

Выбор флотационной установки в технологии реализации комплексной очистки сточных вод угольных предприятий

Л.А. Иванова¹✉, Е.С. Михайлова¹, И.В. Тимошук¹, А.К. Горелкина¹, В.П. Иванова²

¹ Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация

² Сибирский государственный медицинский университет, г. Томск, Российская Федерация

✉ lyuda_ivan@mail.ru

Резюме: Очистка карьерных вод угольных разрезов, которые характеризуются большим объемом сточных вод, низкой температурой и присутствием плохо удаляемых веществ – сульфатов, хлоридов, нитратов и ионов аммония, что значительно затрудняет выбор оптимальной технологии водоочистки, представляет собой сложную инженерную задачу. Стадия реагентной обработки исходной сточной воды предназначена для глубокого удаления из неё взвешенных и коллоидных веществ, нефтепродуктов, фосфатов и соединений тяжёлых металлов, в частности железа. Флотацию применяют при очистке сточных вод многих производств для удаления нерастворимых диспергированных примесей, которые самопроизвольно плохо отстаиваются.

Цель исследования – определение оптимальной конфигурации и режима работы флотационного оборудования для достижения максимальной эффективности очистки сточных вод угольных предприятий. В статье дано детальное описание принципов работы флотокомбайнов различных типов для очистки сточных вод угольных предприятий, а также представлена информация о результатах промышленных испытаний в реальных условиях эксплуатации. Для очистки сточных вод производительностью до 100 м³/ч рекомендуем использовать электрофлотатор гибридного типа (оптимальная установка от 1 до 4 электрофлотаторов производительностью 25 м³/ч). Для очистки сточных вод производительностью сброса свыше 100 м³/ч целесообразнее использовать напорные флотаторы производительностью от 50–100 м³/ч. Проведение испытаний помогает принять обоснованные технические и управленческие решения, направленные на улучшение качества очистки сточных вод и сокращение издержек предприятия.

Ключевые слова: угледобывающее предприятие, очистка сточных вод, реагентная очистка, флотокомбайны, гибридный флотатор

Благодарности: 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.

Для цитирования: Иванова Л.А., Михайлова Е.С., Тимошук И.В., Горелкина А.К., Иванова В.П. Выбор флотационной установки в технологии реализации комплексной очистки сточных вод угольных предприятий. *Горная промышленность*. 2025;(4):151–156. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-151-156>

Selection of the flotation unit as part of the technology to implement integrated wastewater treatment at coal mining operations

L.A. Ivanova¹✉, E.S. Mikhaylova¹, I.V. Timoshchuk¹, A.K. Gorelkina¹, V.P. Ivanova²

¹ Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation

² Siberian State Medical University, Tomsk, Russian Federation

✉ lyuda_ivan@mail.ru

Abstract: Treatment of open-pit water from coal strip mines, which are characterized by large volumes of runoff water, low temperature and presence of hard-to-remove substances, i.e. sulphates, chlorides, nitrates and ammonium ions, which makes the choice of optimal water treatment technology much more difficult, is a complex engineering task. The stage of reagent treatment of the original runoff water is designed for thorough removal of the suspended and colloidal substances, petroleum products, phosphates and heavy metal compounds, in particular iron. Flotation is used for wastewater treatment in many industries to remove insoluble dispersed impurities, which are poorly settling on their own.

The purpose of the study was to identify the optimal configuration and the operating mode of the flotation equipment to achieve

the maximum efficiency of runoff water treatment at coal-mining operations. The article provides a detailed description of the operating principles of the flotation plants of different types for wastewater treatment at coal operations, as well as information on the results of the commercial tests in real operating conditions. A hybrid-type electro-flotation unit is recommended for wastewater treatment with the throughput capacity of up to 100 m³/h (the optimal plant should contain from 1 to 4 electro-flotation units with the throughput capacity of 25 m³/h each). Pressure-type flotation units with the capacity of 50-100 m³/h are more appropriate for wastewater treatment with the discharge capacity exceeding 100 m³/h. Execution of tests helps to make reasonable technical and managerial decisions aimed at improving the quality of wastewater treatment and reducing the costs of the operation.

