

УДК 622.793

**МЕТОДЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ
ОТ ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ**

Е. А. Красавцева^{1,2}, В. В. Максимова^{1,2}, Д. В. Макаров², В. А. Маслобоев²

¹Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики
ФИЦ “Кольский научный центр РАН”,

E-mail: vandeleur2012@yandex.ru, ул. Ферсмана, 14, 184209, г. Апатиты, Россия

²Институт проблем промышленной экологии Севера
ФИЦ “Кольский научный центр РАН”,

E-mail: d.makarov@ksc.ru, мкр. Академгородок, 14а, 184209, г. Апатиты, Россия

Представлен обзор существующих способов очистки сточных вод предприятий горнодобывающей промышленности от взвешенных веществ. Рассмотрены как уже применяемые, так и перспективные технологии очистки: механические и физико-химические. Показано, что необходимо применение комплекса методов, подбираемых для каждого конкретного горного предприятия.

Взвешенные вещества, очистка сточных вод, осветление, фильтрация, коагуляция, электрокоагуляция, флотация

DOI: 10.15372/FTPRPI20220314

Развитие горнопромышленного комплекса (ГПК) приводит к серьезному ухудшению экологической ситуации в районах добычи и обогащения полезных ископаемых [1–3]. В Мурманской области, по данным [4], за 2020 г. отраслевой сброс стоков составил около 100 млн м³. Основные загрязнителями являются взвешенные вещества, фосфаты, азот аммонийный, нефтепродукты, железо, синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ), никель, нефтепродукты. Очистка сточных вод — важная и актуальная экологическая задача предприятий ГПК [5]. Стоки горнодобывающих и перерабатывающих предприятий характеризуются высокими концентрациями и широким спектром загрязняющих веществ, значительными объемами, требующими очистки [5–8].

Загрязнение рудничных и карьерных вод взвешенными веществами связано с буровзрывными работами. Минеральные пылевые частицы образуются в процессе разрушения горных пород при бурении шпуров, непосредственно при взрыве и далее при уборке и транспортировке горной массы из забоев или карьера после проведения взрывных работ.

Повышенное содержание твердых взвесей в сбрасываемых сточных водах оказывает влияние на способность водоемов к реоксигенации, происходит изменение химизма вод за счет адсорбции на поверхности частиц органических и неорганических веществ, включая тяжелые металлы. Это

приводит к постепенной гибели водных организмов [9, 10] Стоки, вовлекаемые в оборотное водоснабжение обогатительных фабрик, могут ухудшать эффективность обогатительных процессов, в частности снижать качество получаемых концентратов [11 – 13].

Цель настоящей работы — обзор применяемых и перспективных технологий очистки стоков предприятий ГПК от взвешенных веществ, анализ отечественных и зарубежных публикаций, посвященных нормированию содержания взвешенных веществ, применению различных методов очистки сточных вод, имеющимся и перспективным технологиям.

Наиболее распространенные методы очистки промышленных сточных вод от взвешенных веществ — механические (отстаивание, фильтрование) и физико-химические (коагуляция, флокуляция, электрокоагуляция и др.).

МЕХАНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ

Механическая очистка заключается в удалении загрязняющих веществ под действием гравитационных (отстаивание), центробежных сил (центрифугирование, гидроциклоны), механического задержания примесей на решетках, ситах (процеживание) и фильтрах (фильтрование) [14]. Зачастую данные методы очистки применяются на начальном этапе обработки стоков.

Отстаивание (осветление) шахтных и карьерных вод проводят в прудах-осветлителях или отстойниках различных конструкций. Отстойники используют, как правило, на первой стадии очистки, но на многих предприятиях они являются самостоятельными и последними сооружениями, после которых стоки сбрасываются в водоемы.

Отстаивание — один из самых простых, наименее трудоемких и дешевых методов выделения из сточной воды грубодисперсных примесей (с частицами размером свыше 0.1 мкм), плотность которых отличается от плотности воды. Сооружения осветления сточных вод по характеру движения воды подразделяются на горизонтальные, вертикальные и радиальные. На горнопромышленных предприятиях рекомендуется применять горизонтальные отстойники с производительностью 15000 – 100000 м³/сут [15]. Эффективность отстаивания в горизонтальных отстойниках составляет 40 – 60 % [16].

