить общее извлечение золота.

Целью данного исследования является проведение полупромышленных испытаний комбинированной технологии переработки упорных углеродистых золотосодержащих руд, включающей сверхтонкое измельчение, кислотную обработку, кислородно-известковое окисление, предварительную обработку лигносульфонатом натрия, сорбционное цианирование, окислительный обжиг и горячую щелочную обработку, а также оценка эффективности предложенной технологической схемы в плане повышения извлечения золота и снижения негативного воздействия эффекта «прег-роббинга».

Материалы и методы

Содержание Сорг в продукте флотационного обогащения составляло 3,0 – 5,0 % которое сорбировало растворенное золото при цианировании флотоконцентрата (preg-robbing). Сорбционная активность флотоконцентрата упорных руд Ауминзо-Амантайского рудного поля определенная по методике ИРГИРЕДМЕТ составляла более 90,0 % [3, 8]. Лабораторными исследованиями был установлен положительный эффект применения лигносульфоната натрия (LS) по снижению эффекта preg-robbing [4, 5]

Для подтверждения лабораторных результатов на опытной установке были проведены полупромышленные испытания, включавшие процессы сверхтонкого измельчения флотоконцентрата, его кислотной обработки, кислородно-известкового окисления (КИО), предварительной обработки поверхностно-активными веществами (лигносульфонатом натрия) перед сорбционным цианированием, а также окислительный обжиг хвостов сорбционного цианирования обработанного флотоконцентрата и сорбционное цианирование огарка с последующей горячей щелочной обработкой (термообработка). Столь сложная комбинация технологических приёмов была вызвана следующими фактами [2, 9, 10]:

1. извлечение золота при прямом сорбционном цианировании флотоконцентрата составило 25 – 30 %, несмотря на то что содержание свободно цианируемого золота в нем согласно рациональному анализу на золото составляет 50–52 % (эффект preg-robbing);

2. окислительный обжиг повышает извлечение золота только до 75 %, причиной является капсуляция тонкодисперсного золота уже при температуре 550 – 600 °С, дальнейшее снижение температуры приводит к недогоранию углеродистых веществ, повышая их сорбционную активность. Таким образом, обжиг вскрывая золота одновременно капсулирует тонкодисперсное золото;

3. гидрометаллургические методы окисления (кислородно-известковое, бактериальное) не обеспечили извлечение золота выше 55 – 60 %.

Предлагаемый комбинированный метод имеет следующую теоретическую предпосылку:

4. флотоконцентрат с механоактивированной поверхностью частиц минералов после сверхтонкого измельчения подвергается кислотной обработке с переходом Fe^{2+} в раствор (в жидкую фазу пульпы);

5. Fe^{2+} при КИО переходит в Fe^{3+} , являясь окислителем сульфидов вскрывая тонкодисперсное поверхностное золото;

6. обработка поверхностно-активными веществами снижает эффект preg-robbing при сорбционном цианировании, обеспечивая извлечение вскрытого золота в сорбент;

7. обжиг и горячая щелочная обработка обеспечивает дальнейшее вскрытие и извлечение золота.

Результаты и обсуждения

На базе опытной установки были проведены полупромышленные испытания с целью повышения эффективности извлечения золота из флотоконцентрата месторождения «Ауминзо-Амантой» согласно следующей схеме (рис.1).

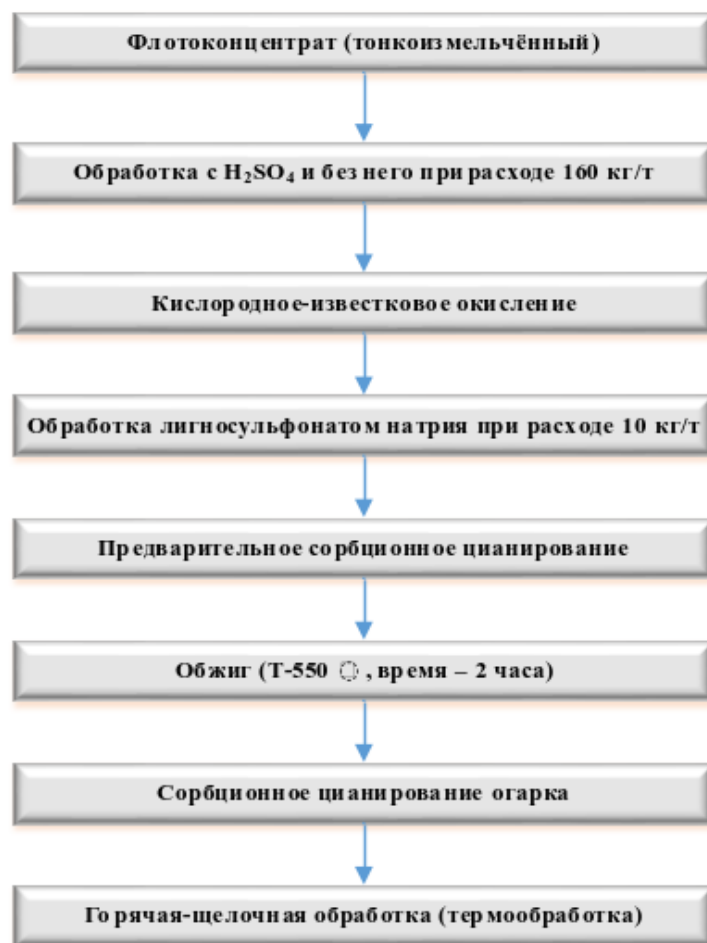


Рисунок 1. Схема полупромышленных испытаний по переработке упорных углеродистых руд комбинированным методом

С целью вскрытия поверхности золота, покрытого сульфидными минералами, снижения эффекта preg-robbing, возникающего в процессе цианирования, а также дальнейшей оптимизации процесса обжига и повышения эффективности извлечения золота была создана полупромышленная экспериментальная установка (рис. 2).

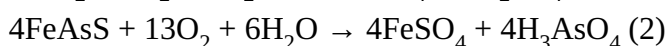
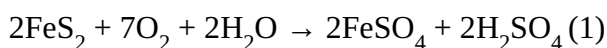
[EMF формула не сконвертирована: image2.emf]

№	Наименование продукта	Исходные данные			Результаты после кислотной обработки		Содержание химических элементов в жидкой фазе, мг/л					
		Au, г/т	Ss, %	C _{org} , %	Ss, %	C _{org} , %	Fe ⁺² , г/л	Fe ⁺³ , г/л	Pb	Ni	Zn	Cu
2	Флотоконцентрат с обработкой H ₂ SO ₄ , (расход 160 кг/т)				14,27	3,56	10,1	12,6	2,2	30	34	262

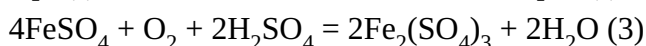
Результаты кислотной обработки показали существенные изменения в составе жидкой фазы, что свидетельствует о разрушении сульфидных минералов и переходе части компонентов в раствор.

После кислотной обработки для проведения кислородно-известкового окисления (КИО) в тот же ёмкость подавался технический кислород в течение 72 часов (расход ~2 м³/ч, чистота до 84 %) из кислородной станции VPSA 4000/90.001-PS. Одновременно осуществлялась подача пара для поддержания температуры в диапазоне 80–85 °С.

Окисление минералов пирита (FeS₂) и арсенопирита (FeAsS) происходит по следующим реакциям [3]:



При дальнейшем окислении железо переходит из двухвалентного в трехвалентное:



Кислотное-кислородное окисление флотоконцентрата в температурных режимах обеспечивает деструкцию сульфидных минералов, что приводит к раскрытию золота из сульфидной матрицы. Одновременно с этим происходит частичная деструкция и пассивация органических соединений, что существенно снижает их сорбционную активность в процессе последующего цианирования.

После завершения процесса окисления кислородом сульфатные соли, а также ионы двухвалентного и трёхвалентного железа (Fe²⁺ и Fe³⁺), перешедшие в раствор, отмываются при соотношении Т:Ж = 1:20. В отмытый сгущенный продукт добавляют известковое молоко для поддержания уровня pH пульпы в диапазоне 10,0–10,5, после чего процесс окисления продолжают путём подачи кислорода. Данные условия способствовали интенсивному окислению сульфидных минералов, высвобождению золота и других ценных компонентов.

После защелачивания окисленный флотоконцентрат подвергался обработке с применением лигносульфоната натрия в количестве 10 кг/т для пассивации углеродистых веществ, которые сорбировали растворённое золото при цианировании (эффект preg-robbing) [7]. В ёмкость объёмом 1 м³ проводилось предварительное сорбционное цианирование в течение 12 часов при концентрации NaCN 2000 мг/л с добавлением ионно-обменной смолы в количестве 6 % от объёма пульпы как более оптимальный сорбент при переработке концентратов содержащие углеродистые вещества [11].

Результаты предварительного сорбционного цианирования приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Результаты КИО и предварительного сорбционного цианирования

№	Наименование продукта	Исходные данные			Результаты после КИО				Результаты предварительного сорбционного цианирования		
		Au, г/т	Ss, %	C _{org} , %	Au, г/т	Ss, %	C _{org} , %	Степень окисления, %	До Au, г/т	После Au, г/т	Изв-е, %
1	Флотоконцентрат без обработки	26,0	15,81	3,65	23,50	10,50	3,30	33,89	23,50	15,65	33,40
2	Флотоконцентрат с обработкой H ₂ SO ₄ (расход-160кг/т) и лигносульфонатом натрия (расход-10кг/т)	26,0	14,27	3,56	21,90	6,30	3,22	55,85	21,90	11,65	46,80

После завершения процесса предварительного сорбционного цианирования проводилась фильтрация хвостов в фильтр-прессе. Этот этап необходим для отделения жидкой фазы от твёрдой и подготовки продукта к последующим стадиям обработки. Фильтрация продолжается до достижения оптимальной влажности конечного продукта — 30–32 %.

Поддержание такого уровня влажности обеспечивает удобство транспортировки и хранения, а также подготовку материала к следующему технологическому этапу — сушке. Контроль влажности является важным параметром, поскольку избыток влаги может снизить эффективность последующей сушки и ухудшить качество конечного продукта. Влажность измеряется регулярно, а процесс фильтрации регулируется для поддержания заданных условий. Использование фильтр-пресса позволяет эффективно отделять жидкую фазу и минимизировать потери драгоценных металлов, остающихся в твёрдой фазе, что способствует повышению общей производительности технологической линии.

Отфильтрованный и подготовленный продукт загружается в приёмный бункер сушильной печи партиями с периодичностью примерно каждые 20 минут. Далее материал подается внутрь печи с помощью шнекового питателя. Сушка продукта осуществлялась в барабанной сушильной печи ВГТП–2,6 с основными параметрами: диаметр барабана — 500 мм, длина — 2,6 м, скорость вращения — 0,67 об/мин. Природный газ подается в печь с противоположной стороны загрузки продукта с расходом около 3 м³/ч, при этом для обеспечения полного и эффективного горения одновременно подавался воздух. В результате внутри сушильной печи поддерживалась температура в диапазоне 150–180 °С.

Для точного регулирования подачи газа в технологическую систему использовался автоматический регулятор давления газа модели Madas FRG/2MCDN15 FC02020-Анкас. Этот регулятор обеспечивает стабильное давление газа, что критично для поддержания эффективного и безопасного процесса сушки. После завершения сушки влажность кека снижалась до оптимального уровня, составляющего примерно 7–10 %, что обеспечивает удобство дальнейшей обработки и стабильность качества конечного продукта.

Высушенный кек направлялся во вращающуюся трубчатую печь обжига ВГТП-8,5, изготовленную на Навоийском машиностроительном заводе (НМЗ) в составе НГМК. Печь имеет диаметр 500 мм и длину 8,5 м. Скорость вращения составляет 0,67 об/мин, что обеспечивает равномерное перемещение материала вдоль печи. Уклон печи составляет 2–3°, что способствует естественному перемещению сырья по рабочему пространству. Такая конструкция позволяет эффективно нагревать кек и обеспечивать качественный обжиг в непрерывном режиме.