Keywords: coal mining operation, wastewater treatment, reagent treatment, flotation plants, hybrid flotation unit

Acknowledgments: 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-р, agreement No. 075-15-2022- 1201 dated 30.09.2022

For citation: Ivanova L.A., Mikhaylova E.S., Timoshchuk I.V., Gorelkina A.K., Ivanova V.P. Selection of the flotation unit as part of the technology to implement integrated wastewater treatment at coal mining operations. *Russian Mining Industry*. 2025;(4):151–156. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-151-156>

Введение

Основными маркерами-загрязнителями карьерных сточных вод выступают: взвешенные вещества, тяжелые металлы (такие как железо, марганец), а также растворенные соли [1]. Выбор оптимального способа очистки определяется результатами технико-экономического анализа, ключевыми критериями которого служат степень эффективности очистки, объем капитальных вложений, размер эксплуатационных затрат и другие показатели [2].

Существующая схема очистки и сброса карьерных вод, реализованная на большинстве угледобывающих предприятий в Кузбассе, отвечает требованиям НДТ и состоит из нескольких этапов, приведенных на рис. 1 [3]. Основными недостатками в работе имеющихся очистных сооружений на угольных разрезах являются:

1. Низкая эффективность очистки по взвешенным веществам, несмотря на наличие отстойников и фильтрации воды в фильтрующую дамбу. Этап очистки – отстаивание, фильтрование. Причина недостаточной эффективности – мелкодисперсность основной части загрязнений. Пути решения для улучшения эффективности очистки – применение технологии реагентной обработки воды [4].

2. Недостаточная эффективность очистки по органическим загрязнениям (оцененных по БПК), нефтепродуктам (в ряде случаев). Этап очистки – отстаивание, фильтрование через дамбу. Причина недостаточной эффективности – пруд-отстойник с фильтрующими дамбами не является сооружением с высокой степенью очистки от органических загрязнений. Пути решения для улучшения эффективности очистки – применение технологии реагентной обработки воды, фильтрация через материалы, обладающие сорбционными свойствами, либо применение окислительных методов очистки.

3. Отсутствие эффекта очистки по нитратам, нитритам, железу общему, сульфатам, по хлоридам.

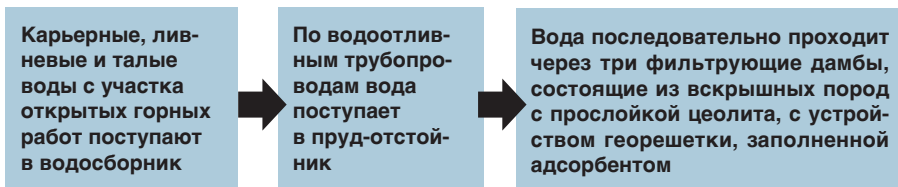


Рис. 1
Схема очистки карьерных сточных вод, реализуемая на угледобывающих предприятиях Кузбасса

Fig. 1
A flow chart of open-pit wastewater treatment implemented at coal mining operations in Kuzbass

Этап очистки – отстаивание, фильтрование через дамбу. Причина – пруд-отстойник не является сооружением, способным производить очистку от растворенных компонентов. Пути решения для улучшения эффективности очистки – строительство специализированных сооружений доочистки с завершающим этапом технологической цепочки посредством технологии обессоливания и удаления истинно растворимых веществ.

Для существенного улучшения качества сбрасываемой воды требуется строительство дополнительных очистных сооружений с применением реагентной обработки воды и других методов очистки с использованием существующего отстойника в качестве регулирующего резервуара [5].

Характеристика и принцип работы установок для флотации

Флотацию применяют для удаления из сточных вод нерастворимых диспергированных примесей, которые самопроизвольно плохо отстаиваются [6].

Широко распространенным в настоящее время и самым простым способом очистки сточных вод от большинства загрязнителей является реагентный метод. Суть его заключается во введении в сточные воды реагентов для наиболее полного осаждения ионов загрязнителя в виде их трудно-растворимых солей. При реагентной обработке протекают такие процессы, как нейтрализация стоков, коагуляция, флокуляция и химическое осаждение [7].