Очистка сточных вод от взвешенных веществ *под действием центробежных сил* осуществляется в гидроциклонах (открытых или напорных), центрифугах или сепараторах [17, 18]. Принцип действия аппаратов основан на осаждении грубодисперсных частиц под действием центробежных сил, многократно превышающих гравитационные [16]. К преимуществам гидроциклонов можно отнести относительно небольшие размеры, простоту эксплуатации, отсутствие необходимости замены фильтрующих частей аппаратов [19, 20]. Реализация данного метода очистки сточных вод на промплощадках предприятий ГПК ограничивается большими объемами сточных вод, требующих очистки, и наличием в стоках тонкодисперсных частиц (менее 0.1 мм), не удаляемых с нужной эффективностью [21].

Фильтрование. Процесс фильтрования как один из оптимальных способов удаления взвешенных веществ из сточных вод может применяться в виде одной из ступеней сложной схемы очистки стоков, либо в качестве самостоятельного очистного сооружения в зависимости от концентрации загрязнений в исходной воде [16, 22]. Известны барабанные, сетчатые, дисковые фильтры и др.

По скорости фильтрования (количество очищаемой воды за единицу времени на площадь поверхности фильтрующего слоя) можно выделить медленные (скорость фильтрования < 2 м/ч), скоростные (скорость фильтрования 2 – 15 м/ч) и сверхскоростные (скорость фильтрования > 25 м/ч) фильтры [23]. На практике широко используются барабанные сетки и микрофильтры, позволяющие удалять до 60 % твердых взвешенных веществ [16].

Фильтрация с использованием безнапорных и напорных механических фильтров применяется для глубокой очистки сточных вод после других методов (например, осветления). Процесс может быть осуществлен через зернистую загрузку и через фильтрующие перегородки. Фильтрующий слой, основной элемент конструкции фильтра, выполняется из отсортированного зернистого материала, чаще всего из кварцевого песка крупностью $-2.0 + 0.5$ мм. Эффективным для предприятий в случае отсутствия соответствующих очистных сооружений может быть применение механических геохимических барьеров [24–27].

К недостаткам фильтрации как метода очистки сточных вод можно отнести образование значительных объемов загрязненных вод после промывки либо регенерации фильтрующего слоя, относительную сложность конструкции [23]. В целом механические методы очистки — недорогие в исполнении, однако их применение не всегда позволяет достичь требуемых показателей [16, 28].

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ

Физико-химические методы включают в себя различные физико-химические процессы: коагуляцию, флокуляцию, флотацию, электрокоагуляцию, обратный осмос и др. [14].

Коагуляция/флокуляция. С целью повышения эффективности отстаивания без изменения конструктивных параметров отстойников вводят предварительную реагентную обработку воды коагулянтами и/или флокулянтами [29]. Коагуляция позволяет укрупнить дисперсные частицы в результате их взаимодействия и объединения в агрегаты с увеличением размера частиц от 0.0001 до 10 мкм и более [23].

Выделяют два типа коагулянтов: реагенты органического происхождения и неорганические вещества [30]. Основным составляющим органических реагентов является полиоксихлорид алюминия. Органические коагулянты имеют ряд неоспоримых достоинств: быстро растворяются в воде, обеспечивают высокую степень очистки при небольшом расходе, эффективны даже в холодной воде, для обработанной коагулянтами воды характерны низкие концентрации солей и алюминия, исключающие вторичное загрязнение.

К неорганическим реагентам относятся диоксид титана и сульфат железа или алюминия. Диоксид титана — один из самых дорогих коагулянтов, способных очистить сильно загрязненную воду до состояния питьевой. К преимуществам относят минимальный расход реагента в сравнении с другими коагулянтами и ускоренную обработку среды.

Традиционно в практике очистки сточных вод горнопромышленных предприятий используют соединения алюминия (сульфат алюминия $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) или железа (сульфат железа $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, хлорид железа FeCl_3) [31]. Сульфат алюминия отличается легкостью применения, отсутствием необходимости длительного отстаивания после разведения в жидкости, однако отмечается повышенная чувствительность к уровню pH: при значении водородного показателя более 7.5 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ неэффективен.

В целом недостатками коагуляционной очистки сточных вод являются: необходимость строгого расчета дозировки реагентов, потребность в дополнительной фильтрации из-за образования большого количества вторичных отходов, зависимость эффективности обработки сточных вод от pH, в частности при использовании сульфата алюминия.

