Оригинальная статья

Original Paper

УДК 504.4.054 © Л.А. Иванова✉, Е.С. Михайлова, И.В. Тимощук, П.П. Иванов, А.К. Горелкина, 2026

ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 650000, г. Кемерово, Россия
✉ e-mail: lyuda_ivan@mail.ru

UDC 504.4.054 © L.A. Ivanova ✉, E.S. Mikhailova, I.V. Timoshchuk, P.P. Ivanov, A.K. Gorelkina, 2026

Kemerovo State University, Kemerovo, 650000, Russian Federation
✉ e-mail: lyuda_ivan@mail.ru

Разработка многоступенчатой технологии физико-химической очистки сточных вод горнодобывающих предприятий с адаптивным управлением*

Development of multi-stage physicochemical treatment for mining enterprise wastewater with adaptive control

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2026-10-75-81

Разработана и апробирована в опытно-промышленных условиях многоступенчатая физико-химическая технология очистки карьерных сточных вод угольных разрезов. На основе гидрохимического мониторинга (2022-2025 гг., Кузбасс) охарактеризован исходный состав вод с превышениями ПДК по взвесям, нитратам, сульфатам, железу, марганцу, цинку. Установлено, что традиционные методы коагуляции и известкования недостаточны для удаления растворенных форм аммония, сульфатов и марганца; эффективное осаждение требует поддержания pH до 10,4. Предложена многоступенчатая схема, включающая отстаивание, реагентную обработку, флотацию, фильтрацию через зернистую загрузку, окисление пероксидом водорода (по показаниям), сорбцию на активном угле АГ-3 и УФ-обеззараживание. Обоснован выбор флотационного оборудования в зависимости от производительности стоков. Эффективность очистки достигла 95,3-99,5% по основным показателям, обеспечено достижение всех ПДК. Резервные блоки, управляемые по данным мониторинга, обеспечивают адаптивность к сезонным и технологическим изменениям. Схема рекомендована для промышленного внедрения.

Ключевые слова: *карьерные сточные воды, физико-химическая очистка, флотация, сорбция, адаптивное управление, ПДК.*

ИВАНОВА Л.А.
Канд. техн. наук, доцент кафедры Техносферной безопасности, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 650000, г. Кемерово, Россия, e-mail: lyuda_ivan@mail.ru

МИХАЙЛОВА Е.С.
Канд. хим. наук, доцент кафедры Техносферной безопасности, директор Института нано-, био-, информационных, когнитивных и социогуманитарных технологий, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 650000, г. Кемерово, Россия, e-mail: e_s_mihaylova@mail.ru

ТИМОЩУК И.В.
Доктор техн. наук, профессор кафедры Техносферной безопасности, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 650000, г. Кемерово, Россия, e-mail: irina_190978@mail.ru

** Исследование выполнено в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 г. №1144-р, при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, № соглашения 075-15–2022- 1201 от 30.09.2022 г.*

ИВАНОВ П.П.
Канд. техн. наук, доцент кафедры Мехатроники и автоматизации технологических систем, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 650000, г. Кемерово, Россия, e-mail: ipp7@yandex.ru

ГОРЕЛКИНА А.К.
Доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой Техносферной безопасности, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 650000, г. Кемерово, Россия e-mail: alengora@yandex.ru

Для цитирования: Разработка многоступенчатой технологии физико-химической очистки сточных вод горнодобывающих предприятий с адаптивным управлением / Л.А. Иванова, Е.С. Михайлова, И.В. Тимощук, и др. // Уголь. 2026;(10):75-81. DOI: 10.18796/0041-5790-2026-10-75-81.

Abstract
A multistage physico-chemical technology for the treatment of quarry wastewater from coal open-pit mines has been developed and tested under pilot-scale conditions. Based on hydrochemical monitoring data (2022-2025, Kuzbass region), the initial water composition was characterized, showing exceedances of maximum permissible concentrations (MPCs) for suspended solids, nitrates, sulfates, iron, manganese, and zinc. It was established that conventional coagulation and liming methods are insufficient for the removal of dissolved forms of ammonium, sulfates, and manganese; effective precipitation requires maintaining pH up to 10.4. A multistage treatment scheme is proposed, comprising sedimentation, reagent treatment, flotation, filtration through granular media, hydrogen peroxide oxidation (as required), adsorption on AG-3 activated carbon, and UV disinfection. The selection of flotation equipment was justified based on wastewater flow rates. The treatment efficiency reached 95.3-99.5 % for the main parameters, ensuring compliance with all MPC standards. Backup units, controlled by monitoring data, provide adaptability to seasonal and operational variations. The proposed scheme is recommended for industrial implementation.