Преимуществами флотации являются: непрерывность процесса, широкий диапазон применения, небольшие капитальные и эксплуатационные затраты, простое аппаратное оформление, селективность выделения примесей, большая скорость процесса разделения, а также возможность получения шлама более низкой влажности (90–95%), высокая степень очистки (95–98%), возможность рекуперации удаляемых веществ. Процесс флотации включает насыщение стоков воздухом, уменьшение содержания поверхностно-активных веществ и легкоподверженных окислению соединений, уничтожение бактерий и микроорганизмов. Эти факторы обеспечивают благоприятные условия для эффективного осуществления дальнейших этапов водоочистки [8].

К недостаткам флотационного ме-

тода относятся: возможность его применения для удаления не всех загрязняющих веществ (только гидрофобных), необходимость применения реагентов для повышения гидрофобности загрязнителей и устойчивости флотопены, необходимость точной настройки оборудования, подающего воздух, для получения пузырьков определенного диаметра [9].

Для выбора в качестве рекомендаций внедрения флотации в технологическую линию комплексной очистки сточных вод были проведены опытно-промышленные испытания на двух пилотных мобильных установках производительностью 1 м³/ч. В одной установке установили флотатор гибридного типа от производителя Ingener Hybrid, в другой напорный флотокомбайн серии КБС (рис. 2).

Принцип работы гибридного флотатора приведен на рис. 3, в качестве особенности его работы можно выделить: использование сатурированной воды, что позволяет избежать дорогостоящих аппаратов подготовки воздуха и снизить энергозатраты. Декомпрессия сатурированной воды создает дополнительные микропузырьки, улучшающие эффективность флотации, ламинарное движение воды в пространственных элементах (вертикальных ламелях) увеличивает вероятность контакта пузырьков с флоккулами. Преимуществом гибридного флотатора от производителя Ingener Hybrid является комбинация методов электрофлотации и напорной флотации, что обеспечивает повышение эффективности очистки сточных вод, эффективное удаление отложений на электродах (солей жесткости и полимерных пленок), дополнительное обеззараживание и деструкцию органических веществ за счет образования продуктов электролиза (хлор, диоксид хлора, хлорноватистая кислота, пероксид водорода), улучшенную сепарацию фаз за счет использования вертикально расположенных ламелей и специальных устройств для сбора и удаления флотошлама [10]. Описание технологической линии и режимов работы, используемых в опытно-промышленной установке, приводится в [11].

Флотокомбайн серии КБС объединяет процессы механической и химической очистки, позволяя получать чистую воду с минимальным количеством оставшихся загрязнений, принцип работы приведен на рис. 4 [12]. Горизонтальный флотокомбайн оснащён последовательно расположенными отстойником и камерой флотации, конструкция выполнена в виде основного корпуса и дополнительного навесного оборудования. Внешняя сторона корпуса оборудована патрубками для подвода и вывода обрабатываемой воды, устройствами ввода растворов реагентов, выпускными

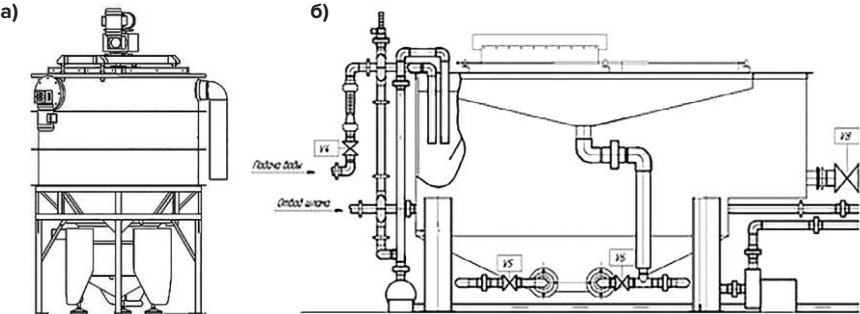


Рис. 2
Общий вид установки:
а – флотатор гибридного типа от производителя Ingener Hybrid; б – напорный флотокомбайн серии КБС