Действие коагулянтов возможно интенсифицировать добавлением в очищаемую воду высокомолекулярных соединений — флокулянтов. При флокуляции агрегация происходит как при непосредственном контакте частиц, так и в результате взаимодействия молекул флокулянта, адсорбированного на частицах, что способствует увеличению размеров образующихся хлопьев и их последующему удалению. Флокуляция коллоидных частиц позволяет получать меньший объем осадка с более плотной структурой [32].

По типу происхождения флокулянты классифицируются следующим образом [33]:

- органические (природные) — гуаровые смолы, крахмал и декстрин, альгинат натрия и др.;
- неорганические — кремниевая кислота, образующая тяжелые прочные хлопья. Особенно эффективна в очистке сточных вод от гидроксидов металлов — алюминия, железа, магния;
- синтетические — высокомолекулярные (молекулярная масса варьирует от тысяч до миллионов) соединения, легко растворимые в воде.

Выделяют три группы флокулянтов по электрическому заряду:

- анионные флокулянты особенно эффективны для щелочных и нейтральных суспензий, содержащих неорганические вещества (минералы и т.д.). Анионные виды флокулянтов присутствуют в линейках многих торговых марок Magnafloc, Superfloc, Flopam. Отдельно можно выделить Magnafloc-10, разработанный специально для очистки сточных вод, поступающих от горнодобывающих и горноперерабатывающих предприятий;
- катионные флокулянты эффективны в суспензиях, имеющих низкий уровень pH среды и содержащих органические вещества. Лидером в этой нише химических реагентов можно назвать Zetag немецкой компании BASF, выпускающей флокулянты только катионного типа. Также катионные флокулянты присутствуют в линейках Magnafloc и Kemira (Superfloc);
- неионогенные флокулянты — Magnafloc, Superfloc, Flopam, Praestol, Fennopol — абсолютно универсальны, поэтому представляют больший интерес для металлургической и горнодобывающей промышленности.

Конкретные флокулянты подбираются в зависимости от типа загрязнения воды. Кроме того, очень важно учитывать тип применяемого до этого коагулянта. Обычно коагуляцию совмещают с флокуляцией из-за относительно невысокой эффективности осветления стоков внесением одних лишь флокулянтов (прямая флокуляция) [34].

Наряду с традиционными реагентами активно проводятся исследования, посвященные поиску эффективных природных коагулянтов. Так, в [35] оценена перспектива применения коры эвкалипта совместно с сульфатом алюминия. Сделаны выводы о положительном влиянии внесенной добавки, позволившей снизить расход традиционного коагулянта на 11–15 %, а также определены оптимальные условия для максимально полного удаления взвесей из сточных вод.

Ряд работ освещает результаты лабораторных исследований использования в качестве комплексных реагентов соединений, получаемых из отходов либо побочных товарных продуктов горнопромышленного комплекса. Различные способы получения алюмокремниевого коагулянта-флокулянта из нефелинсодержащих отходов обогащения руд представлены в [36–38].

Работа [39] посвящена очистке сточных вод различного происхождения от взвешенных частиц комплексным реагентом, получаемым из сфенового концентрата. В его состав наряду с соединениями алюминия или железа входили продукты гидролиза соединений титана. Установлено, что комплексные реагенты эффективнее очищают сточные воды (на 10–15 % в сравнении с чистыми реагентами), при этом очистка сопровождается интенсификацией процесса фильтрации (на 15–25 %).

Важной задачей является и подбор оптимального количества вносимых реагентов. Повышенный расход, например, флокулянтов, приводит к увеличению количества образующегося осадка, негативно сказываясь на мутности очищаемой воды, а также к повышенному содержанию реагентов в сбрасываемых стоках, влияя на экономическую составляющую процесса очистки сточных вод [34].

Эффективность очистки сточных вод данной группой методов существенно зависит от pH и температуры сточной воды, времени года и т. д. [39, 40]. В частности, соединения алюминия малоэффективны в холодной воде или в слабо- и сильнокислых водных растворах (при pH ниже 6), а при pH выше 8 снижение эффективности очистки сопровождается образованием растворимых комплексов алюминия и повышением концентрации растворенного алюминия в обрабатываемой воде [41]. Сильная коррозионная активность растворов железосодержащих коагулянтов, способность образовывать комплексные соединения с органическими веществами, образующиеся труднофильтруемые осадки также ограничивают применение традиционных реагентов [42].

Флотация. Флотационная очистка сточных вод основана на удалении загрязняющих веществ с помощью пузырьков воздуха, образующих пленку или пенный слой при всплывании и захвате частиц примесей, которая впоследствии снимается специальными пеносборными механизмами [23].