Keywords
Quarry wastewater, physicochemical treatment, flotation, adsorption, adaptive control, maximum permissible concentrations (MPC).

Acknowledgements
The research is conducted as part of the comprehensive scientific and technical program of a complete innovative cycle "Development and implementation of a complex of technologies in the fields of exploration and extraction of minerals, ensuring of industrial safety, bioremediation, creation of new products of deep processing of coal raw materials with consecutive amelioration of ecological impact on the environment and risks to human life", approved by the Decree of the Government of the Russian Federation from 11.05.2022 №1144-r, agreement No. 075-15-2022-1201 dated 30.09.2022.

For citation
Ivanova L.A., Mikhailova E.S., Timoshchuk I.V., Ivanov P.P., Gorelkina A.K. Development of multi-stage physicochemical treatment for mining enterprise wastewater with adaptive control. *Ugol'*. 2026;(10):75-81. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2026-10-75-81.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие открытых горных работ по добыче угля сопровождается образованием значительных объемов сточных вод, формирующихся на всех этапах технологического цикла – от вскрышных и буровзрывных работ до транспортировки и обогащения угля. Наибольший вклад в водоотведение горнодобывающих предприятий (более 90%) вносят шахтные и карьерные воды, которые аккумулируют подземный и поверхностный сток с обширных площадей и характеризуются сложным многокомпонентным составом. Помимо взвешенных веществ и нефтепродуктов эти воды содержат соединения азота (аммоний, нитриты, нитраты), сульфаты, хлориды и ионы тяжелых металлов – железа, марганца, цинка, хрома. Сброс таких вод без надлежащей очистки в поверхностные водные объекты инициирует эвтрофикацию, накопление сероводорода и аммиака в донных отложениях, угнетение гидробионтов и утрату рекреационного потенциала водоемов [1].

Существующие реагентные методы очистки, включая коагуляцию полиоксихлоридом алюминия и хлорным железом, а также известкование, не обеспечивают комплексного удаления растворенных форм азота, сульфа-

Таблица 1

Классификация сточных вод угольных разрезов по источникам образования и степени загрязнения
Classification of drain water in coal strip mines by source and degree of contamination

Категория сточных вод	Источник формирования	Доля в общем водоотведении, %	Характерный уровень загрязнения
Шахтные и карьерные воды	Депрессионные воронки, подземный и поверхностный приток	90	Высокий (взвеси, нефтепродукты, соли тяжелых металлов, азотсодержащие соединения)
Дренажные воды	Водоотлив из горных выработок, перехват подземного потока	не более 5-8	Нормативно-чистые (эпизодическое превышение по взвесям)
Поверхностный сток (дождевой, талый)	Сток с техногенно нарушенных площадей	до 3-5	Умеренный (нефтепродукты, взвешенные вещества)
Хозяйственно-бытовые сточные воды	Санитарно-бытовые объекты промплощадок	< 1	Органическое и бактериальное загрязнение

тов и марганца до нормативов предельно допустимых концентраций (ПДК) даже при высоких дозах реагентов. Это обусловливает необходимость разработки и обоснования многоступенчатых технологических схем, сочетающих физико-химическую обработку, флотацию, фильтрацию и сорбционную доочистку, адаптированных к сезонной изменчивости состава сточных вод и конкретным горно-геологическим условиям.

Целью настоящей работы являлась оптимизация технологической схемы очистки карьерных сточных вод угольных разрезов на основе результатов опытно-промышленных испытаний, проведенных на реальных сточных водах предприятий Кемеровской области – Кузбасса. В задачи исследования входили: количественная оценка загрязненности исходных вод, определение эффективных доз окислителей и реагентов-осадителей, выбор оптимальных типов флотационного и фильтрующего оборудования, а также сорбционных материалов по критерию «стоимость – эффективность». На основе полученных данных предложена и апробирована технологическая схема, обеспечивающая гарантированное достижение нормативов качества воды для сброса в водные объекты.