Fig. 2
An overall view of the plant:
а – a hybrid-type flotation unit by Ingener Hybrid;
б – pressure-type flotation unit of the KBS series

Подготовка сточной воды:	Предварительно обработанная сточная вода проходит стадию нормализации, коагуляции и флокуляции, формируя крупные агрегаты (флокулы) загрязняющих веществ.
Электролиз сатурированной воды:	Предварительно обработанная сточная вода проходит стадию нормализации, коагуляции и флокуляции, формируя крупные агрегаты (флокулы) загрязняющих веществ.
Образование газонасыщенных флокул:	Микропузырьки газа взаимодействуют с подготовленными флокулами, создавая легкие комплексы, способные подняться на поверхность воды.
Напорная флотация:	Образовавшиеся газонасыщенные флокулы продвигаются вверх и собираются на поверхности («зеркале») флотатора. Процесс поддерживается дополнительной подачей сатурированной воды в промежуточное пространство между малыми и средними обечайками.
Сбор флотошлама:	Скребковые механизмы собирают образовавшийся флотошлам и перемещают его в накопительную емкость.
Осветление воды:	После отделения флотошлама осветленная вода направляется в следующий цикл обработки или сливается в резервуар.

Рис. 3
Принцип работы флотатора гибридного типа от производителя Ingener Hybrid

Fig. 3
Operating principle of the hybrid-type flotation unit by Ingener Hybrid

ми отверстиями для сбора флотационного шлама и осаждаемого осадка, а также трубопроводами для введения рабочей жидкости – смеси воды и воздуха [13].

Внутреннее пространство корпуса содержит отстойник, оснащённый мешалкой для равномерного распределения содержимого и системой тонких слоёв освещения, состоящей из набора наклонённых пластин. Пластины изготовлены из гофрированного материала с параметрами длины волны 10–30 см и высоты волны 1–5 см. Камера флотации оснащена снизу форсунками для подачи рабочей жидкости, а в центральной зоне размещён фильтрующий элемент из пористой волоконной структуры с размером пор 1–100 мк. Инженерное оформление процессов очистки сточных вод с использованием флотокомбайнов серии КБС приводится в [14].

Результаты

Лабораторные эксперименты по реагентному осветлению исходной воды проводились с целью определения оптимального типа реагента и его дозы для достижения максимально возможной эффективности очистки сточных вод. Метод пробной коагуляции, помимо определения дозы коагулянта, даёт возможность наблюдать процесс флокуляции и выяснить её влияние на процесс осветления воды и осаждения осадка.

По итогам пробного коагулирования были определены рабочие растворы реагентов (NaOH, флокулянта и коагулянта), а также дозировки, которые позволяют обеспечить разделение дисперсных фаз и полное осветление промышленных сточных вод.

Подготовка исходной воды:	Грязная вода поступает во флотокамеру. Одновременно туда же вводится раствор специального реагента (обычно флокулянта или коагулянта).
Перемешивание:	Мешалка активно перемешивает воду с раствором реагента, способствуя образованию хлопьев (агрегатов загрязнений).
Образования хлопьев:	За счет взаимодействия реагента с загрязняющими веществами формируются хлопья, содержащие частицы загрязнений.
Тонкослойное осветление:	Смесь с хлопьями поступает в межполочное пространство блока тонкослойного осветления. Хлопья постепенно оседают на нижние полки, двигаясь вниз по наклонным пластинам. По мере продвижения вниз хлопья накапливаются в желобах, выполненных из волнистого материала.
Удаление осадка:	Накопленные хлопья регулярно удаляются из устройства.
Вторичная флотация:	Предварительно осветлённая вода снова попадает во флотокамеру. Здесь вводятся пузырьки воздуха, которые формируют флотокомплексы ("частица загрязнения + пузырек"). Эти флотокомплексы поднимаются вверх, создавая слой флотошлама.
Окончательная очистка:	Очищенная вода, свободная от большинства загрязнений, выходит из флотокомбайна через специальный фильтр.