В загрузочной зоне печи (сухой конец) материал медленно перемещается навстречу потокам горячих газов, образующихся в результате сгорания серы и углерода, содержащихся в сырье, а также за счёт подачи природного газа (расход 11–14 м³/час) и воздуха (300 – 350 м³/час) с горячего конца печи. Такая организация газового потока обеспечивает эффективный теплообмен и равномерный прогрев материала.

Температурный режим печи по трём контрольным точкам составлял:

1. Точка 1 (горячая зона): 550–600 °С;
2. Точка 2 (средняя часть печи): 480–500 °С;
3. Точка 3 (загрузочная зона): 430–450 °С.

Для автоматического регулирования подачи природного газа использовался регулятор давления Madas FRG/2MCDN15 FC02020-Анкас, обеспечивающий стабильность давления и безопасность процесса обжига.

В ёмкости объёмом 1 м³ проводилось сорбционное цианирование огарка в течение 12 часов при концентрации NaCN 2000 мг/л с добавлением активированного угля в количестве 6 % от объёма пульпы. После сорбционного цианирования пульпа обрабатывалась щелочью (NaOH) при концентрации 5 г/л: при нагреве до 80–85 °С в течение 6 часов и без нагрева — в течение 12 часов.

Результаты сорбционного цианирования огарка приведены в таблице 3.

Таблица 3.

Результаты обжига и сорбционного цианирования огарка

№	Наименование продукта	Результаты после обжига				Результаты сорбционного цианирования огарка			Результаты горячей щелочной обработки хвостов сорбционного цианирования огарка			Суммарное извлечение из флотоконцентрата, %
		Аи, г/т	SS, %	C _{org} , %	Степень окиснения, %	До Аи, г/т	После Аи, г/т	Изв-е %	До Аи, г/т	После Аи, г/т	Изв-е %	
1.	Хвосты предварительной сорбции без кислотной обработки (нагрузка 40 кг/ч)	17,30	0,05	0,11	99,52	17,30	7,40	57,23	7,40	5,20	29,73	79,98

№	Наименование продукта	Результаты после обжига				Результаты сорбционного цианирования огарка			Результаты горячей щелочной обработки хвостов сорбционного цианирования огарка			Суммарное извлечение из флотоконцентрата, %
		Au, г/т	Ss, %	C _{org} , %	Степень окиснения, %	До Au, г/т	После Au, г/т	Изв-е %	До Au, г/т	После Au, г/т	Изв-е %	
	Хвосты предварительной сорбции после кислотной обработки (нагрузка 40 кг/ч)	15,15	0,03	0,15	99,52	15,15	5,80	61,72	5,80	3,40	41,38	88,06
2.	Хвосты предварительной сорбции без кислотной обработки (нагрузка 50 кг/ч)	17,05	0,18	0,23	98,29	17,05	7,50	56,01	7,50	5,30	29,33	79,29
	Хвосты предварительной сорбции после кислотной обработки (нагрузка 50 кг/ч)	15,10	0,07	0,17	98,89	15,10	5,10	66,23	5,10	4,00	21,57	85,91
3.	Хвосты предварительной сорбции без кислотной обработки (нагрузка 60 кг/ч)	16,90	0,28	0,35	97,33	16,90	8,35	50,59	8,35	6,15	26,35	75,76
	Хвосты предварительной сорбции после кислотной обработки (нагрузка 60 кг/ч)	13,70	0,14	0,18	97,78	13,70	7,00	48,91	7,00	4,10	41,43	84,08
4.	Хвосты предварительной сорбции без кислотной обработки (нагрузка 70 кг/ч)	16,85	0,35	0,52	96,67	16,85	8,00	52,52	8,00	6,15	23,13	75,69
	Хвосты предварительной сорбции после кислотной обработки (нагрузка 70 кг/ч)	14,15	0,21	0,21	96,67	14,15	6,50	54,06	6,50	4,90	24,62	81,58

№	Наименование продукта	Результаты после обжига				Результаты сорбционного цианирования огарка			Результаты горячей щелочной обработки хвостов сорбционного цианирования огарка			Суммарное извлечение из флотоконцентрата, %
		Au, г/т	Ss, %	C _{org} , %	Степень окиснения, %	До Au, г/т	После Au, г/т	Изв-е %	До Au, г/т	После Au, г/т	Изв-е %	
5.	Хвосты предварительной сорбции без кислотной обработки (нагрузка 80 кг/ч)	16,80	1,47	2,45	86,00	16,80	10,80	35,71	10,80	8,10	25,00	67,89
	Хвосты предварительной сорбции после кислотной обработки (нагрузка 80 кг/ч)	14,25	0,47	0,87	92,54	14,25	7,00	50,88	7,00	6,00	14,29	77,60
6.	Хвосты предварительной сорбции без кислотной обработки (нагрузка 90 кг/ч)	16,20	2,53	2,55	75,90	16,20	12,40	24,69	12,40	10,55	14,92	56,63
	Хвосты предварительной сорбции после кислотной обработки (нагрузка 90 кг/ч)	14,00	0,71	1,29	88,73	14,00	10,10	27,86	10,10	8,30	17,83	68,46
7.	Хвосты предварительной сорбции без кислотной обработки (нагрузка 100 кг/ч)	15,90	2,47	2,72	76,48	15,90	12,60	20,75	12,60	11,00	12,70	54,33
	Хвосты предварительной сорбции после кислотной обработки (нагрузка 100 кг/ч)	13,70	1,25	1,40	80,16	13,70	10,20	25,55	10,20	8,20	19,61	68,16

Проведённые полупромышленные испытания подтвердили осуществимость и эффективность предложенной технологии комбинированной переработки упорных углеродистых золотосодержащих руд. Технология основана на последовательном применении ультратонкого измельчения, кислотной обработки, кислородно-известкового окисления, предварительной обработки лигносульфонатом натрия, сорбционного цианирования, окислительного обжига и горячей щелочной обработки. Комплексное применение этих этапов переработки обеспечивает более полное высвобождение

золотосодержащих минеральных фаз, снижает сорбционную активность природных углеродистых веществ и смягчает эффект «прег-роббинга», тем самым повышая эффективность последующего сорбционного цианирования.

Результаты показали, что кислотная обработка в сочетании с кислородно-известковым окислением создает благоприятные условия для разложения сульфидной матрицы, облегчая дальнейшее окисление сульфидных минералов. Кроме того, лигносульфонат натрия эффективно пассивирует углеродистые вещества, тем самым снижая потери золота, вызванные адсорбцией растворенных комплексов золота на природном углероде.

В ходе испытаний в пилотном масштабе был достигнут общий коэффициент извлечения золота 88,06 % при производительности установки 40 кг/ч, что представляет собой улучшение на 13,4 % по сравнению с технологическим процессом без предварительной кислотной обработки. По мере увеличения производительности переработки наблюдалось постепенное снижение коэффициента извлечения золота, что указывает на необходимость дальнейшей оптимизации времени пребывания материала в основных технологических агрегатах и уточнения технологических параметров отдельных этапов процесса.

Заключение

Полупромышленные испытания подтвердили технологическую эффективность предложенной комбинированной технологической схемы переработки упорных углеродистых золотосодержащих руд, включающей последовательное сверхтонкое измельчение, кислотную обработку, кислородно-известковое окисление, предварительную обработку лигносульфонатом натрия, сорбционное цианирование, окислительный обжиг и горячую щелочную обработку. Комплексное применение этих этапов переработки способствует высвобождению золота, заключенного в сульфидную матрицу, снижает сорбционную активность углеродистых веществ и смягчает эффект «прег-роббинга», тем самым повышая эффективность последующего извлечения золота.

Результаты показали, что предварительная кислотная обработка в сочетании с кислородно-известковым окислением значительно усиливает разложение сульфидных минералов и создает благоприятные условия для последующего цианирования. Кроме того, лигносульфонат натрия эффективно пассивирует природные углеродистые вещества, тем самым снижая потери золота, связанные с повторной адсорбцией растворенных комплексов золота. Наивысший общий коэффициент извлечения золота, равный 88,06 %, был достигнут при производительности пилотной установки 40 кг/ч, что представляет собой улучшение на 13,4 % по сравнению с традиционным процессом без предварительной кислотной обработки. По мере увеличения производительности переработки наблюдалось постепенное снижение коэффициента извлечения золота, что указывает на необходимость дальнейшей оптимизации времени пребывания материала и технологических параметров на отдельных этапах переработки.

Полученные результаты подтверждают воспроизводимость лабораторных данных в полупромышленных условиях и демонстрируют потенциал предлагаемой комбинированной технологии переработки для промышленного применения в отношении упорных углеродистых золотосодержащих руд. Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию технологических параметров отдельных этапов процесса,

увеличение производительности установки без снижения коэффициента извлечения золота, а также на проведение комплексной технико-экономической оценки для обоснования внедрения предлагаемой технологии в промышленных масштабах.

Список литературы

1. Абдурахмонов С.А. Исследование упорности золотосодержащих руд месторождения Амантайтау // Горный вестник Узбекистана. – 2021. – № 2.
2. Богородский А.В., Генералов В.А. Окислительные методы подготовки упорных золото-сульфидных концентратов к цианированию // Записки Горного института. – 2022. – Т. 255.
3. С.С. Кароматов, Ф.Г. Чулиев, Р.А. Хамидов. Влияние лигносульфоната натрия на прег-роббинг при сорбционном цианировании // Universum: технические науки. – 2024. – № 7.
4. J. Liu, X. Lv, Y. Zhang [et al.]. Passivation and blinding mechanism of sodium lignosulfonate on preg-robbing carbonaceous matter in gold cyanidation leaching // Hydrometallurgy. – 2022. – Т. 211.
5. M.O. Amankwah, W.T. Yen, J.A. Ramsay [et al.]. The application of organic depressants to mitigate preg-robbing in double refractory gold ore processing // Minerals Engineering. – 2021. – Т. 163. – P. 1–12.
6. Miller J.D., Wan R., Diaz X. Preg-robbing gold ores // Developments in Mineral Processing. – 2005. – Т. 15.
7. Papangelakis V.G., Demopoulos G.P. Acid pressure oxidation of pyrite: reaction kinetics // Hydrometallurgy. – 1991. – Т. 26.
8. Rees K.L. van Deventer J.S.J. Preg-robbing phenomena in the cyanidation of sulphide gold ores // Hydrometallurgy. – 2000. – Т. 58.
9. X. Chen, Y. Li, H. Zhang [et al.]. Enhanced oxidation mechanism of refractory gold-bearing pyrite catalyzed by iron ions in aqueous media // Minerals Engineering. – 2023. – Т. 199. – P. 108382–108390.
10. Z.Y. Wang, Q.M. Feng, Y.P. Lu [et al.]. Roasting kinetics and phase transformations during pre-treatment of double refractory gold concentrates // Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – Т. 24.
11. Zhou Q. Surfactant blinding agents for refractory carbonaceous gold ores in cyanide leaching // Materials Science, Chemistry. – 2015.

References

1. [Study of refractoriness of gold-bearing ores of the Amantaytau deposit]. Gornyj vestnik Uzbekistana, 2021, no. 2 (85), P. 45–48. (In Russ.)
2. Bogorodskii A.V., Generalov V.A. [Oxidative preparation methods of refractory gold-sulfide concentrates for cyanidation]. Zapiski Gornogo instituta, 2022, vol. 255, P. 415–426. DOI: 10.31897/PMI.2022.61. (In Russ.)