Флотационная очистка промышленных стоков представляет большой интерес в связи с универсальностью метода, его высокой производительностью и эффективностью удаления тонкодисперсных примесей [43]. Тонкодисперсные взвеси размером менее 100 мкм и нерастворимые частицы, образующие с водой устойчивые, не расслаивающиеся и не коагулирующие в течение значительного времени эмульсии, являются широко распространенными и в то же время трудноудаляемыми загрязнителями промышленных сточных вод [44]. Достоинства флотационного метода — высокая степень очистки от нерастворимых примесей и взвешенных веществ при незначительном времени проведения процесса (в сравнении с гравитационными методами), сопутствующая аэрация, снижение количества ПАВ и микроорганизмов [45].

Для очистки промышленных сточных вод применяются различные виды флотации [46]: с выделением растворенных газов (подразделяется по способу создания пересыщенного раствора газа в воде на напорную, эрлифтную и вакуумную); с механическим диспергированием воздуха (применение импеллерных, пневматических и безнапорных установок); барботажная (с подачей воздуха через пористые материалы); электрофлотация (с выделением пузырьков газа из раствора в результате прохождения через него электрического тока), биологическая и химическая флотации.

На эффективность флотации значимое влияние оказывают гидрофобность флотируемых частиц; размер, стабильность и равномерность распределения пузырьков газа (достигается применением флотореагентов и подбором оборудования); образование стабильных флотокомплексов [47]. Для процессов очистки производственных сточных вод наиболее изученные и применяемые — напорная, ионная и электрофлотация [48].

Технология электрофлотации осуществляется с применением катода из неокисляющегося материала и анода, выполненного чаще всего из железа или алюминия [49]. При электролизе пакеты электродов формируют небольшие пузырьки, которые прикрепляются к частицам взвешенных веществ в воде. Когда они всплывают на поверхность, происходит их удаление с использованием насосов или различных механических сборных устройств. Сложностью в осуществлении метода является необходимость обеспечения равномерности и размера получаемых пузырьков, что требует тщательной регулировки подаваемого напряжения на электроды. Применение метода ограничено необходимостью непрерывного техобслуживания с целью контроля содержания формирующихся на электродах слоев гидроокисей и окислов железа и алюминия. Неравномерный износ электродов обуславливает необходимость замены электродов до наступления полного износа [50].

Мембранные технологии, обратный осмос. Инновационные технологии в очистке сточных вод, в частности ультрафильтрация, нанофильтрация, обратный осмос, зарекомендовали себя как эффективные методы очистки сточных вод [40, 51]. Мембранная очистка позволяет снизить концентрации солей, органических соединений и растворенных ионов [52]. Нанофильтрационные мембраны требуют меньшего давления, чем обратный осмос, что приводит к снижению энергопотребления [53]. Размер пор мембран для ультрафильтрации — 0.01 мкм, нанофильтрации — 0.001 мкм, обратного осмоса — 0.0001 мкм [54].

Мембранные технологии целесообразно применять на этапе доочистки, поскольку большое количество взвесей может отрицательно повлиять на эффективность процесса, вызывая загрязнение мембраны, снижение потока и, как следствие, увеличение затрат энергии на повышение давления в системе [55, 56].

Электрохимическая коагуляция. В последнее время из-за ограничений экологических норм и законов исследователи активно работают над системами электрохимической очистки, являющимися перспективными технологиями для предотвращения или снижения загрязнения окружающей среды [57]. В ряде случаев целесообразно применение электрохимической коагуляции [58, 59].

Электрохимическая коагуляция — метод очистки сточных вод, основанный на растворении материала электрода (анода), производящего ионы металлов, которые действуют как коагулянты в водном растворе [60].

Процесс электрокоагуляции, а также процесс электрокоагуляции в сочетании с флотацией могут эффективно использоваться для очистки сточных вод, содержащих взвешенные вещества, органику, тяжелые металлы и другие загрязнители [58, 59]. Дополнительным преимуществом метода электрокоагуляции является то, что по сравнению с химическим осаждением он характеризуется меньшим количеством образующегося осадка, отсутствием химической обработки и дополнительного загрязнения.

Использование метода электрохимической коагуляции с последующей фильтрацией на механических и сорбционных фильтрах для очистки шахтных вод рудника “Северный” обеспечило высокую эффективность очистки шахтных вод АО “Кольская ГМК”. По отдельным параметрам — медь, никель, соединения азота, взвешенные вещества, цветность, биохимическое потребление кислорода, нефтепродукты — достигались значения, соответствующие ПДК (либо близкие к ПДК) для рыбохозяйственных водоемов [61].