Рис. 4
Принцип работы флотокомбайна серии КБС

Fig. 4
Operating principle of the flotation unit of the KBS series

Усредненные результаты аналитического контроля анализа химического состава сточных вод, прошедших этап реагентной обработки и флотации, приведены в табл. 1.

Анализ химического состава исходной сточной воды выявил превышение концентрации загрязняющих веществ выше норм ПДК по двенадцати показателям: аммоний-ион, БПКп, взвешенные вещества, нефтепродукты, нитриты, сульфаты, фенол, ХПК, железо, марганец, марганец растворенный, хром общий.

Таблица 1
Усредненные данные химического состава сточных вод, прошедших этапы реагентной обработки и флотации

Показатели	ПДК	Абсолютная погрешность, Δ	Исходная проба	Флотокомбайн серии КБС		Электрохимический флотатор	
				Точка после флотатора	Степень очистки, %	Точка после флотатора	Степень очистки, %
Аммоний-ионы, мг/дм³	0,5	0,17	0,85	0,79	7,1	0,78	8,2
БПК полное, мгО₂/дм³	3,0	0,5	4,5	4,5	–	0,81	82,0
Взвешенные вещества, мг/дм³	10,0	0,9	49,5	37	25,3	3,4	93,1
рН, ед/рН	6,5–8,5	0,2	7,8	7,8	0,0	8,2	Увеличение на 5,1
Нефтепродукты, мг/дм³	0,05	–	0,2	0,05	75,0	0,05	75,0
Нитрат-ионы, мг/дм³	40	3,3	22,15	3,1	86,0	4,3	80,6
Нитрит-ионы, мг/дм³	0,08	–	0,184	0,184	–	0,044	76,1
Сульфат-ионы, мг/дм³	100	55	151,5	130,0	13,9	127	16,2
Сухой остаток, мг/дм³	1500	71	588	541	8,0	541	8,0
Фенол, мг/дм³	0,001	0,0005	0,0013	0,0005	61,5	0,00051	60,8
Цветность, гр. цв.	20	1,9	5,1	4,3	15,7	4,8	5,9
ХПК, мгО₂/дм³	30	2,0	59	24	59,3	13,7	76,8
Железо, мг/дм³	0,1	0,04	1,55	0,083	94,6	0,064	95,9
Железо растворенное, мг/дм³	0,1	–	Менее 0,05	Менее 0,05	–	Менее 0,05	–
Магний, мг/дм³	40,0	6	38,5	36	6,5	33	14,3
Марганец, мг/дм³	0,01	0,06	0,2	0,04	80,0	0,14	30,0
Марганец растворенный, мг/дм³	0,01	0,06	0,12	0,032	71,3	0,12	–
Хлорид-ион, мг/дм³	300,0	4	13,6	25,6	Увеличение на 88	18,3	Увеличение на 34,6
Хром общий, мг/дм³	0,02	0,0006	0,0128	0,0049	61,7	0,0012	90,6
Хром растворенный, мг/дм³	0,02	0,00026	Менее 0,01	Менее 0,01	–	Менее 0,001	–
Цинк, мг/дм³	0,01	0,0032	0,008	0,008	–	0,008	–
Цинк растворенный, мг/дм³	0,01	0,0022	Менее 0,005	Менее 0,005	–	Менее 0,005	–

Примечания: Красным выделены значения концентраций, превышающие нормы ПДК
Note: Concentrations exceeding MAC are marked in red

Сравнительный анализ очистки сточных вод на этапе реагентной очистки и флотации показал, что снижение концентрации загрязняющих веществ до норм ПДК:

- с помощью флотокомбайна серии КБС наблюдается по пяти показателям: нефтепродукты, фенол, ХПК, железо, хром общий;
- с помощью электрохимического флотатора гибридного типа наблюдается по восьми показателям: БПКп, взвешенные вещества, нефтепродукты, нитриты, фенол, ХПК, железо, хром общий.