3. Karomatov S.S., Chuliyev F.G., Khamidov R.A. [Effect of sodium lignosulfonate on preg-robbing during sorption cyanidation]. *UNIVERSUM: Tekhnicheskie nauki*, 2024, no. 7 (124), P. 6–11. (In Russ.)
4. Liu J., Lv X., Zhang Y. [et al.] Passivation and blinding mechanism of sodium lignosulfonate on preg-robbing carbonaceous matter in gold cyanidation leaching. *Hydrometallurgy*, 2022, vol. 211, art. 105881.
5. Amankwah M.O., Yen W.T., Ramsay J.A. [et al.] The application of organic depressants to mitigate preg-robbing in double refractory gold ore processing. *Minerals Engineering*, 2021, vol. 163, art. 106798.
6. Miller J.D., Wan R., Diaz X. Preg-robbing gold ores. *Developments in Mineral Processing*, 2005, vol. 15, P. 937–972.
7. Papangelakis V.G., Demopoulos G.P. Acid pressure oxidation of pyrite: reaction kinetics. *Hydrometallurgy*, 1991, vol. 26, P. 309–325.
8. Rees K.L., van Deventer J.S.J. Preg-robbing phenomena in the cyanidation of sulphide gold ores. *Hydrometallurgy*, 2000, vol. 58, P. 61–80.
9. Chen X., Li Y., Zhang H. [et al.] Enhanced oxidation mechanism of refractory gold-bearing pyrite catalyzed by iron ions in aqueous media. *Minerals Engineering*, 2023, vol. 199, art. 108120.
10. Wang Z.Y., Feng Q.M., Lu Y.P. [et al.] Roasting kinetics and phase transformations during pre-treatment of double refractory gold concentrates // *Journal of Materials Research and Technology*,. – 2023.
11. [et al.] Surfactant blinding agents for refractory carbonaceous gold ores in cyanide leaching. *Materials Science, Chemistry*, 2015, P. 9.

Статья поступила в редакцию: 09.08.2026

Статья принята к публикации: 19.08.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 669.3+546.57

DOI: 10.32743/UniTech.2026.149.8.23334

Предварительная гидрометаллургическая переработка конвертерной пыли медеплавильного производства методом сернокислотного выщелачивания

Эшонкулов Учкун Худайназар угли

PhD

доц. Каршинский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Карши

ORCID: 0009-0002-8415-7218

E-mail: ulugruziyev2@gmail.com

Хакбердиев Дилшод Кодир угли

ассистент

Каршинский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Карши

Preliminary hydrometallurgical processing of converter dust from copper smelting production by sulfuric acid leaching method

Eshonkulov Uchkun Khudajnazar ugli

PhD, Associate Professor

Karshi State Technical University

Republic of Uzbekistan, Karshi

Khakberdiev Dilshod Kodir ugli

Assistant

Karshi State Technical University

Republic of Uzbekistan, Karshi

Аннотация

Конвертерная пыль медеплавильного производства представляет собой ценное техногенное сырьё, содержащее медь, свинец, цинк, висмут, железо и благородные металлы. Рациональная переработка данного материала позволяет одновременно извлекать ценные компоненты и снижать экологическую нагрузку, связанную с накоплением металлургических отходов. Целью настоящей работы является исследование процесса предварительной гидрометаллургической переработки конвертерной пыли методом селективного сернокислотного выщелачивания для извлечения меди и цинка с последующим

Библиографическое описание: Эшонкулов У.Х.У., Хакбердиев Д.К.У. Предварительная гидрометаллургическая переработка конвертерной пыли медеплавильного производства методом сернокислотного выщелачивания // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23334>

концентрированием висмута в твёрдом остатке. В качестве объекта исследования использовали конвертерную пыль медеплавильного производства АО «Алмалыкский ГМК». Гранулометрический состав исследовали методом лазерной дифракции, фазовый состав определяли методом рентгенофазового анализа (XRD), а морфологические особенности частиц изучали с использованием сканирующей электронной микроскопии (SEM) и энергодисперсионного анализа (EDS). Установлено, что материал характеризуется высокой дисперсностью и сложным минералогическим составом. Экспериментально показано, что при концентрации серной кислоты 50 г/л, комнатной температуре и продолжительности процесса 60 мин достигается высокая степень извлечения меди при сохранении висмута в твёрдом остатке. После выщелачивания содержание висмута в кеке увеличивается примерно до 5,3 %, что свидетельствует об эффективном концентрировании данного металла на первой стадии переработки. Полученные результаты подтверждают перспективность применения селективного сернокислотного выщелачивания в технологии комплексной переработки конвертерной пыли и создают предпосылки для дальнейшего извлечения висмута гидрометаллургическими методами.

Abstract

Converter dust generated during copper smelting is a valuable secondary resource containing copper, lead, zinc, bismuth, iron, and precious metals. Efficient utilization of this technogenic material enables the recovery of valuable components while reducing the environmental impact associated with metallurgical waste accumulation. The aim of this study was to investigate the preliminary hydrometallurgical treatment of converter dust by selective sulfuric acid leaching to recover copper and zinc while concentrating bismuth in the solid residue. Converter dust collected from the copper smelter of Almalyk Mining and Metallurgical Complex was used as the research material. Particle size distribution was determined by laser diffraction, mineralogical composition was analyzed using X-ray diffraction (XRD), and particle morphology and elemental distribution were examined by scanning electron microscopy (SEM) coupled with energy-dispersive spectroscopy (EDS). The investigated material exhibited a highly dispersed structure and a complex mineralogical composition. Experimental results demonstrated that the optimum leaching conditions were achieved at a sulfuric acid concentration of 50 g/L, room temperature, and a leaching time of 60 min, providing a high copper extraction efficiency while retaining bismuth in the insoluble residue. After leaching, the bismuth content in the residue increased to approximately 5.3 wt.%, indicating effective enrichment during the preliminary processing stage. The obtained results confirm that selective sulfuric acid leaching is an efficient pretreatment step for the comprehensive hydrometallurgical processing of converter dust and provides favorable conditions for the subsequent recovery of bismuth from the enriched residue.

Ключевые слова: конвертерная пыль, сернокислотное выщелачивание, гидрометаллургия, медь, цинк, висмут, комплексная переработка.

Keywords: converter dust, sulfuric acid leaching, hydrometallurgy, copper extraction, zinc, bismuth enrichment, metallurgical waste.

Введение

Конвертерная пыль медеплавильного производства представляет собой ценное техногенное сырьё, содержащее значительные количества цветных и благородных металлов, таких как медь, свинец, цинк, висмут, железо и серебро. Переработка данного вида отходов позволяет не только извлекать ценные компоненты, но и решать важные экологические задачи, связанные с сокращением объёмов накопления металлургических отходов и снижением негативного воздействия на окружающую среду [1]. В связи с этим конвертерная пыль рассматривается как перспективный источник вторичных сырьевых ресурсов для получения цветных металлов.

Проблема переработки пылевидных продуктов медеплавильного производства остаётся актуальной на протяжении многих десятилетий. Снижение качества медных концентратов, увеличение содержания примесных элементов и вовлечение в переработку более сложного сырья приводят к росту количества образующейся конвертерной пыли и усложняют её дальнейшую переработку [8]. Количество и состав пыли зависят от типа плавильного агрегата, минералогического состава концентратов, степени кислородного обогащения дутья, состава флюсов и количества оборотных материалов. На медеплавильном заводе АО «Алмалыкский ГМК» при конвертировании медных штейнов образуется мелкодисперсная конвертерная пыль, содержащая значительные количества меди, свинца, цинка, висмута и благородных металлов. Согласно литературным данным, количество конвертерной пыли составляет в среднем 5–10 % массы перерабатываемой шихты, что обуславливает необходимость её комплексной переработки [12].

В настоящее время для переработки конвертерной пыли широко применяются гидрометаллургические методы, основанные на селективном выщелачивании легкорастворимых соединений меди и цинка. Такой подход позволяет эффективно извлекать основные цветные металлы в раствор и одновременно получать твёрдый остаток, обогащённый менее растворимыми компонентами [13]. Эффективность данной стадии во многом определяет технологическую и экономическую целесообразность дальнейшей комплексной переработки конвертерной пыли [7].

Целью настоящей работы является исследование процесса предварительной гидрометаллургической переработки конвертерной пыли медеплавильного производства методом селективного серноокислотного выщелачивания. Основное внимание уделено изучению условий извлечения меди и цинка в раствор с получением твёрдого остатка, обогащённого висмутом, который может служить перспективным сырьём для последующей переработки [4].

Методология исследования

В качестве объекта исследования использовали образцы конвертерной пыли, отобранные на медеплавильном производстве АО «Алмалыкский ГМК». Исходный материал применяли без дополнительной подготовки. Предварительная гидрометаллургическая обработка заключалась в селективном серноокислотном выщелачивании, направленном на извлечение меди и цинка в раствор с сохранением висмута в твёрдом остатке. Все опыты проводили при атмосферном давлении, а за исключением экспериментов по изучению

влияния температуры-при комнатной температуре, что обусловлено стремлением максимально приблизить условия исследований к промышленному процессу и снизить эксплуатационные затраты [14, 9, 10].

В качестве объекта исследования использовалась мелкодисперсная конвертерная пыль медеплавильного производства. Основная масса материала представлена частицами размером менее 0,074 мм [2]. Химический состав исходной конвертерной пыли приведён в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав мелкодисперсной конвертерной пыли

Компонент	Bi, %	Pb, %	Cu, %	Zn, %	Au, г/т	Ag, г/т	Fe, %	Собщ, %
Содержание	0,1-0,25	25,0-45,0	1,5-5,0	2,0-8,0	2,0-3,0	180,0-204,0	-	0,1-0,35

После завершения выщелачивания жидкую и твёрдую фазы разделяли фильтрованием. Полученный нерастворимый остаток без дополнительной термической обработки использовали в качестве исходного сырья для последующих исследований по извлечению висмута [5]. Отказ от стадии сушки позволил исключить возможное влияние температуры на фазовый состав материала. При расчёте плотности пульпы учитывали остаточную влажность твёрдой фазы. Во всех экспериментах применяли реактивы аналитической чистоты [16, 18, 11].

Экспериментальные исследования проводили в стеклянном реакторе объемом 2000 мл, оснащённом магнитной мешалкой с нагревом DLAB MS-H280-Pro (DLAB Scientific, Китай). Устройство использовали для перемешивания реакционной смеси и регулирования температуры процесса. Скорость перемешивания составляла 300 об/мин. Для предотвращения потерь раствора вследствие испарения реактор оснащали обратным водяным холодильником.

Процесс селективного серноокислотного выщелачивания проводили при различных концентрациях серной кислоты и продолжительности процесса [14]. Оптимальные условия выщелачивания были установлены при концентрации H_2SO_4 50 г/л, комнатной температуре и продолжительности 60 мин [17]. При данных условиях степень извлечения меди составляла 80–90 %, при этом висмут преимущественно сохранялся в твёрдом остатке, что обеспечивало его концентрирование до приблизительно 5,3 мас. %.

Химический состав исходной конвертерной пыли и продуктов переработки определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа (XRF) с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра Rigaku NEX CG (Rigaku Corporation, Япония). Морфологические особенности частиц и элементный состав исследовали методом сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным рентгеновским анализом (SEM–EDS) с использованием сканирующего электронного микроскопа Thermo Fisher Scientific Apreo 2 S LoVac (Thermo Fisher Scientific, США).

Гранулометрический состав конвертерной пыли исследовали методом лазерной дифракции. Перед анализом образцы высушивали и диспергировали, после чего строили кривые распределения частиц по размерам и определяли характерные гранулометрические параметры d_{10} , d_{50} и d_{90} .

Минералогический состав образцов изучали методом рентгенофазового анализа (XRD). По результатам исследования установлено, что основными фазовыми составляющими конвертерной пыли являются магнетит (Fe_3O_4), гематит (Fe_2O_3), куприт (Cu_2O), тенорит (CuO) и кварц (SiO_2). Морфологические особенности частиц и распределение химических элементов дополнительно исследовали с использованием сканирующей электронной микроскопии (SEM) в сочетании с энергодисперсионным рентгеноспектральным анализом (EDS).

Каждый эксперимент проводили в трёх независимых параллельных опытах ($n = 3$). Полученные экспериментальные данные обрабатывали статистически и представляли в виде среднего арифметического значения $\pm$ стандартного отклонения ($\text{Mean} \pm \text{SD}$). Относительную погрешность определяли на основании стандартного отклонения результатов параллельных измерений. Для оценки достоверности полученных результатов рассчитывали 95 %-ный доверительный интервал среднего значения с использованием распределения Стьюдента.