ХАРАКТЕРИСТИКА СОСТАВА СТОЧНЫХ ВОД УГОЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Формирование сточных вод на угледобывающих предприятиях открытого типа происходит на всех стадиях технологического цикла. В зависимости от степени техногенной нагрузки и эффективности очистных мероприятий выделяют три категории сточных вод: неочищенные (без какой-либо обработки), недостаточно очищенные (после очистки не соответствующие нормативам сброса) и нормативно очищенные (сброс которых не приводит к превышению предельно допустимых концентраций в водном объекте-приемнике) [2].

В пределах горных отводов угольных разрезов формируются следующие типы сточных вод: карьерные, шахтные, дренажные, хозяйственно-бытовые, а также поверхностный сток (ливневый и талый). Дренажные воды в большинстве случаев относятся к категории нормативно-чистых. Шахтные и карьерные воды составляют более 90% общего объема водоотведения горных предприятий, что обусловлено формированием депрессионных воронок, аккумулирующих подземный и поверхностный сток с обширных площадей [3].

Обобщенная классификация сточных вод по происхождению и уровню загрязнения представлена в *табл. 1*.

Состав шахтных и карьерных вод отличается значительной вариабельностью, определяемой горно-геологическими, гидрологическими и технологическими факторами. Основными загрязняющими компонентами являются: взвешенные вещества (преимущественно неорганическая пыль), нефтепродукты, нитриты, нитраты, сульфаты, ионы железа, марганца и цинка. Органическая составляющая поступает за счет угольной мелочи и минеральных масел, используемых при эксплуатации машин и механизмов [4].

Источники поступления основных загрязнителей систематизированы в *табл. 2*.

Таблица 2

Основные загрязняющие компоненты и их происхождение в шахтных и карьерных водах
Major contaminants in the underground and surface mine waters and and origin

Компонент	Форма нахождения	Основной источник поступления
Взвешенные вещества (неорганическая пыль)	Взвешенное состояние	Взрывные работы, транспортировка, отвалообразование
Нитриты, нитраты, ионы аммония	Растворенная форма	Продукты разложения и неполного сгорания взрывчатых веществ на основе аммиачной селитры
Нефтепродукты	Растворенное и эмульгированное состояние	Утечки топлива и смазочных материалов
Сульфаты	Растворенная форма	Естественное выщелачивание вмещающих пород (техногенный вклад отсутствует)
Железо (общее), марганец, цинк	Растворенные и коллоидные формы	Геохимические особенности пород (пирит, пироксены, амфиболы, биотит, оксиды Mn) и ионный обмен с глинистыми фракциями вскрыши

При открытой разработке с применением буровзрывных работ в карьерных водах фиксируются повышенные концентрации неорганических форм азота, являющихся продуктами неполного разложения аммиачной селитры. Поступление нитратов в поверхностные воды дополнительно усиливается за счет атмосферных осадков, содержащих оксиды азота (продукты грозовых разрядов); содержание нитратов в осадках может достигать 1 мг/дм^3. Нитраты выступают конечными продуктами биохимической трансформации аммиака, преимущественно образующегося при деструкции белковых соединений [5, 6].

Хлориды в водах разрезов имеют как минеральное, так и органическое происхождение. Органические хлориды образуются при разложении сточных вод, что косвенно подтверждается повышенной окисляемостью и сопутствующим присутствием аммония, нитритов и нитратов. Высокие концентрации хлоридов (более 300-400 мг/л) оказывают ингибирующее действие на активность микроорганизмов активного ила, снижая концентрацию биомассы в два и более раза [7].

Содержание тяжелых металлов определяется фоновым уровнем в подземных водах угленосных толщ и процессами выщелачивания. Железо высвобождается из пирита, биотита, амфиболов и гранатов с последующим переходом в устойчивые оксидные формы; основная миграция осуществляется в виде твердых взвесей, коллоидов и органо-минеральных комплексов. Марганец поступает из вскрышных пород, содержащих MnO_2, и присутствует преимущественно в форме гидрокарбоната или гидроксида. Цинк аккумулируется в результате ионообменной сорбции Zn^{2+} на глинистых частицах вскрыши. Магний имеет литогенное происхождение (доломиты, оливин, серпентин, тальк, диопсид).