Концентрация загрязняющих веществ выше норм ПДК в очищенной пробе наблюдается:

- после флотокомбайна серии КБС по семи показателям: аммоний-ион, БПКп, взвешенные вещества, нитриты, сульфаты, марганец, марганец растворенный;

- после электрохимического флотатора гибридного типа по четырем показателям: аммоний-ион, сульфаты, марганец, марганец растворенный.

Результаты исследования показали, что:

- достигнута высокая степень очистки от органических загрязнений. Снижение концентрации органических веществ происходит за счёт процессов коагуляции и флокуляции, а также за счёт образования активных перекисных соединений в процессе электролиза воды;

Table 1
Averaged data on the chemical composition of wastewater that has passed the stages of reagent treatment and flotation

- достигнута высокая степень очистки от тяжелых металлов – железа, хрома. При осаждении ионов тяжелых металлов преимущественно образуются труднорастворимые гидроксидные осадки в виде основных солей металлов;
- рост концентрации хлоридов в очищенной пробе по сравнению с исходной можно объяснить дозированием коагулянта на основе оксихлорида алюминия;
- наблюдается незначительное снижение концентрации катионов аммония. Катионы аммония могут быть дополнительно окислены гипохлоритом натрия до газообразного азота, хлорида натрия и молекул воды;
- снижение концентрации взвешенных веществ на 93% говорит о хорошей коагуляции находящихся в растворе коллоидов.

Выводы

Метод флотации применяется для извлечения из сточных вод нерастворенных дисперсных примесей, характеризующихся медленным естественным оседанием. Флотационные очистные сооружения представляют собой специальные агрегаты, предназначенные для очистки хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод. Эти установки реализуют технологию разделения твердых и жидких фаз, что значительно улучшает качество очистки. Комплексы включают различные компоненты, включая скребковые фильтры и прочие фильтрационные модули, способные эффективно удалять крупные и мелкие фракции осадков.

Установки флотационного типа широко используются для очищения ливневых и промышленных сточных вод. Основополагающими элементами данных комплексов являются химические реагенты, обеспечивающие выделение мельчайших частиц загрязнений и формирование всплывающего слоя пены. Эта методика способствует повышению уровня чистоты обработанной воды, которую впоследствии направляют в насосные станции либо сбрасывают в природные водоёмы после завершения всех этапов очистки. Немаловажным фактором выступает грамотное конструирование трубопроводов и резервуаров, гарантирующее надёжность и продолжительный срок службы установок вне зависимости от внешних факторов.

Подбор подходящего типа флотатора осуществляется исходя из нескольких критериев:

- физико-химические характеристики разделяемых компонентов (размер частиц, гидрофобность, удельный вес и др.);
- требования к производительности и качеству очистки;
- энергозатратность осуществляемого процесса;
- габаритные размеры и конфигурация оборудования;
- стоимость самого оборудования и затраты на эксплуатацию.

Как показала работа опытно-промышленных установок, электрические флотаторы гибридного типа ускоряют процесс очистки сточных вод от содержащихся в них загрязнений и обеспечивают более высокую степень такой очистки по сравнению с напорными флотаторами. Однако существенным ограничением использования установок данного типа является их производительность (максимальная производительность электрофлотатора от производителя Ingener Hybrid – 25 м³/ч).

Таким образом, для очистки сточных вод производительностью до 100 м³/ч рекомендуем использовать электрофлотатор гибридного типа (оптимальная установка от 1 до 4 электрофлотаторов производительностью 25 м³/ч). Для очистки сточных вод производительностью сброса свыше 100 м³/ч целесообразнее использовать напорные флотаторы производительностью от 50–100 м³/ч.

Применение для очистки карьерных сточных вод угледобывающих предприятий популярных коагулирующих агентов, таких как полиоксихлорид алюминия и хлорное железо, даже при значительных дозировках реагентов (до 3 г/л) и дополнительном повышении щелочности среды не позволяет эффективно снизить содержание ионов аммония, сульфатов и марганца до допустимых нормативов предельно допустимой концентрации (ПДК), необходимых перед выпуском сточной воды в канализационную сеть. Таким образом, рекомендуется в технологическую схему промышленных очистных сооружений включить, помимо реагентной обработки и флотации, фильтрацию через сорбент на основе природных алюмосиликатов, а также сорбцию на активном угле.