Результаты и обсуждение

Проведённые исследования показали, что конвертерная пыль медеплавильного производства представляет собой перспективное техногенное сырьё для комплексной гидрометаллургической переработки. Гранулометрический анализ установил, что материал характеризуется высокой дисперсностью, при этом основная масса частиц имеет размеры менее 0,074 мм, а средний размер частиц (d_{50}) составляет около 15 мкм [6]. Высокая степень дисперсности способствует увеличению площади контакта твёрдой фазы с раствором и положительно влияет на скорость процессов выщелачивания

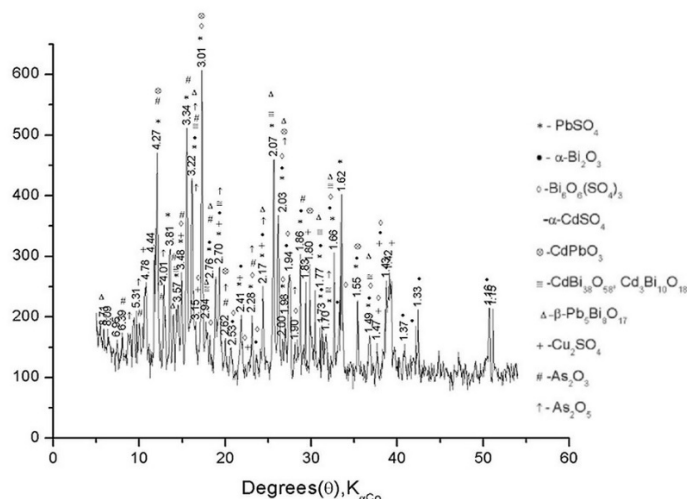
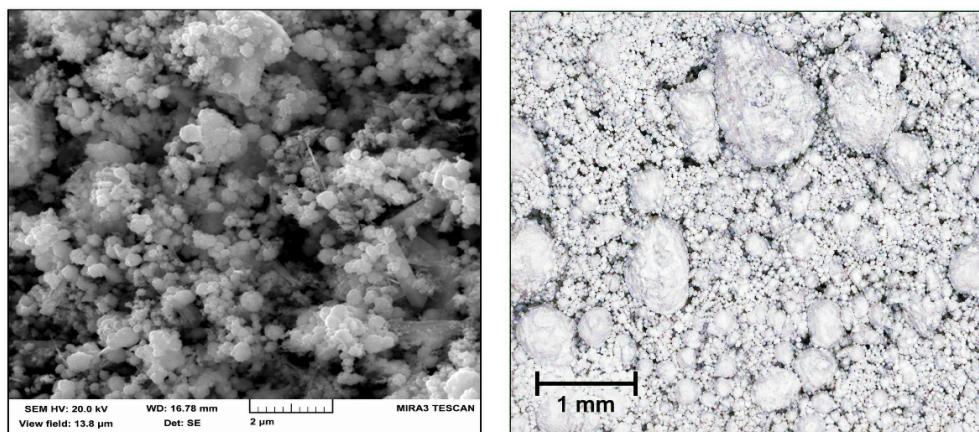


Рисунок 1. Рентгенофазовая дифрактограмма образца конвертерной пыли медеплавильного производства

Как видно из рисунка 1, в составе исследуемой конвертерной пыли идентифицированы преимущественно сульфатные и оксидные соединения свинца, висмута, кадмия, меди и мышьяка. Наличие фаз PbSO_4 , $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$, $\text{Bi}_2\text{O}(\text{SO}_4)_3$, CdSO_4 , CdPbO_3 , Cu_2SO_4 , As_2O_3 и As_2O_5

свидетельствует о сложном фазовом составе материала, сформировавшемся в процессе конвертерной плавки. Присутствие сульфатных соединений меди и оксидных фаз объясняет возможность их селективного поведения при сернокислотном выщелачивании



а

б

Рисунок 2. Морфология частиц исходной конвертерной пыли

(а) SEM-изображение; (б) изображение, полученное методом стереомикроскопии.

Как видно из рисунка 2, конвертерная пыль представляет собой мелкодисперсный материал, состоящий из агломерированных частиц различной формы и размеров. По данным стереомикроскопии наблюдаются агрегаты неправильной формы, тогда как SEM-исследование показывает наличие мелких сферических и неправильной формы частиц, образующих плотные агломераты. Такая морфология способствует увеличению удельной поверхности материала и повышает эффективность сернокислотного выщелачивания [17]

Для предварительной переработки конвертерной пыли был применён метод селективного сернокислотного выщелачивания, направленный на извлечение меди и цинка в раствор при сохранении висмута в твёрдом остатке. Экспериментальные исследования показали, что использование разбавленной серной кислоты обеспечивает эффективное растворение легкорастворимых соединений меди и цинка. Наиболее благоприятные результаты были получены при концентрации серной кислоты 50 г/л, комнатной температуре и продолжительности процесса 60 минут, при которых степень извлечения меди достигала 80–90 %. При этом значительная часть цинка также переходила в раствор, тогда как висмут практически полностью оставался в нерастворимом остатке (3-рисунок).

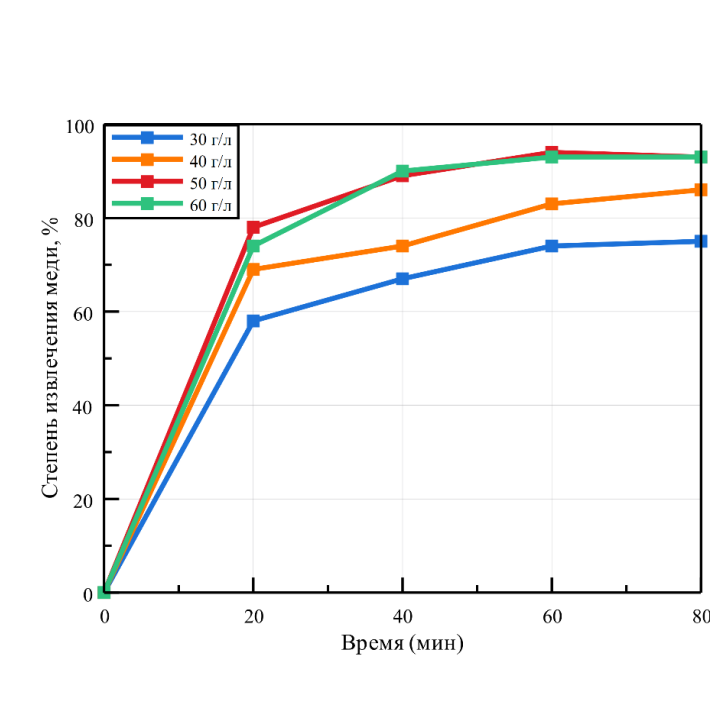


Рисунок 3. Зависимость степени извлечения меди из конвертерной пыли от концентрации H_2SO_4 и продолжительности сернокислотного выщелачивания

После сернокислотного выщелачивания в твёрдом остатке преимущественно сохраняются труднорастворимые соединения висмута и свинца. Основными фазами кека являются $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$, $\text{Bi}_6\text{O}_8(\text{SO}_4)_3$, $\beta\text{-Pb}_3\text{Bi}_8\text{O}_{17}$, PbSO_4 , CdPbO_3 , а также сложные оксидные соединения висмута и кадмия. Кроме того, в остатке присутствуют оксиды железа и соединения мышьяка. В результате удаления меди и цинка содержание висмута в кеке возрастает, что делает его перспективным сырьём для последующего гидрометаллургического извлечения висмута.

Анализ состава твёрдого остатка после выщелачивания показал, что содержание висмута увеличилось примерно до 5,3 %, что свидетельствует о его эффективном концентрировании на первой стадии переработки. Полученный остаток может рассматриваться как перспективное сырьё для дальнейшего извлечения висмута гидрометаллургическими методами. Одновременно предварительное удаление меди и цинка позволяет повысить эффективность последующих стадий переработки и снизить расход реагентов.

Таким образом, результаты выполненных исследований подтверждают, что предварительное сернокислотное выщелачивание является эффективной стадией комплексной переработки конвертерной пыли. Применение данного метода обеспечивает высокую степень извлечения меди и цинка при минимальных потерях висмута, что создаёт благоприятные условия для последующего комплексного использования техногенного сырья.

Заключение

Проведённые исследования показали, что конвертерная пыль медеплавильного производства АО «Алмалыкский ГМК» является перспективным техногенным сырьём для комплексной гидрометаллургической переработки. Гранулометрический, рентгенофазовый

и электронно-микроскопический анализы подтвердили высокую дисперсность материала и сложный фазовый состав, представленный преимущественно оксидными и сульфатными соединениями меди, свинца, висмута, кадмия и мышьяка. Установлено, что применение селективного сернокислотного выщелачивания обеспечивает эффективное извлечение меди и цинка в раствор при сохранении труднорастворимых соединений висмута в твёрдом остатке.

Экспериментально установлено, что наиболее эффективные условия процесса достигаются при концентрации серной кислоты 50 г/л и продолжительности выщелачивания 60 мин, при которых степень извлечения меди достигает 80–90 %. После удаления меди и цинка содержание висмута в кеке увеличивается примерно до 5,3 %, что свидетельствует об эффективном концентрировании данного металла на предварительной стадии переработки. Полученные результаты подтверждают целесообразность использования селективного сернокислотного выщелачивания в качестве первой стадии комплексной технологии переработки конвертерной пыли и создают основу для последующего гидрометаллургического извлечения висмута из обогащённого твёрдого остатка.

Список литературы

1. Зотов М.А. Роль зеленых инноваций и зеленых передовых производственных технологий в сокращении образования отходов в металлургическом комплексе // Прогрессивная экономика. – 2025. – С. 263–283.
2. Саидахмедов А.А. и др. Исследование распределение дисперсных частиц ценных компонентов при переработке конвертерной пыли медеплавильных заводов // Sanoatda raqamli texnologiyalar/Цифровые технологии в промышленности. – 2024. – Т. 2. – С. 49–56.
3. Саидахмедов А.А., Худояров С.Р., Мирзанова З.А. Разработка технологии получения свинца из конвертерной пыли // ТЕСНика. – 2020. – С. 20–23.
4. Юсупходжаев, А.А. (2013). Научно-технические основы технологий переработки техногенных отходов. Конспект лекций для магистров специальности 5A520408. ТГТУ. – 2019.
5. ЮХИН Ю.М. и др. Получение висмута и его соединений высокой чистоты // Химия в интересах устойчивого развития. – 2024. – Т. 32. – С. 708–717.
6. Allahkarami E. et al. Assessment of kinetic models for oxidative leaching of copper and zinc from converter furnace dust: A sustainable approach to metal recovery // Separation and Purification Technology. – 2025.
7. Caplan M. et al. Hydrometallurgical leaching of copper flash furnace electrostatic precipitator dust for the separation of copper from bismuth and arsenic // Metals. – 2021. – Т. 11.
8. Cheema H.A. et al. Dissolution of molybdenite roasting flue dust in sulfuric acid: kinetics and mechanism for molybdenum and rhenium leaching // Chemical Papers. – 2022. – Т. 76. – P. 4049–4058.
9. Dosmukhamedov N., Zholdasbay E., Argyn A. Extraction of Pb, Cu, Zn and As from fine dust of copper smelting industry via leaching with sulfuric acid // Sustainability. – 2023. – Т. 15.

10. Gao W. et al. Comprehensive recovery of valuable metals from copper smelting open-circuit dust with a clean and economical hydrometallurgical process // *Chemical Engineering Journal*. – 2021. – Т. 424.
11. Kursunoglu S. A review on the recovery of critical metals from mine and mineral processing tailings: recent advances // *Journal of Sustainable Metallurgy*. – 2050. – Т. 11. – P. 2023–2050.
12. Nakhaei F. et al. Characterization and leaching feasibility studies of copper flue dust for the recovery of main and trace metals // *Journal of Sustainable Metallurgy*. – 2025. – Т. 11. – P. 2215–2235.
13. Sun J. et al. Kinetics analysis of copper extraction from copper smelting slag by sulfuric acid oxidation leaching // *Minerals Engineering*. – 2024. – Т. 216.
14. Wang X. et al. Valuable metals recovery and hazardous waste elimination from copper smelting dusts: A review // *Separation and Purification Technology*. – 2025.
15. Wu J.Y. et al. Selective leaching process for the recovery of copper and zinc oxide from copper-containing dust // *Environmental technology*. – 2015. – Т. 36. – P. 2952–2958.
16. Xiao W. et al. A method for extracting valuable metals from low nickel matte by non-oxidative leaching with H₂SO₄ // *Separation and Purification Technology*. – 2021. – Т. 270.
17. Zhang Y. et al. Separation of arsenic and extraction of zinc and copper from high-arsenic copper smelting dusts by alkali leaching followed by sulfuric acid leaching // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2021. – Т. 9.
18. Zhang G. et al. Whole-Process Management of Arsenic in Copper Smelting Dust: A Review of Removal, Stabilization, and Resource Recovery Technologies // *JOM*. – 2026. – P. 1–26.