Водообильность горных выработок варьирует в широких пределах – от 10 до 4000 м^3/ч, коэффициент водообильности составляет 0,3-20 м^3/т. Для шахт сибирского региона характерны обводненные и весьма обводненные условия. Сезонная динамика притоков выражена увеличением в 1,5-2 раза в весенний период (снеготаяние) и в периоды интенсивных дождей; максимальные притоки тем значительнее превышают нормальные, чем меньше глубина разработки и чем теснее гидравлическая связь подземных горизонтов с поверхностными водами.

Содержание взвешенных веществ в шахтных и карьерных водах обычно не превышает 1000 мг/л, концентрация нефтепродуктов варьирует от следовых количеств до 0,2-0,8 мг/л и выше. Усредненные значения показателей по данным аккредитованных лабораторных анализов (2022-2025 гг.) для предприятий Кемеровской области – Кузбасса обобщены в *табл. 3* (приводится по результатам количественного химического анализа).

Сброс неочищенных карьерных вод в поверхностные водоемы инициирует эвтрофикацию, активизацию анаэробных процессов в донных отложениях, накопление сероводорода и аммиака, что приводит к угнетению гидробионтов и утрате рекреационного потенциала водных объектов. Повышенные концентрации нитратов, хлоридов и тяжелых металлов требуют применения многоступенчатых схем очистки, включающих отстаивание, фильтрацию, сорбцию и реагентные методы [8].

Таблица 3

Усредненный состав сточных вод угольных разрезов Кузбасса (по данным 2022-2024 гг.)

Averaged composition of drain water in coal strip mines in Kuzbass (based on data from 2022-2024)

Показатель	Среднее значение	Диапазон варьирования
Взвешенные вещества, мг/л	420	120-980
Нефтепродукты, мг/л	0,35	0,05-0,85
Нитрат-ионы (NO_3^-), мг/л	18,5	5,2-42,0
Нитрит-ионы (NO_2^-), мг/л	1,2	0,3-3,8
Ионы аммония (NH_4^+), мг/л	4,6	1,1-11,3
Сульфаты (SO_4^{2-}), мг/л	320	140-680
Хлориды (Cl^-), мг/л	95	35-240
Железо общее (Fe), мг/л	6,8	1,9-15,2
Марганец (Mn), мг/л	0,9	0,2-2,6
Цинк (Zn), мг/л	0,28	0,06-0,75
pH	7,2	6,1-8,7

Таблица 4

Рекомендуемые дозы окислителей для снижения показателей до уровня ПДК

Recommended dosages of oxidizing agents to reduce parameters down to the permissible concentration levels

Определяемый показатель	Окислитель	Расчетная доза кг/м^3 осветленной воды
БПКп	Гипохлорит натрия	0,2
БПКп	Пероксид водорода	33,6
Нитрит-ионы	Гипохлорит натрия	2,0
Нитрит-ионы	Пероксид водорода	5,0
Фенолы	Гипохлорит натрия	0,2
Фенолы	Пероксид водорода	0,3
Аммоний-ионы	Пероксид водорода	Дополнительное окисление до газообразного N_2 и H_2O

Примечание: дозы приведены для осветленной воды после стадии флотации.

МЕТОДЫ ОЧИСТКИ КАРЬЕРНЫХ СТОЧНЫХ ВОД УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗОВ: ОПТИМИЗАЦИЯ РЕАГЕНТНЫХ И АППАРАТУРНЫХ РЕШЕНИЙ

Выбор технологической схемы очистки карьерных сточных вод определяется совокупностью факторов: компонентным составом загрязнений, их концентрационными диапазонами, требуемыми нормативами качества воды для сброса в водные объекты, а также сезонной изменчивостью гидрохимических показателей [9].

Предварительные испытания показали, что применение полиоксихлорида алюминия и хлорного железа в качестве коагулянтов даже при дозах до 3 г/л в сочетании с под-

Таблица 5

Условия осаждения гидроксидов металлов
Conditions for deposition of metal hydroxides

Металл	Форма осаждения	pH полного осаждения	Исходная концентрация, мг/л	ПДК, мг/л
Железо (общее)	$Fe(OH)_3$	9,7	до 2,7	0,1
Марганец	$Mn(OH)_2$	10,4	до 0,42	0,01
Цинк	$Zn(OH)_2$	8,0	до 0,06	0,01
Магний	$Mg(OH)_2$	10,0-10,3	до 29	40,0

щелачиванием не позволяет достичь нормативов ПДК по ионам аммония, сульфатам и марганцу. Данный факт обусловлен различными механизмами удаления: коагуляция эффективна преимущественно для коллоидных и взвешенных частиц, тогда как растворенные формы указанных компонентов требуют дополнительных окислительных или осадительных стадий [10].