Список литературы / References

1. Иванова Л.А., Салищева О.В., Тимошук И.В., Голубева Н.С., Горелкина А.К. Приоритетные загрязнители сточных карьерных вод в угледобывающей промышленности и способы их очистки. *Кокс и химия*. 2023;(4):44–50. Ivanova L.A., Salishcheva O.V., Timoshchuk I.V., Golubeva N.S., Gorelkina A.K. Priority pollutants of quarry wastewater in the coal mining industry and methods of their treatment. *Koks i Khimiya*. 2023;(4):44–50. (In Russ.)
2. Иванов П.П., Пачкин С.Г., Иванова Л.А., Михайлова Е.С., Семенов А.Г. Организация повторного использования карьерных сточных вод угледобывающих предприятий. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2024;(3):190–199. Ivanov P.P., Pachkin S.G., Ivanova L.A., Mikhailova E.S., Semenov A.G. Wastewater reuse in open pit coal mines. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2024;(3):190–199. (In Russ.)
3. Иванова Л.А., Голубева Н.С., Тимошук И.В., Горелкина А.К., Просяков А.Ю., Сапурин З.П., Медведев А.В. Оценка эффективности очистки сточных вод угледобывающего предприятия и ее влияние на загрязнение малых рек. *Экология и промышленность России*. 2023;27(1):60–65. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-1-60-65> Ivanova L.A., Golubeva N.S., Timoshchuk I.V., Gorelkina A.K., Prosekov A.Yu., Sapurin Z.P., Medvedev A.V. Evaluation of the Efficiency of Wastewater Treatment of a Coal Mining Enterprise and its Impact on the Pollution of Small Rivers. *Ecology and Industry of Russia*. 2023;27(1):60–65. (In Russ.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-1-60-65>
4. Иванова Л.А., Тимошук И.В., Горелкина А.К., Михайлова Е.С., Голубева Н.С., Неверов Е.Н., Утробина Т.А. Выбор сорбента для элиминации ионов железа из сточных и природных вод. *Техника и технология пищевых производств*. 2024;54(2):398–411. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2516> Ivanova L.A.1, Timoshchuk I.V.1, Gorelkina A.K.1, Mikhailova E.S.1, Golubeva N.S.1, Neverov E.N.1, Utrobina T.A. Removing excess iron from sewage and natural waters: selecting optimal sorbent. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2024;54(2):398–411. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2516>