References

1. Zotov M.A. [The role of green innovations and green advanced manufacturing technologies in reducing waste generation in the metallurgical complex]. *Progressivnaya ekonomika*. – 2025. – № 11. – P. 263–283. – DOI: 10.54861/27131211_2025_11_263. (In Russ.)
2. Saidakhmedov A.A., et al. [Study of the distribution of dispersed particles of valuable components during processing of converter dust from copper smelting plants]. *Sanoatda raqamli texnologiyalar*. 2, no. 2, P. 49–56. (In Russ.)
3. Saidakhmedov A.A., Khudoyarov S.R., Mirzanova Z.A. [Development of a technology for producing lead from converter dust]. *Tekhnika*. – 2020. – № 2. – P. 20–23. – DOI: 10.24411/2181-0753-2020-10004. (In Russ.)
4. Yusupkhodjaev A.A. [Scientific and technical foundations of technologies for processing technogenic wastes]. Lecture notes for master's students of specialty 5A520408. Tashkent, Tashkent State Technical University, 2019. (In Russ.)
5. Yukhin Yu.M., Koledova E.S., Daminov A.S., Timakova E.V., Kuznetsov V.A., Sheina O.D. [Obtaining bismuth and its high-purity compounds]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 2024, vol. 32. – 2024. – № 5. – P. 708–717. – DOI: 10.15372/KhUR2024604. (In Russ.)

6. Allahkarami E., et al. Assessment of kinetic models for oxidative leaching of copper and zinc from converter furnace dust: A sustainable approach to metal recovery. *Separation and Purification Technology*, 2025, P. 134512.
7. Caplan M. et al. Hydrometallurgical leaching of copper flash furnace electrostatic precipitator dust for the separation of copper from bismuth and arsenic. *Metals*, 2021, vol. 11, P. 371–2021. – № 2. – DOI: 10.3390/met11020371.
8. Cheema H.A., Bhatti I.A., Srivastava R.R., Jahan N., Zia M.A. Dissolution of molybdenite roasting flue dust in sulfuric acid: kinetics and mechanism for molybdenum and rhenium leaching. *Chemical Papers*, 2022, vol. 76–2022. – № 7. – P. 4049–4058. – DOI: 10.1007/s11696-022-02145-9.
9. Dosmukhamedov N., Zholdasbay E., Argyn A. Extraction of Pb, Cu, Zn and As from fine dust of copper smelting industry via leaching with sulfuric acid. *Sustainability*, 2023, vol. 15, P. 15881–2023. – № 22. – DOI: 10.3390/su152215881.
10. Gao W., Xu B., Yang J., Yang Y., Li Q., Zhang B., Liu G., Ma Y., Jiang T. Comprehensive recovery of valuable metals from copper smelting open-circuit dust with a clean and economical hydrometallurgical process. *Chemical Engineering Journal*, 2021, vol. 424, P. 130411–2021. – DOI: 10.1016/j.cej.2021.130411.
11. Kursunoglu S. A review on the recovery of critical metals from mine and mineral processing tailings: recent advances // *Journal of Sustainable Metallurgy*. – 2050. – № 3. – P. 2023–2050.
12. Nakhaei F., Locmelis M., Alagha L., Moats M., Eyzaguirre C., Smith C. Characterization and leaching feasibility studies of copper flue dust for the recovery of main and trace metals. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2025, vol. 11–2025. – № 3. – P. 2215–2235. – DOI: 10.1007/s40831-025-01158-4.
13. Sun J., Zhang T., Shen P., Liu D., Dong L. Kinetics analysis of copper extraction from copper smelting slag by sulfuric acid oxidation leaching. *Minerals Engineering*, 2024, vol. 216, P. 108886–2024. – DOI: 10.1016/j.mineng.2024.108886.
14. Wang X., et al. Valuable metals recovery and hazardous waste elimination from copper smelting dusts: A review. *Separation and Purification Technology*, 2025, P. 135386.
15. Wu J.Y., Chang F.C., Wang H.P., Tsai M.J., Ko C.H., Chen C.C. Selective leaching process for the recovery of copper and zinc oxide from copper-containing dust. *Environmental Technology*, 2015, vol. 36–2015. – № 23. – P. 2952–2958. – DOI: 10.1080/09593330.2014.960479.
16. Xiao W., et al. A method for extracting valuable metals from low nickel matte by non-oxidative leaching with H₂SO₄. *Separation and Purification Technology*, 2021, vol. 270, P. 118789.
17. Zhang Y., Feng X., Qian L., Luan J., Jin B. Separation of arsenic and extraction of zinc and copper from high-arsenic copper smelting dusts by alkali leaching followed by sulfuric acid leaching. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, vol. 9, P. 105997–2021. – № 5. – DOI: 10.1016/j.jece.2021.105997.
18. Zhang G., et al. Whole-process management of arsenic in copper smelting dust: a review of removal, stabilization, and resource recovery technologies. *JOM*, 2026, P. 1–26.

ТЕКСТИЛЬНАЯ И ЛЁГКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Статья поступила в редакцию: 19.06.2026

Статья принята к публикации: 24.06.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 677.074+677.05

Разработка крупноузорчатой жаккардовой махровой ткани с повышенными гигроскопическими свойствами и экономической эффективностью

Расулов Хамза Юлдошевич

доц., Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: rasulkhamza1982@gmail.com

Узоков Умид Толибович

доц. Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: uzmid_1989@icloud.com

Ганишер Эшмаматов

докторант

Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: eshmamatovganisher@gmail.com

Development of a large-pattern jacquard terry fabric with enhanced hygroscopic properties and improved economic efficiency

Rasulov Khamza Yuldoshevich

Associate Professor

Tashkent Institute of Textile and Light Industry

Uzbekistan, Tashkent

Uzoqov Umid Tolibovich

Associate Professor

Tashkent Institute of Textile and Light Industry

Uzbekistan, Tashkent

Eshmamatov Ganisher

PhD student

Tashkent Institute of Textile and Light Industry

Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Расулов Х.Ю., Узоков У.Т., Ганишер Э. Разработка крупноузорчатой жаккардовой махровой ткани с повышенными гигроскопическими свойствами и экономической эффективностью // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23093>

Аннотация

В статье представлены результаты разработки нового ассортимента крупноузорчатых жаккардовых махровых тканей, предназначенных для производства полотенечных изделий бытового назначения. Актуальность исследования обусловлена необходимостью расширения ассортимента текстильной продукции, повышения её потребительских свойств и снижения материалоемкости производства. Целью работы является разработка структуры махровой ткани с улучшенными гигроскопическими характеристиками и оценка экономической эффективности её промышленного внедрения.

Проектирование ткани и разработка декоративного рисунка осуществлялись с использованием программного комплекса Texcelle и современных технологий жаккардового ткачества. Разработана ткань комбинированной структуры, включающая петельную махровую поверхность с высокой водопоглощающей способностью и велюровую поверхность, обеспечивающую улучшенные эстетические и тактильные свойства изделия. Гигроскопические характеристики материала исследованы гравиметрическим методом путём определения водопоглощения образцов в одинаковых условиях испытаний.

Результаты исследований показали, что водопоглощающая способность петельной поверхности в 1,72 раза выше по сравнению с велюровой стороной ткани. Дополнительные испытания подтвердили высокие показатели влагопоглощения разработанного материала. Проведённые расчёты экономической эффективности показали возможность снижения расхода махровой пряжи и получения экономии до 2368 сум на одно изделие.

Полученные результаты подтверждают перспективность использования разработанной жаккардовой махровой ткани для производства конкурентоспособных полотенечных изделий, сочетающих высокие эксплуатационные, эстетические и экономические показатели.

Abstract

This article presents the results of developing a new range of large-pattern Jacquard terry fabrics intended for the production of household towel products. The relevance of the study is determined by the need to expand the assortment of textile products, improve their consumer properties, and reduce material consumption in manufacturing. The aim of the research is to develop a terry fabric structure with enhanced hygroscopic characteristics and to evaluate the economic efficiency of its industrial implementation.

The fabric structure and decorative pattern were designed using the Texcelle software package and modern Jacquard weaving technologies. A combined fabric structure was developed, incorporating a terry loop surface with high water absorption capacity and a velour surface providing improved aesthetic appearance and tactile comfort. The hygroscopic properties of the fabric were investigated using the gravimetric method by determining the water absorption capacity of samples under identical testing conditions.

The research results demonstrated that the water absorption capacity of the terry surface is 1.72 times higher than that of the velour side of the fabric. Additional tests confirmed the high moisture absorption performance of the developed material. The economic efficiency assessment revealed the possibility of reducing terry yarn consumption and achieving cost savings of up to 2,368 Uzbek soums per product.

The obtained results confirm the potential of the developed Jacquard terry fabric for manufacturing competitive towel products that combine high functional performance, aesthetic appeal, and economic efficiency.

Ключевые слова: махровая ткань, жаккардовое ткачество, Texcelle, гигроскопичность, водопоглощение, полотенечные изделия, экономическая эффективность, текстильный дизайн.

Keywords: terry fabric, Jacquard weaving, Texcelle, hygroscopicity, water absorption, towel products, economic efficiency, textile design.

Введение

Текстильная промышленность Республики Узбекистан является одной из стратегически важных отраслей экономики, обеспечивающих производство конкурентоспособной продукции для внутреннего и внешнего рынков. В последние годы особое внимание уделяется расширению ассортимента текстильных изделий, повышению их качества и внедрению инновационных технологий проектирования тканей.

Среди текстильных изделий бытового назначения значительное место занимают махровые полотенечные ткани, которые должны обладать высокими показателями гигроскопичности, мягкости, износостойкости и эстетической привлекательности [11, 4]. Современные тенденции развития отрасли требуют создания новых видов махровых тканей, сочетающих улучшенные потребительские свойства с высокой экономической эффективностью производства.

Одним из перспективных направлений является использование жаккардовых механизмов для формирования сложных декоративных рисунков и разработки тканей с комбинированной структурой поверхности. Применение современных программ автоматизированного проектирования позволяет существенно расширить ассортимент продукции и повысить эффективность производственного процесса [13].

В последние годы вопросам совершенствования структуры махровых тканей и повышения их эксплуатационных характеристик уделяется значительное внимание. Исследования Angelova и Kushlova показали, что изменение плотности утка и высоты петли оказывает существенное влияние на поверхностную плотность, водопоглощение и комфортность махровых изделий [5]. Аналогичные результаты были получены Cruz и соавторами, которые установили прямую зависимость между структурными параметрами хлопчатобумажных махровых тканей и их влагопоглощающей способностью [6].

Современные исследования также направлены на оптимизацию конструкции махровых тканей с целью снижения материалоемкости производства при сохранении высоких потребительских свойств. По данным Jamshaid и соавторов [8], рациональный подбор параметров переплетения и плотности нитей позволяет улучшить эксплуатационные характеристики полотенечных изделий и повысить эффективность использования сырья. В работах Foisal и соавторов [7] отмечается, что комбинированные структуры махровых тканей обеспечивают более благоприятное сочетание гигроскопичности, мягкости и долговечности изделий.

Несмотря на значительное количество исследований в данной области, вопросы разработки крупноузорчатых жаккардовых махровых тканей с комбинированной структурой поверхности, сочетающих высокие гигроскопические свойства и экономическую эффективность производства, остаются недостаточно изученными. В связи с этим актуальной задачей является создание новых конструкций тканей, обеспечивающих снижение расхода сырья без ухудшения эксплуатационных характеристик готовых изделий.

Целью настоящего исследования является разработка новой крупноузорчатой жаккардовой махровой ткани с улучшенными гигроскопическими свойствами и оценка экономической эффективности её промышленного внедрения.

Материалы и методы

Объектом исследования являлась новая крупноузорчатая махровая ткань жаккардового переплетения, разработанная для производства полотенечных изделий бытового назначения. Проектирование структуры ткани и создание декоративного рисунка осуществлялось с использованием специализированного программного комплекса Texcelle.