Известкование (введение известкового молока) обеспечивает связывание растворенной углекислоты и осаждение карбоната кальция при pH 8,5-9,0. Сульфат-ионы при pH 8,5-13,0 вступают в реакцию с ионами кальция с образованием гипса $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, выпадающего в осадок. Однако удаление магния, присутствующего в форме бикарбоната, требует повышения pH до значений не менее 10,2-10,3, что значительно увеличивает расход реагентов и усложняет процесс.

Для снижения биохимического потребления кислорода ($БПК_p$) и удаления специфических органических соединений (фенолы, нитриты, аммоний) применены химические окислители – гипохлорит натрия и пероксид водорода. Экспериментально установлены минимальные эффективные дозы, представленные в *табл. 4* (обобщение результатов пилотных испытаний).

Основным методом удаления ионов тяжелых металлов является корректировка pH до значений гидратообразования с последующим осаждением гидроксидов или основных карбонатов. Установлено, что совместное осаждение нескольких металлов при одном значении pH дает более высокую степень извлечения, чем раздельное осаждение. Особенно эффективен случай, когда один из металлов присутствует в концентрации, как минимум в пять раз превышающей другие (в моль/моль), что обеспечивает соосаждение примесей. Для разделения образовавшихся взвесей применяют гравитационное осаждение, центрифугирование или флотацию.

В *табл. 5* приведены значения pH полного осаждения для основных металлов, присутствующих в карьерных водах исследуемого разреза.

Отмечено, что максимальное превышение ПДК по марганцу достигает 0,29 мг/л, что требует точного поддержания pH на уровне 10,4.

Флотация применяется для удаления нерастворимых диспергированных примесей, склонных к плохому самоотстаиванию. Эффективность процесса зависит от гидрофобности частиц, их крупности и плотности. В работе сопоставлены два типа флотаторов: напорные и электрические гибридные.

Напорные флотаторы (производительность – 50-100 м^3/ч) обеспечивают насыщение воды воздухом под давлением 0,3-0,5 МПа с последующим выделением микропузырьков, адсорбирующих гидрофобные загрязнения. Гибридные электрофлотаторы (Ingener Hybrid) показывают более высокую степень очистки, но их максимальная производительность ограничена 25 м^3/ч. На основании выполненных расчетов предложены следующие рекомендации:

– при объеме сточных вод менее 100 м^3/ч – применение 1-4 электрофлотаторов гибридного типа (суммарной производительностью до 100 м^3/ч);

– при объеме более 100 м^3/ч – использование напорных флотаторов производительностью 50-100 м^3/ч.