5. Yu X., Tang Y., Pan J., Shen L., Begum A., Gong Z., Xue J. Physico-chemical processes. *Water Environment Research*. 2020;92(10):1751–1769. <https://doi.org/10.1002/wer.1430>
6. Falconi I.B.A., Junior A.B.B., Baltazar M.P.G., Espinosa D.C.R., Tenório J.A.S. An overview of treatment techniques to remove ore flotation reagents from mining wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2023;11(6):111270. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111270>
7. Берёза И.Г., Волкова Т.А., Шацкова Е.И. Применение флокулянтов для очистки сточных вод горнодобывающих предприятий. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2025;(1):276–283.
Beryozha I.G., Volkova T.A., Shatckova E.I. Application of flocculants for mining wastewater treatment. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2025;(1):276–283. (In Russ.)
8. Joni I.M., Sofia D.R., Sulistio E., Azhary S.Y., Wibawa B.M., Panatarani C. Flotation of suspended solid by introducing coagulant and fine bubbles in the mobile wastewater treatment plant. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022;2344:012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2344/1/012007>
9. Красавцева Е.А., Максимова В.В., Макаров Д.В., Маслобоев В.А. Методы очистки сточных вод горнопромышленных предприятий от взвешенных веществ. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2022;(3):136–146. <https://doi.org/10.15372/FTPRI20220314>
Krasavtseva E.A., Maksimova V.V., Makarov D.V., Masloboev V.A. Removal of suspended solids from industrial wastewater. *Journal of Mining Science*. 2022;58(3):466–475. <https://doi.org/10.1134/s1062739122030140>
10. Рыбин П.А. Гибридный флотатор. Патент RU229965U1. Российская Федерация. Оpubл. 06.11.2024.
11. Неверов Е.Н., Михайлова Е.С., Тимошук И.В., Схаплок Р.Ю. Анализ проекта мобильной установки физико-химической очистки сточных вод угольных предприятий. *Ползуновский вестник*. 2024;(3):191–199. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.03.028>
Neverov E.N., Mikhaylova E.S., Timoshchuk I.V., Skhaplok R.Yu. Analysis of the project of a mobile installation of physico-chemical wastewater treatment of coal enterprises. *Polzunovskiy Vestnik*. 2024;(3):191–199. (In Russ.) <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.03.028>
12. Ксенофонтов Б.С., Козодаев А.С., Таранов Р.А., Виноградов М.С. Флотокомбайн для очистки сточных вод. *Кадры инновационного развития*. 2022;(2):49–57.
Ksenofontov B.S., Kozodaev A.S., Taranov R.A., Vinogradov M.S. Flotation machine for wastewater treatment. *Personnel Component of Innovative Development*. 2022;(2):49–57. (In Russ.)
13. Ксенофонтов Б.С. Флотокомбайн для очистки сточных вод. Патент RU218517U1. Российская Федерация. Оpubл. 29.05.2023.
14. Ксенофонтов Б.С., Козодаев А.С., Таранов Р.А., Виноградов М.С., Сенник Е.В. Инженерное оформление процессов очистки сточных вод с использованием флотокомбайнов серии КБС. *Экология и промышленность России*. 2022;26(11):4–7. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-11-4-7>
Ksenofontov B.S., Kozodaev A.S., Taranov R.A., Vinogradov M.S., Senik E.V. Engineering design of wastewater treatment processes using flotation combines of the KBS series. *Ecology and Industry of Russia*. 2022;26(11):4–7. (In Russ.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-11-4-7>

Информация об авторах

Иванова Людмила Анатольевна – кандидат технических наук, доцент кафедры техносферной безопасности, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-4103-8780>; e-mail: lyuda_ivan@mail.ru

Михайлова Екатерина Сергеевна – кандидат химических наук, директор Института нано-, био-, информационных, когнитивных и социогуманитарных технологий, доцент кафедры техносферной безопасности, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-0673-0747>; e-mail: e_s_mihaylova@mail.ru

Тимошук Ирина Вадимовна – доктор технических наук, профессор кафедры техносферной безопасности, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-1349-2812>; e-mail: irina_190978@mail.ru

Горелкина Алена Константиновна – доктор технических наук, профессор кафедры техносферной безопасности, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-3782-2521>; e-mail: alengora@yandex.ru

Иванова Вера Павловна – студент, Сибирский государственный медицинский университет, г. Томск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0008-0046-5701>; e-mail: ianova.vera@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 04.05.2025

Поступила после рецензирования: 24.06.2025

Принята к публикации: 25.06.2025

Information about the authors

Ludmila A. Ivanova – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Technosphere Safety, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-4103-8780>; e-mail: lyuda_ivan@mail.ru

Ekaterina S. Mikhaylova – Cand. Sci. (Chem.), Director, Institute of Nano-, Bio-, Information, Cognitive and Socio-Humanitarian Technologies, Associate Professor, Department of Technosphere Safety, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-0673-0747>; e-mail: e_s_mihaylova@mail.ru

Irina V. Timoshchuk – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Technosphere Safety, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-1349-2812>; e-mail: irina_190978@mail.ru

Alena K. Gorelkina – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Technosphere Safety, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-3782-2521>; e-mail: alengora@yandex.ru

Vera P. Ivanova – Student, Siberian State Medical University, Tomsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0008-0046-5701>; e-mail: ianova.vera@mail.ru

Article info

Received: 04.05.2025

Revised: 24.06.2025

Accepted: 25.06.2025