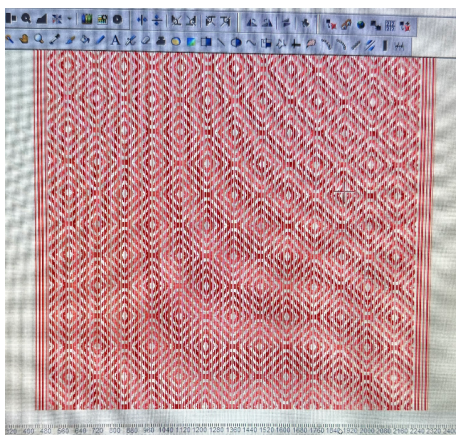


Рисунок 1. Проект крупноузорчатой жаккардовой махровой ткани, разработанный в программе Texcelle

Разработанная ткань имеет комбинированную структуру поверхности. Одна сторона изделия сформирована в виде петельного махрового слоя, обеспечивающего высокую водопоглощающую способность, а другая сторона представляет собой велюровую поверхность, обладающую улучшенными эстетическими и тактильными свойствами.

В процессе исследования были определены основные технологические параметры ткани. В качестве сырья использовались хлопчатобумажные нити различной линейной плотности [12]. Плотность ткани по основе составила 11,5 нитей/см, по утку махровой части – 17,5 нитей/см. Поверхностная плотность разработанной ткани составила 500 г/м².

Технологические параметры разработанной ткани представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры разработанной жаккардовой махровой ткани

Показатель	Значение
Основная пряжа (грунт основы): Махровая пряжа (петлевая) Уточная пряжа:	24/2 Ne (49 текс) 20/2 Ne (59 текс) 16/1 Ne (37 текс)
Плотность нитей По основе: По утку (махровая часть): По утку (кромочная часть):	11,5 нитей/см 17,5 нитей/см 50 нитей/см

Показатель	Значение
Поверхностная плотность ткани	500 г/м ²
Общая ширина ткани	245 см
Размер полотенца: Длина: Ширина:	140 см 70 см
Общее количество нитей основы для махровой части	3456 нитей
Общее количество нитей основы для грунта	3984 нити
Себестоимость полотенца	36 260 сум
Рыночная цена жаккардового полотенца	90 650 сум/кг

Для оценки гигроскопических свойств использовался гравиметрический метод. Испытания проводились на образцах ткани одинаковых размеров в одинаковых условиях окружающей среды. Масса образцов определялась до и после погружения в дистиллированную воду с использованием электронных весов.

Результаты и их обсуждение

Одним из важнейших показателей качества полотенежных тканей является их способность быстро впитывать влагу. Поэтому основное внимание в работе было уделено исследованию водопоглощающих свойств разработанной ткани.

На первом этапе исследования были проведены сравнительные испытания петельной и велюровой сторон ткани. Масса сухих образцов составляла 6 г. После выдерживания в воде в течение 5 секунд масса образца с велюровой поверхностью увеличилась до 17 г, тогда как масса образца с петельной поверхностью достигла 25 г.

Результаты проведенного эксперимента показали существенное различие между исследуемыми поверхностями ткани. Благодаря развитой пространственной структуре петельный слой обеспечивает более интенсивное поглощение влаги по сравнению с велюровой поверхностью.



Рисунок 2. Этапы определения водопоглощающей способности разработанной ткани: а – сухой образец; б – процесс насыщения водой; в – время испытания (5 с); г – масса велюровой поверхности после испытания; д – масса петельной поверхности после испытания

Расчёты показали, что водопоглощающая способность петельной стороны ткани в 1,72 раза выше по сравнению с велюровой стороной. Полученный результат подтверждает целесообразность применения комбинированной структуры поверхности при производстве полотенечных изделий.

Полученные результаты согласуются с данными, представленными в работах Angelova и Kushlova [5], где установлено, что увеличение высоты петли и изменение структурных параметров махровой ткани способствуют повышению её водопоглощающей способности. Аналогичные закономерности отмечены Cruz и соавторами [6], исследовавшими влияние строения хлопчатобумажных махровых тканей на процессы влагопоглощения.

Следует отметить, что разработанная в настоящем исследовании комбинированная структура ткани обеспечивает не только высокие показатели водопоглощения, но и улучшенные эстетические свойства изделия благодаря наличию велюровой поверхности. Полученные результаты также подтверждают выводы Foisal и соавторов [7], которые отмечали преимущества комбинированных структур при производстве современных полотенецных изделий.

Для дополнительной оценки гигроскопических характеристик были проведены испытания в соответствии с требованиями нормативных документов. Образец массой 5 г выдерживался в дистиллированной воде в течение 45 секунд, после чего его масса составила 33 г.



Рисунок 3. Определение общей водопоглощающей способности разработанной ткани: а – сухой образец массой 5 г; б – процесс насыщения водой; в – продолжительность испытания (45 с); г – масса образца после испытания (33 г)

Полученные результаты свидетельствуют о высоких гигроскопических свойствах разработанной ткани. Наличие петельного слоя обеспечивает быстрое поглощение влаги, тогда как велюровая поверхность повышает комфортность использования изделия и улучшает его внешний вид.

Таким образом, разработанная структура ткани позволяет одновременно повысить потребительские свойства продукции и обеспечить её конкурентоспособность на рынке текстильных изделий.

4. Оценка экономической эффективности разработанной ткани

Наряду с улучшением потребительских свойств текстильной продукции важное значение имеет снижение материалоемкости и повышение экономической эффективности производства [9]. В связи с этим была проведена оценка экономической целесообразности внедрения разработанной крупноузорчатой жаккардовой махровой ткани в промышленное производство.

Особенностью разработанной конструкции является рациональное распределение махровых участков по поверхности изделия. В процессе проектирования часть поверхности была сформирована без махровых петель за счёт использования элементов рисунка жаккардового переплетения. Данный подход позволил сохранить декоративные свойства изделия при одновременном снижении расхода махровой пряжи.

Расчёты показали, что общая площадь полотенца составляет 9800 см². После исключения бордюрных и кромочных участков площадь основной узорчатой зоны составила 8771 см². Около 25 % данной площади занимают участки без махрового слоя, что обеспечивает снижение расхода сырья без ухудшения эксплуатационных характеристик изделия.

Таблица 2. Показатели экономической эффективности разработанной ткани

Показатель	Значение
Сэкономленная площадь	4385,5 см ²
Высота петли	0,4 см
Плотность пряжи	0,5 г/см ³
Сэкономленный объём	1754,2 см ³
Сэкономленная масса пряжи	0,0877 кг
Стоимость махровой пряжи	27 000 сум/кг
Экономия на одном полотенце	2368 сум

В результате проведённых расчётов установлено, что экономия махровой пряжи на одно изделие составляет 0,0877 кг. При стоимости махровой пряжи 27 000 сум за килограмм экономический эффект на одно полотенце достигает 2368 сум.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности предложенного конструктивного решения. Снижение расхода сырья достигается без ухудшения качества продукции и её потребительских свойств.

При условии, что предприятие производит около 1 тонны изделий нового ассортимента в сутки, годовой экономический эффект составляет более 1,34 млрд сум. Данный показатель подтверждает целесообразность промышленного внедрения разработанной ткани.

Кроме экономии сырья, внедрение нового ассортимента позволяет снизить энергозатраты жаккардового оборудования [1]. За счёт уменьшения количества активируемых магнитных модулей энергопотребление одной жаккардовой машины сокращается приблизительно на 9,2 %, что обеспечивает дополнительный экономический эффект в процессе эксплуатации оборудования.

Таким образом, разработанная структура ткани характеризуется не только высокими гигроскопическими показателями, но и значительной экономической эффективностью, что делает её перспективной для промышленного производства.

Заключение

В результате проведённых исследований разработан новый ассортимент крупноузорчатой жаккардовой махровой ткани для производства полотенецных изделий бытового назначения.

На основе анализа современных технологий производства махровых тканей изучены особенности формирования петельных и велюровых поверхностей, а также возможности использования жаккардовых механизмов при создании сложных декоративных рисунков.

С использованием программного комплекса Texcelle разработана структура ткани, сочетающая петельную и велюровую поверхности. Проведённые экспериментальные исследования подтвердили высокие гигроскопические свойства разработанного материала [2, 3].

Установлено, что петельная поверхность обладает водопоглощающей способностью, превышающей аналогичный показатель велюровой поверхности в 1,72 раза. Это обеспечивает эффективное удаление влаги и повышение потребительских свойств изделия.

Выполненные расчёты экономической эффективности показали возможность снижения расхода махровой пряжи на 2368 сум на одно изделие. Годовой экономический эффект от внедрения разработанной ткани в производство может превышать 1,34 млрд сум.

Полученные результаты подтверждают перспективность применения разработанной жаккардовой махровой ткани в условиях современных текстильных предприятий и открывают возможности для дальнейшего расширения ассортимента конкурентоспособной текстильной продукции.

Список литературы

1. Эль-Фути А. El-Fouty A. The Effect of Beating-Up Mechanism Type on the Woven Terry Towel Performance // Journal of Science of Textiles. – 2022. – P. 74–83.
2. Abdullayev U.T. Gigroskopik xossalari yuqori bo'lgan to'qimalarning yangi turi va texnologiyasini ishlab chiqish. – Toshkent, 2023. -P. 112–119.
3. Abdullayev U.T. Assessment of Terry Towels Strength // Proceedings of ICCPEAS. – 2026. – P. 35–43.

4. Alymenkova N., Faruque M.A.A., Kader S. et al. Performance Properties of Terry Fabrics for Hotel Towels // *Tekstilna Industrija*. – 2021. – P. 33–39.
5. Angelova R., Kushlova M. Design of Terry Towels: Assessment of the Effect of Weft Density and Pile Height on Fabric Weight. – Sofia, 2018. – P. 57–66.
6. Cruz J., Leitão A., Silveira D. Study of Moisture Absorption Characteristics of Cotton Terry Towel Fabrics // *ICNF Conference Proceedings*. – 2017. – P. 51–55.
7. Foisal A.B.M., Ullah A.N.M., Chowdhury M.R. et al. Comparative Study on the Characteristics of Different Terry Towel Fabrics // *International Journal of Progressive Textile Engineering*. – 2025. – P. 133–142.
8. Jamshaid H., Mishra R.K., Ahmad N. et al. Evaluation of performance properties in woven terry towel by multi-response optimization // *Scientific Reports*. – 2025. – P. 83–88.
9. O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining PF-6-son Farmoni. To‘qimachilik va tikuv-trikotaj sanoatini jadal rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida. 2025. O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining, 2025.
10. Rasulov H.Yu., Maksumova R.K. Magistrlar ilmiy maqolalar to‘plami. – Toshkent, 2023. – P. 124–127.
11. Singh J.P., Behera B.K. Performance of Terry Towel Fabrics // *Textile Research Journal*. – 2014. – P. 93–104.
12. Toxirov N., Jumaniyazov K., Yusupaliyeva U. et al. Analysis of the Influence of Yarn Properties on the Properties and Characteristics of Terry Fabrics // *Journal of Multidisciplinary Sciences and Innovations*. – 2025. – P. 43–55.
13. Wilson J. Handbook of Textile Design: Principles, Processes and Practice. – CRC Press, 2001. – P. 134–153.

References

1. [El-Fouty A. The Effect of Beating-Up Mechanism Type on the Woven Terry Towel Performance] // *Journal of Science of Textiles*. – 2022. – P. 74–83. (In Russ.)
2. Abdullayev U.T. Gigroskopik xossalari yuqori bo‘lgan to‘qimalarning yangi turi va texnologiyasini ishlab chiqish. – Toshkent, 2023, C. 112–119.
3. Abdullayev U.T. Assessment of Terry Towels Strength // *Proceedings of ICCPEAS*. – 2026. – P. 35–43.
4. Alymenkova N., Faruque M.A.A., Kader S. et al. Performance Properties of Terry Fabrics for Hotel Towels // *Tekstilna Industrija*. – 2021. – P. 33–39.
5. Angelova R., Kushlova M. Design of Terry Towels: Assessment of the Effect of Weft Density and Pile Height on Fabric Weight. – Sofia, 2018, P. 57–66.
6. Cruz J., Leitão A., Silveira D. Study of Moisture Absorption Characteristics of Cotton Terry Towel Fabrics // *ICNF Conference Proceedings*. – 2017. – P. 51–55.
7. Foisal A.B.M., Ullah A.N.M., Chowdhury M.R. et al. Comparative Study on the Characteristics of Different Terry Towel Fabrics // *International Journal of Progressive Textile Engineering*. – 2025. – P. 133–142.