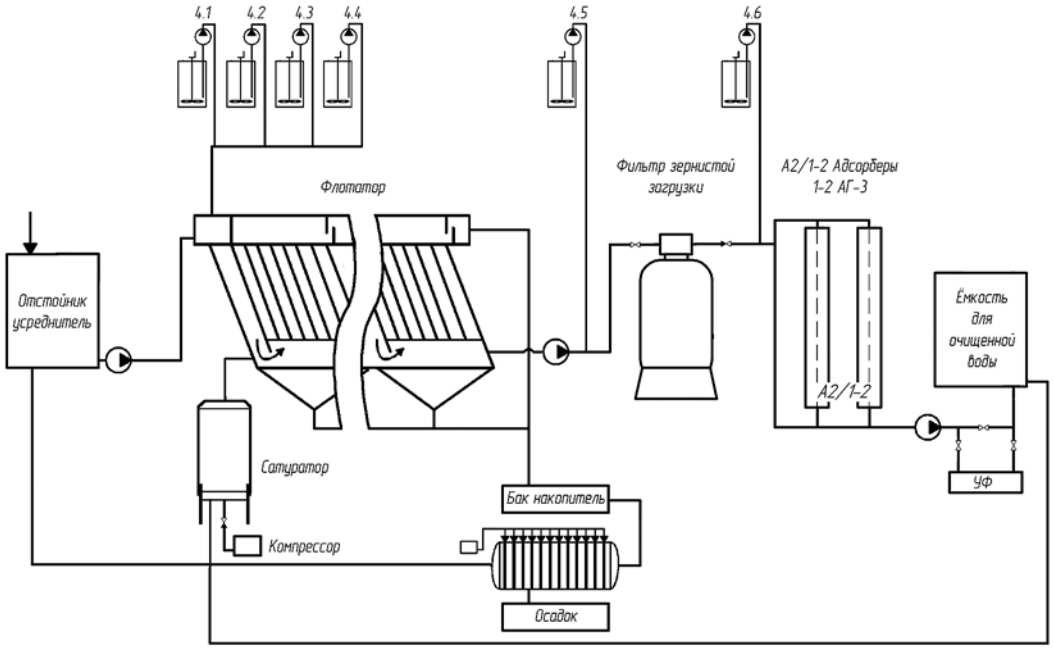
Фильтр с зернистой загрузкой, установленный после флотатора, предназначен для финишного удаления остаточных взвешенных веществ и мелкодисперсных примесей, которые не были извлечены на стадии флотации, кроме того, он выполняет роль защитного барьера для последующего оборудования (мембран обратного осмоса, сорбционных колонн или УФ-стерилизаторов), предотвращая их заиливание и обеспечивая стабильное качество очищенной воды в соответствии с требованиями ПДК. В пилотных установках в качестве зернистой загрузки использованы материалы АС и ОДМ-2Ф, показавшие высокую эффективность не только в отношении взвешенных веществ, но и в удалении железа, оксидов металлов и органических соединений [4].

Для сорбционного удаления растворенных органических веществ, нефтепродуктов и ионов тяжелых металлов, обеспечивая финишную доочистку воды до нормативов ПДК и выполняя страховочную функцию при нестабильной работе предыдущих ступеней, исследованы активные угли марок КАУ и АГ-3. Установлена сопоставимая степень извлечения по всем контролируемым ионам. Экономический расчет показал преимущество марки АГ-3: удельная стоимость – 125 руб./кг против 175 руб./кг для КАУ, что делает АГ-3 предпочтительным для промышленного внедрения [12].

На основании проведенных испытаний разработана многоступенчатая схема (*см. рисунок*), включающая следующие этапы:

1. Отстойник-усреднитель – задержка 1-2 ч для осаждения крупных взвесей (песок, ил) и удаления всплывающих примесей (масла, жиры) скиммерами. Концентрация взвесей на выходе – не более 50 мг/л.

2. Реагентная обработка – дозирование NaOH, коагулянта, флокулянта в первую камеру флотатора. В зависимости от сезонного состава стоков дополнительно вводится известковое молоко (при превышении сульфатов) или корректируется доза щелочи для достижения pH осаждения или марганца (поз. 4.1-4.4).



Рекомендуемая технологическая схема очистки (для расходов >100 м³/ч)

The recommended treatment process flow diagram (for flow rates >100 m³/h)

3. Напорная флотация – насыщение воды воздухом под давлением 0,3-0,5 МПа; образовавшаяся пена и шлам отводятся на фильтр-пресс для обезвоживания.

4. Фильтр с зернистой загрузкой (АС, ОДМ-2Ф) – удаление остаточных взвесей и части ионов металлов.

5. Дозирование H_2O_2 (при необходимости) – окисление аммония, нитритов, фенолов и снижение БПК (поз. 4.5).

6. Сорбционные фильтры (активный уголь АГ-3) – глубокая доочистка от органических примесей и остаточных металлов.