8. Jamshaid H., Mishra R.K., Ahmad N. et al. Evaluation of performance properties in woven terry towel by multi-response optimization // Scientific Reports. – 2025. – P. 83–88.
9. O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining PF-6-son Farmoni. To‘qimachilik va tikuv-trikotaj sanoatini jadal rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida. O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining. – 2025.
10. Rasulov H.Yu., Maksumova R.K. Magistrlar ilmiy maqolalar to‘plami. – Toshkent, 2023. P. 124–127, P. 93–104.
11. Singh J.P., Behera B.K. Performance of Terry Towel Fabrics // Textile Research Journal. – 2014. – P. 93–104.
12. Toxirov N., Jumaniyazov K., Yusupaliyeva U. et al. Analysis of the Influence of Yarn Properties on the Properties and Characteristics of Terry Fabrics // Journal of Multidisciplinary Sciences and Innovations. – 2025. – P. 43–55.
13. Wilson J. Handbook of Textile Design: Principles, Processes and Practice. – CRC Press, 134–153. – 2001. – 2001 P.

Статья поступила в редакцию: 14.07.2026

Статья принята к публикации: 24.07.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 628.94+667.2+629.3

DOI: 10.32743/UniTech.2026.149.8.23233

Разработка и оптимизация базальтосиликонового покрытия на основе местного сырья для противопожарной защиты транспортных средств

Сиддиков Икромжон Иминжонович

д-р техн. наук, проф.

Ташкентский архитектурно-строительный университет

Республика Узбекистан, г. Ташкент

Соттикулов Элёр Сотимбоевич

вед. науч. сотр., ООО Ташкентский научно-исследовательский институт химической
технологии

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: elyorrr5@gmail.com

Эшматов Бобиржон Мамиржонович

соискатель

Академия Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Узбекистан

Республика Узбекистан, г. Ташкент

Development and optimization of a basalt-silicone coating based on local raw materials for fire protection of vehicles

Siddikov Ikromjon

doctor of Technical Sciences, Professor

Tashkent University of Architecture and Civil Engineering

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Sottikulov Elyor

Leading Researcher

LLC Tashkent Research Institute of Chemical Technology

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Eshmatov Bobirjon

postgraduate Student

Academy of the Ministry of Emergency Situations of the

Republic of Uzbekistan; Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Представлены результаты экспериментального исследования пяти вариантов базальтосиликоновых огнезащитных полотен, изготовленных на основе базальтовой ткани из местного сырья и кремнийорганического связующего с антипиреновой добавкой.

Исследованы контрольный образец без покрытия, образцы с односторонним однослойным и утолщённым покрытием, а также с двухсторонним однослойным и двухслойным покрытием. Испытания проведены в аккредитованной лаборатории Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Узбекистан в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.044 (раздел 7) и ГОСТ Р 50810. Установлено, что все исследованные материалы относятся к трудногорючим и трудновоспламеняемым. Выявлена устойчивая зависимость пожарно-технических характеристик от массы кремнийорганического связующего: с увеличением его количества потеря массы возрастает с 4,51 до 18,27 %, а максимальная температура в реакционной камере увеличивается с 239,3 до 254,0 °C ($r = 0,93-0,94$). Наилучшие результаты показал вариант с односторонним однослойным покрытием, для которого потеря массы составила 4,51 %, что ниже значения контрольного образца (5,83 %). Показано, что чрезмерное увеличение толщины силиконового покрытия не улучшает, а ухудшает пожарно-технические характеристики материала. Полученные результаты могут быть использованы при разработке эффективных противопожарных покрытий для транспортных средств на основе местного базальтового сырья.

Abstract

The paper presents the results of testing five variants of basalt-silicone fire-protective fabrics based on locally produced basalt fabric and an organosilicon binder containing a flame-retardant additive. The investigated variants included an uncoated control sample, a single-sided single-layer coating, a single-sided thickened coating, a double-sided single-layer coating, and a double-sided two-layer coating. The tests were carried out in the accredited laboratory of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Uzbekistan in accordance with GOST 12.1.044 (Section 7) and GOST R 50810. All tested materials were classified as low-combustible and hardly ignitable. A monotonic relationship between the amount of applied binder and the fire hazard indicators was established: mass loss increased from 4.51 % to 18.27 %, while the maximum temperature in the reaction chamber increased from 239.3 to 254.0 °C ($r = 0.93$ and 0.94 , respectively). The specimen with a single-sided single-layer coating demonstrated the best overall performance, with a mass loss of 4.51 %, which was lower than that of the uncoated control sample (5.83 %). The results indicate that excessive application of the silicone binder deteriorates the fire-performance characteristics of the fabric. The obtained findings may be used to optimize the design of fire-protective fabrics for vehicle fire safety applications.

Ключевые слова: базальтовая ткань, кремнийорганическое покрытие, антипирен, группа горючести, воспламеняемость, потеря массы, транспортные средства.

Keywords: basalt fabric, organosilicon coating, flame retardant, combustibility group, ignitability, mass loss, vehicles.

Библиографическое описание: Сиддигов И.И., Соттикулов Э.С., Эшматов Б.М. Разработка и оптимизация базальтосиликонового покрытия на основе местного сырья для противопожарной защиты транспортных средств // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23233>

Введение

Пожары на транспорте — одна из наиболее тяжёлых по последствиям категорий аварий: очаг в моторном отсеке или в зоне тяговых батарей развивается за десятки секунд и сопровождается выделением токсичных продуктов горения. Электрификация транспорта обострила проблему: литий-ионные накопители способны переходить в тепловой разгон с локальными температурами свыше 800 °С, при котором традиционные средства пожаротушения малоэффективны [8, 3].

Одним из решений является применение гибких огнезащитных полотен, экранирующих пожароопасные узлы. К ним предъявляются противоречивые требования: негорючесть, целостность при контакте с пламенем и одновременно эластичность, стойкость к истиранию и вибрации.

Базальтовое волокно как армирующая основа отвечает большинству этих требований благодаря температуре размягчения около 900–1000 °С, химической стойкости и низкой теплопроводности [1]. Однако исходная ткань осыпается по краям и не держит форму, поэтому её пропитывают кремнийорганическим связующим, которое придаёт эластичность, водостойкость и адгезию к металлу [6, 10]. При этом само связующее органично и способно к термодеструкции: полидиметилсилоксановые матрицы при нагреве выше 300 °С разлагаются с образованием летучих продуктов и кремнезёмистого остатка [9]. Введение силиконового покрытия имеет, таким образом, двойственный характер, и вопрос о допустимом расходе связующего без ухудшения пожарно-технических показателей в литературе количественно не рассматривался.

Актуальность работы усиливается сырьевым фактором: Узбекистан располагает собственными месторождениями базальтовых пород, что позволяет наладить выпуск огнезащитных полотен на местной сырьевой базе.

Цель исследования — установить влияние схемы и расхода кремнийорганического покрытия на пожарно-технические характеристики базальтового полотна и определить оптимальный вариант нанесения для средств противопожарной защиты транспортных средств.

Для этого изготовлена серия образцов с разной схемой покрытия, для каждого определена группа горючести (ГОСТ 12.1.044) и показатели воспламеняемости (ГОСТ Р 50810), установлен характер зависимости этих показателей от массы связующего.

Материалы и методы исследования

Материалы и изготовление образцов. Армирующая основа — базальтовая ткань полотняного переплетения из базальтового сырья Узбекистана. Связующее — кремнийорганическая композиция на основе полидиметилсилоксанового каучука холодного отверждения с антипиреном хлорпарафином ХП-470 (12 мас. %). Ткань высушивали при 105 °С 2 ч, композицию наносили пропиткой с ракельным разравниванием и отверждали при комнатной температуре 24 ч с термообработкой при 140 ± 10 °С 1 ч. Изготовлено пять вариантов полотна (табл. 1).

Таблица 1.

Характеристика исследованных вариантов противопожарного полотна

Полотно	Схема нанесения покрытия	Средняя масса образца 150×60 мм, г	Прирост массы относительно контроля, %
№ 1	Без покрытия (контроль)	51,3	—
№ 5	Одностороннее, 1 слой	59,0	14,9
№ 2	Одностороннее утолщённое, 1 слой	65,7	27,9
№ 4	Двухстороннее, 1 слой	65,7	27,9
№ 3	Двухстороннее, 2 слоя	76,7	49,4

Методы испытаний. Испытания проведены 18.03.2026 г. в лаборатории Научно-исследовательского института проблем пожарной безопасности и чрезвычайных ситуаций МЧС Республики Узбекистан (г. Ташкент, ул. Шарафа Рашидова, 17) при температуре воздуха 21 °С, давлении 718 мм рт. ст. и влажности 35 %.

Группа горючести определялась по разделу 7 ГОСТ 12.1.044: образцы 150×60 мм (n = 3 на вариант) вводились в реакционную камеру установки ОТМ, нагретую до 200 °С, продолжительность испытания 300 с; регистрировались максимальная температура и потеря массы.

Воспламеняемость определялась по ГОСТ Р 50810: образцы 220×170 мм (n = 16 на вариант) испытывались на установке ОВТ при зажигании с поверхности и с кромки; регистрировались время остаточного горения, прогорание, размер поверхностной вспышки, длина обугливающегося участка, загорание ваты под образцом.

Статистическая обработка включала среднее, стандартное отклонение, коэффициент вариации и линейную корреляцию Пирсона между массой образца и показателями пожарной опасности.

Результаты исследования

Группа горючести по ГОСТ 12.1.044. Первичные результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Первичные результаты определения группы горючести (ГОСТ 12.1.044, р. 7)

Полотно	№ обр.	Максимальная температура, °С	Масса до испытания, г	Масса после испытания, г	Потеря массы, %
№ 1	1	219	51	49	3,92
	2	221	52	48	7,69
	3	217	51	48	5,88
№ 5	1	239	58	56	3,45
	2	241	60	57	5,00
	3	238	59	56	5,08
№ 2	1	247	65	57	12,31
	2	245	65	58	10,77
	3	248	67	59	11,94
№ 4	1	246	67	60	10,45
	2	243	64	56	12,50

Полотно	№ обр.	Максимальная температура, °C	Масса до испытания, г	Масса после испытания, г	Потеря массы, %
	3	245	66	58	12,12
№ 3	1	255	78	65	16,67
	2	253	75	61	18,67
	3	254	77	62	19,48

Обобщённая статистика приведена в табл. 3. Время достижения максимальной температуры для всех образцов составило 300 с, то есть совпало с продолжительностью испытания — самостоятельного экзотермического пика не наблюдалось ни у одного варианта.

Таблица 3.

Статистическая обработка результатов испытаний по ГОСТ 12.1.044 (n = 3)

Полотно	Схема покрытия	Максимальная температура, °C (M ± SD)	Потеря массы, % (M ± SD)	Кэф. вариации потери массы, %	Группа горючести
№ 1	Без покрытия	219,0 ± 2,0	5,83 ± 1,89	32,3	Трудногорючий
№ 5	Одностороннее, 1 слой	239,3 ± 1,5	4,51 ± 0,92	20,4	Трудногорючий
№ 2	Одностороннее утолщённое	246,7 ± 1,5	11,67 ± 0,80	6,9	Трудногорючий
№ 4	Двухстороннее, 1 слой	244,7 ± 1,5	11,69 ± 1,09	9,3	Трудногорючий
№ 3	Двухстороннее, 2 слоя	254,0 ± 1,0	18,27 ± 1,45	7,9	Трудногорючий

Все пять вариантов по совокупности показателей отнесены к трудногорючим материалам (п. 7.6.4 ГОСТ 12.1.044), однако внутри этой группы наблюдается отчётливая дифференциация. Максимальная температура монотонно возрастает с ростом массы связующего — от 219,0 до 254,0 °C (на 35,0 °C), потеря массы — от 4,51 до 18,27 % (более чем в четыре раза).