7. Корректировка pH до 6,5-8,5 соляной кислотой (HCl) и, при необходимости, УФ-обработка для микробиологического обеззараживания (поз. 4.6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам опытно-промышленных испытаний на сточных водах угольных разрезов установлено, что исходные карьерные воды характеризуются многокомпонентным загрязнением с превышениями ПДК по взвешенным веществам, нитратам, сульфатам, железу, марганцу и цинку. Показано, что классические реагентные методы – коагуляция и известкование – не обеспечивают нормативной очистки от растворенных форм аммония, сульфатов и марганца, поскольку эффективное осаждение марганца и магния требует поддержания высоких значений pH (соответственно ≥ 10,4 и ≥ 10,0-10,3). Экспериментально обосновано применение химических окислителей (гипохлорит натрия и пероксид водорода) для снижения БПКп, нитритов, фенолов и аммоний-ионов. Определены оптимальные значения pH полного осаждения гидроксидов металлов, совместное осаждение нескольких металлов при едином pH показало более высокую эффективность по сравнению с раздельным. Для флотационной обработки обоснованы критерии выбора оборудования: при расходах менее 100 м³/ч предпочтительны гибридные электрофлотаторы, при больших объемах – напорные флотаторы. Сорбционные материалы КАУ и АГ-3 продемонстрировали сопоставимую очистную способность, однако марка АГ-3 признана экономически более целесообразной. Апробированная многоступенчатая схема (включающая отстаивание, реагентную обработку, флотацию, фильтрацию через зернистую загрузку, дозирование окислителей по показаниям, сорбцию на активном угле, корректировку pH и при необходимости УФ-обработку) обеспечила интегральную эффективность 95,3% по взвешенным веществам, 99,5% по БПКп, 96,4% по фенолам, 97,6% по марганцу, 98,2% по железу, 91,7% по цинку и 96% по хрому, с достижением остаточных концентраций всех загрязнителей на уровне, не превышающем ПДК. Предусмотренные резервные блоки, активируемые по результатам оперативного мониторинга, придают схеме адаптивность к сезонным и технологическим колебаниям состава стоков. Полученные результаты позволяют рекомендовать предложенную технологическую схему для внедрения на угольных разрезах со сходными гидрогеологическими условиями; дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку автоматизированной системы управления реагентным хозяйством на основе онлайн-контроля ключевых параметров и оценку ресурса и регенерационной способности сорбционной загрузки.

Список литературы • References

1. Формирование шахтных вод и анализ способов их очистки / А.А. Куликова, Ю.А. Сергеева, Т.И. Овчинникова и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-техниче-

ский журнал). 2020;(7):135-145. DOI: 10.25018/02361493-2020-7-0-135-145.
Kulikova A.A., Sergeeva Yu.A., Ovchinnikova T.I., et al. Formation of mine waters and analysis of their treatment methods. *Gornyj informatscionno-analiticheskij byulleten'.* 2020;(7):135-145. (In Russ.). DOI: 10.25018/02361493-2020-7-0-135-145.