Коэффициент линейной корреляции Пирсона между массой образца и потерей массы составил $r = 0,93$, между массой и максимальной температурой — $r = 0,94$. Это указывает, что оба показателя определяются количеством связующего, подвергающегося термодеструкции, а не схемой его расположения: варианты № 2 и № 4 при одинаковой массе (65,7 г) дали практически совпадающую потерю массы — 11,67 и 11,69 % соответственно.

Отдельного внимания заслуживает вариант № 5 — единственный, у которого потеря массы (4,51 %) ниже, чем у контроля (5,83 %), при массе образца выше на 14,9 %. Контрольный вариант при этом обладает наибольшим разбросом результатов: коэффициент вариации потери массы 32,3 % против 6,9–20,4 % у покрытых вариантов.

Воспламеняемость по ГОСТ Р 50810. Результаты приведены в табл. 4. По четырём из восьми контролируемых параметров все пять вариантов показали отсутствие эффекта; различия проявились только в трёх параметрах, характеризующих размер зоны термического поражения.

Таблица 4.

Результаты испытаний на воспламеняемость (ГОСТ Р 50810, n = 16)

Полотно	Схема покрытия	Поверхностная вспышка, мм (норма ≤ 100)	Длина обугливания при зажигании с поверхности, мм (≤ 150)	Длина обугливания при зажигании с кромки, мм (≤ 150)	Классификация
№ 1	Без покрытия	35	30	40	Трудновоспламеняемый
№ 5	Одностороннее, 1 слой	45	50	70	Трудновоспламеняемый
№ 2	Одностороннее утолщённое	50	60	70	Трудновоспламеняемый
№ 4	Двухстороннее, 1 слой	50	62	68	Трудновоспламеняемый
№ 3	Двухстороннее, 2 слоя	45	55	65	Трудновоспламеняемый

Все варианты классифицированы как трудновоспламеняемые, с запасом по нормативным требованиям от двух до трёх раз (максимум 50 мм при допустимых 100 мм; максимум 70 мм при допустимых 150 мм). Тенденция та же, что и по ГОСТ 12.1.044: контроль показывает наименьшую зону термического поражения (30 мм), варианты с покрытием — 50–62 мм. Совпадение направленности результатов двух независимых методик повышает достоверность наблюдений.

Обсуждение результатов

Основной результат работы: кремнийорганическое покрытие оказывает на пожарно-технические характеристики полотна двойственное влияние, и существует оптимальный расход связующего, при превышении которого характеристики ухудшаются.

Базальтовое волокно само по себе негорючее; потеря массы контроля (5,83 %) обусловлена выгоранием технологической аппретуры и удалением влаги, а не горением волокна [5]. Значительный разброс контрольной серии (коэффициент вариации 32,3 %) объясняется неравномерностью распределения аппретуры по площади ткани.

Тонкий односторонний слой связующего (вариант № 5) снижает потерю массы ниже уровня контроля: отверждённая силиконовая плёнка герметизирует поверхность, ограничивая доступ кислорода к межволоконному пространству, а при нагреве образует уплотняющий барьер из кремнезёмистого остатка [9, 12]. Поскольку абсолютное количество связующего невелико, вклад его собственного пиролиза не превышает выигрыша от барьерного эффекта; снижение коэффициента вариации с 32,3 до 20,4 % говорит и о выравнивании свойств материала по площади.

При дальнейшем росте расхода связующего баланс меняется: масса органической фазы растёт быстрее эффективности барьера, которая определяется наличием сплошной плёнки и слабо зависит от её толщины [2]. В результате потеря массы возрастает до 18,27 % при максимальном расходе, а температура в камере — на 35 °С относительно контроля за счёт экзотермического окисления продуктов термодеструкции силикона. Совпадение показателей вариантов № 2 и № 4 при одинаковой массе и разной геометрии нанесения подтверждает, что

определяющим фактором является именно количество связующего, а не схема его распределения — сходная закономерность отмечена и для армирования гибридными базальтовыми структурами, где свойства масштабируются скорее объёмной долей компонента, чем его расположением [7, 4].

Вклад антипирена (хлорпарафина) состоит в замедлении газофазных цепных реакций горения за счёт выделения HCl при термораспаде, что дополнительно способствует раннему самозатуханию [11]; однако при большом расходе связующего этот эффект не компенсирует рост горючей органической массы.

Практический вывод: распространённое представление о том, что увеличение числа слоёв покрытия повышает огнестойкость, для базальтосиликоновых полотен неверно. Рациональна схема одностороннего однослойного нанесения (вариант № 5) — она даёт лучшие пожарно-технические показатели при минимальном расходе связующего и наименьшей массе изделия, что важно для полотен, применяемых в моторных отсеках и зонах аккумуляторных блоков.

Ограничения работы: исследование выполнено на пяти вариантах при трёх параллельных образцах по ГОСТ 12.1.044, что позволяет установить характер зависимости, но не строит точную математическую модель; не исследованы адгезия к металлу, стойкость к перегибам и старению, поведение материала при воздействии свыше 300 с. Это предмет дальнейших исследований.

Заключение

Изготовлены и испытаны пять вариантов огнезащитного полотна на основе базальтовой ткани и кремнийорганического связующего с антипиреном; все варианты отнесены к трудногорючим (ГОСТ 12.1.044, п. 7.6.4) и трудновоспламеняемым (ГОСТ Р 50810) материалам. Установлена монотонная зависимость показателей пожарной опасности от массы связующего: потеря массы возрастает с 4,51 до 18,27 %, максимальная температура — с 239,3 до 254,0 °С ($\gamma = 0,93$ и $0,94$). Определяющим фактором является количество связующего, а не геометрия его нанесения: варианты с разной схемой при одинаковой массе дали практически совпадающие результаты. Оптимальна схема одностороннего однослойного нанесения: потеря массы 4,51 % ниже, чем у контроля (5,83 %), при снижении коэффициента вариации с 32,3 до 20,4 %. Увеличение числа слоёв кремнийорганического покрытия не повышает, а снижает пожарно-технические характеристики полотна — это следует учитывать при разработке технических условий на противопожарные полотна для моторных отсеков, аккумуляторных блоков и других пожароопасных узлов транспорта.

Список литературы

1. De B. A comprehensive review on fiber-reinforced polymer composites: Raw materials to applications, recycling, and waste management / B. De [et al.] // Progress in Materials Science. – 2024. – Т. 146.
2. Dong R. Surface modification of carbon fiber by vinyl functionalized silane to enhance the interfacial adhesion with rubber via co-vulcanization / R. Dong, H. Xie, W. Cao // Surfaces and Interfaces. – 2023. – Т. 43.

3. Ghiji M. A review of lithium-ion battery fire suppression / M. Ghiji, V. Novozhilov, K. Moinuddin, P. Joseph, I. Burch, B. Suendermann, G. Gamble // *Energies*. – 2020. – Т. 13, № 19.
4. Kufel A. Basalt/glass fiber polypropylene hybrid composites: mechanical properties at different temperatures and under cyclic loading, and micromechanical modelling / A. Kufel, S. Praa, S. Kuciel // *Materials*. – 2021. – Т. 14, № 19.
5. P. Rybi. Rybiński P. Impact of basalt filler on thermal and mechanical properties, as well as fire hazard, of silicone rubber composites, including ceramizable composites // *Materials*. – 2019. – Т. 12, № 15.
6. P. Mi. Miśkiewicz P. Experimental research on basalt fabric-based composites for protection against contact heat // *Journal of Natural Fibers*. – 2058. – Т. 21, № 1. – P. 2043–2058.
7. Selcuk S. Basalt fiber reinforced polymer composites (BFRP) other than rebars: a review / S. Selcuk, U. Ahmetoglu, E.C. Gokce // *Materials Today Communications*. – 2023. – Т. 37.
8. Sun J. Progress on the research of fire behavior and fire protection of lithium ion battery / J. Sun, B. Mao, Q. Wang // *Fire Safety Journal*. – 2021. – Т. 120.
9. Tang Y.-H. Recent advances in fire-retardant silicone rubber composites / Y.-H. Tang, J. Liu, Z.-Y. Chen, Y. Li, C.-F. Cao, G.-D. Zhang, L.-C. Tang // *Polymers*. – 2024. – Т. 16, № 17.
10. Zhang M. Investigation of heat transfer properties of plasma-treated and silicone-elastomer coated basalt fabric / M. Zhang, R. Denning, Z. Zhong, X. Wang, Y. Shen, M. Naebe // *Coatings*. – 2019. – Т. 9, № 5.
11. Zhang G. Novel triazine-based metal-organic frameworks: Synthesis and multifunctional application of flame retardant, smoke suppression and toxic attenuation on EP / G. Zhang [et al.] // *Materials & Design*. – 2023. – Т. 226.
12. Zimmermann C.A. Recent advances in PDMS optical waveguides: Properties, fabrication, and applications / C.A. Zimmermann, K.N. Amouzou, B. Ung // *Advanced Optical Materials*. – 2025. – Т. 13.

References

1. De B. et al. A comprehensive review on fiber-reinforced polymer composites: Raw materials to applications, recycling, and waste management // *Progress in Materials Science*. – 2024. – Т. 146.
2. Dong R., Xie H., Cao W. Surface modification of carbon fiber by vinyl functionalized silane to enhance the interfacial adhesion with rubber via co-vulcanization // *Surfaces and Interfaces*. – 2023. – Т. 43.
3. Ghiji M., Novozhilov V., Moinuddin K., Joseph P., Burch I., Suendermann B., Gamble G. A review of lithium-ion battery fire suppression // *Energies*. – 2020. – Т. 13, № 19.
4. Kufel A., Praa S., Kuciel S. Basalt/glass fiber polypropylene hybrid composites: mechanical properties at different temperatures and under cyclic loading, and micromechanical modelling // *Materials*. – 2021. – Т. 14, № 19.

5. Рыбинский П., Сирек Б., Жуковский В., Бради Д., Имиела М., Анышка Р., Блюме А., Вербув В. [Impact of basalt filler on thermal and mechanical properties, as well as fire hazard, of silicone rubber composites, including ceramizable composites] // *Materials*. – 2019. – Т. 12, № 15. (In Russ.)
6. Miśkiewicz P., Tokarska M. Miśkiewicz P., Tokarska M. Experimental research on basalt fabric-based composites for protection against contact heat // *Journal of Natural Fibers*. – 2024. – Т. 21, № 1.
7. Selcuk S., Ahmetoglu U., Gokce E.C. Basalt fiber reinforced polymer composites (BFRP) other than rebars: a review // *Materials Today Communications*. – 2023. – Т. 37.
8. Sun J., Mao B., Wang Q. Progress on the research of fire behavior and fire protection of lithium ion battery // *Fire Safety Journal*. – 2021. – Т. 120.
9. Tang Y.-H., Liu J., Chen Z.-Y., Li Y., Cao C.-F., Zhang G.-D., Tang L.-C. Recent advances in fire-retardant silicone rubber composites // *Polymers*. – 2024. – Т. 16, № 17.
10. Zhang M., Denning R., Zhong Z., Wang X., Shen Y., Naebe M. Investigation of heat transfer properties of plasma-treated and silicone-elastomer coated basalt fabric // *Coatings*. – 2019. – Т. 9, № 5.
11. Zhang G. et al. Novel triazine-based metal-organic frameworks: Synthesis and multifunctional application of flame retardant, smoke suppression and toxic attenuation on EP // *Materials & Design*. – 2023. – Т. 226.
12. Zimmermann C.A., Amouzou K.N., Ung B. Recent advances in PDMS optical waveguides: Properties, fabrication, and applications // *Advanced Optical Materials*. – 2025. – Т. 13.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

UNIVERSUM: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Электронный научный журнал

№ 8(149)

Август 2026 г.

Часть 4

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: 72 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: 28.08.2026

Журнал размещается в:

CYBERLENINKA

e НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ
БИБЛИОТЕКА
LIBRARY.RU

Google
scholar

ULRICHSWEB
GLOBAL SERIALS DIRECTORY

>BASE

СОЦИОНЕТ

OpenAIRE



Registry of Open Access
Repositories (ROAR)