2. Михайлова Е.С., Иванова Л.А. Технологии полного цикла очистки карьерных и поверхностных сточных вод для предприятий по добыче угля открытым способом: тенденции и перспективы // Уголь. 2023;(9):63-69. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-9-63-69.
Mikhaylova E.S., Ivanova L.A. Technologies of full-cycle treatment of pit and surface wastewater for open-pit coal mining operations: trends and prospects. *Ugol'.* 2023;(9):63-69. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790– 2023-9-63-69.
3. Техногенная нагрузка угольных предприятий Кузбасса на водотоки Кемеровской области / И.В. Тимощук, Е.С. Михайлова, А.К. Горелкина и др. // Уголь. 2024;(6):107-113. DOI: 10.18796/0041–5790-2024-6-107-113.
Timoshchuk I.V., Mikhaylova E.S., Gorelkina A.K., Neverov E.N., Golubeva N.S., Ivanova L.A. Technogenic load of Kuzbass coal enterprises on watercourses of the Kemerovo region. *Ugol'*. 2024;(6):107-113. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041– 5790-2024-6-107-113.
4. Выбор технологического решения по очистке сточных вод для предприятия открытой угледобычи / Л.А. Иванова, Е.С. Михайлова, О.В. Артемова и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2025;(12):169-184. DOI: 10.25018/0236-1493-2025-12-0-169.
Ivanova L.A., Mikhailova E.S., Artemova O.V, Ivanov P.P. Selection of wastewater treatment process designs for open pit coal mines. *Gornyj informatscionno-analiticheskij byulleten'.* 2025;(12):169-184. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2025-12-0-169.
5. Бессонова Е.Н., Глушанкова И.С. Теоретическое и экспериментальное обоснование использования редокс-системы Fe^0-C для очистки карьерных вод от нитрат-ионов // Записки Горного института. 2025;276-1:41-50.
Bessonova E.N., Glushankova I.S. Theoretical and experimental substantiation of using Fe^0-C redox system for nitrate ion removal from quarry waters. *Zapiski Gornogo instituta.* 2025;276-1:41-50. (In Russ.).
6. Кудряшова Е.Н., Глушанкова И.С., Бессонова Е.Н. Очистка карьерных вод горнодобывающих предприятий от нитрат-ионов // Химия. Экология. Урбанистика. 2021;(1):116-120.
Kudryashova E.N., Glushankova I.S., Bessonova E.N. Removal of nitrate ions from drainage water at mining operations. *Himiya, ekologiya*, *urbanistika.* 2021;(1):116-120. (In Russ.).
7. Оценка эффективности очистки сточных вод угольных предприятий от взвешенных веществ различными фильтрующими материалами / Л.А. Иванова, А.Ю. Просеков, П.П. Иванов и др. // Горные науки и технологии. 2024;9(3):263-270. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-03-227.
Ivanova L.A., Prosekov A.Yu., Ivanov P.P., Mikhaylova E.S., Timoshchuk I.V., Gorelkina A.K. Assessment of the efficiency of wastewater treatment from coal enterprises for suspended solids using various filtering materials. *Gornye nauki i tekhnologii.* 2024;9(3): 263-270. (In Russ.). DOI: 10.17073/2500-0632-2024-03-227.
8. Выбор технологии очистки сточных вод угольных разрезов от сульфат-ионов / Л.А. Иванова, П.П. Иванов, Н.В. Гора и др. // Кокс и химия. 2022;(12):44-48. DOI: 10.52351/00232815_2022_12_44.
Ivanova L.A., Ivanov P.P., Gora N.V., Kondratyeva Yu.V. Selection of technology to remove sulfate ions from coal strip mine wastewater. *Koks i himiya*. 2022;(12):44-48 (In Russ.). DOI: 10.52351/00232815_2022_12_44.
9. Dyshlyuk L., Asyakina L., Prosekov A. Reclamation of Post-Technological Landscapes: International Experience. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2021;51(4):805-818. DOI: 10.21603/2074-9414-2021-4-805-818.
10. Du X., Yang W., Liu Y., Zhang W., Wang Z., Nie J. et al. Removal of manganese, ferrous and antibiotics from groundwater simultaneously using peroxymonosulfate-assisted in-situ oxidation/coagulation integrated with ceramic membrane process. *Separation and Purification Technology.* 2020;252:1174921. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.117492.
11. Исследование сорбции органических соединений углеродными сорбентами из углей Кузбасса / А.А. Звеков, И.Ю. Зыков, Ю.Н. Дудникова и др. // Кокс и химия. 2019;(6):22-27.
Zvekov A.A., Zykov I.Yu., Dudnikova Yu.N. et al. Sorption of organic compounds by carbon sorbents from Kuzbass coals. *Koks i himiya.* 2019;(6):22-27. (In Russ.).
12. Иванова Л.А., Тимощук И.В., Горелкина А.К. и др. Выбор сорбента для элиминации ионов железа из сточных и природных вод // Техника и технология пищевых производств. 2024; 54(2):398-411. DOI: 10.21603/2074-9414-2024-2-2516.
Ivanova L.A., Timoshchuk I.V., Gorelkina A.K. et al. Selection of a sorbent for the elimination of iron ions from wastewater and natural waters. *Tehnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv.* 2024; 54(2):398-411. (In Russ.). DOI: 10.21603/2074-9414-2024-2-2516.

Authors Information

Ivanova L.A. – PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Technosphere Safety, Kemerovo State University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: lyuda_ivan@mail.ru

Mikhailova E.S. – PhD (Chemistry), Associate Professor, Department of Technosphere Safety, Director, Institute of Nano-, Bio-, Information, Cognitive and Socio-Humanitarian Technologies, Kemerovo State University, Kemerovo, 650000, Russian Federation; e-mail: e_s_mihaylova@mail.ru

Timoshchuk I.V. – Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Technosphere Safety, Kemerovo State University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: irina_190978@mail.ru

Ivanov P.P. – PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Mechatronics and Automation of Technological Systems, Kemerovo State University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: ipp7@yandex.ru

Gorelkina A.K. – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Technosphere Safety, Kemerovo State University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: alengora@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 25.08.2026
Поступила после рецензирования: 17.09.2026
Принята к публикации: 30.09.2026

Paper info

Received August 25, 2026
Reviewed September 17, 2026
Accepted September 30, 2026