Безреагентные методы очистки. В настоящее время увеличивается применение новых безреагентных методов для снижения содержания взвешенных веществ в сточных водах, в основном в качестве одного из этапов в комплексной технологии очистки. Помимо преимуществ: простоты технологического исполнения и отсутствия необходимости применения реагентов, данные методы характеризуются высоким удельным расходом электроэнергии.

В [62] приведен способ очистки сточных вод от тонких взвешенных веществ путем пропуска стоков через электропроводящий гранулированный материал, например железные опилки, с пропусканием через систему постоянного электрического тока. Переходящие в раствор ионы железа коагулируют тонкие взвешенные вещества, обеспечивая высокую степень очистки. Тем не менее данный способ изменяет химический состав раствора, что недопустимо для многих технологических процессов и может повлечь за собой превышение уровня вторичного загрязнения.

Высокоградиентными магнитными сепараторами проводится очистка вод, содержащих магнитные частицы, в частности вод предприятий теплоэнергетики, производства стали и проката, механической обработки металлов. Обработка вод электромагнитными полями позволяет увеличить скорость коагуляции с выпадением осадка, снизить содержание солей жесткости,

ускорить процесс кристаллизации накипеобразующих соединений. В [63] обосновано применение обработки постоянным электрическим током для осветления промышленных стоков. Возможность использования электроимпульсной обработки и, в частности, электровзрывной обработки на ряде предприятий Красноярского края рассмотрена в [64]. Импульсный электрический разряд, сопровождающийся резким увеличением давления, воздействием мощных электромагнитных и акустических полей, приводит к комплексу физико-химических процессов, в том числе к осаждению взвешенных веществ и химических соединений, улучшению коагуляции, разложению органических примесей.

К новым направлениям можно отнести гидроакустическую и кавитационную обработку, позволяющую снижать содержание взвешенных веществ и соледержания в обрабатываемой воде [65]. Обработка промышленных вод проводится в специальных резервуарах с обеспечением акустической кавитации путем одновременного воздействия на водную среду разнонаправленных источников ультразвуковых колебаний различной частоты.

В [66] предложен безреагентный способ очистки сточных вод от взвешенных веществ и коллоидных частиц с размером частиц менее 0.5 мкм, тяжелых металлов и солей. Удаление крупно-, средне- и тонкодисперсных взвешенных веществ осуществляется многостадийно с использованием методов акустической коагуляции и последующим гравитационным осаждением взвешенных веществ. Получаемый осадок подвергается акустическому уплотнению с применением гидроакустических волн звукового и ультразвукового диапазонов частот. Акустическая коагуляция выполняется путем механического присоединения более подвижных (тонких) взвесей к менее подвижным (крупным) с их последующим объединением в один устойчивый агрегат. Применение гидроакустических сигналов позволяет провести дегазацию сточных вод путем искусственного роста и схлопывания пузырьков газа, находившегося в свободном либо растворенном состоянии, и виброакустическое уплотнение осадка путем ожигения слоя и механического присоединения частиц осадка друг к другу с одновременным вытеснением воды из слоя. Гидроакустический метод позволяет уменьшить объем получаемого осадка в 3–4 раза по сравнению с методом гравитационного уплотнения. Технология, предложенная в [66], опробована на промышленных участках АО «Севералмаз» (Россия, Архангельская обл.), где достигалось последовательное снижение содержания взвешенных веществ с 1.740 до 0.003 г/л (эффективность очистки 99.74 %).

Другой метод извлечения сапонитсодержащего продукта и обесшламливания оборотных вод предприятий АО «Севералмаз» предложен в [67, 68]. Его сущность заключается в использовании электрофоретического эффекта закрепления отрицательно заряженных тонкодисперсных частиц сапонита на аноде и электроосмотического движения и выделения осветленной воды на катоде. Метод позволяет повысить эффективность процессов извлечения алмазов из руд и одновременно решить экологическую проблему за счет организации замкнутого водооборота. В промышленных условиях разработан и испытан электрохимический сепаратор для эффективного обесшламливания сапонитсодержащих вод предприятий АО «Севералмаз» с концентрацией твердой фазы до 250 г/дм³.

ВЫВОДЫ

Существует достаточно большое количество разработанных методов и технологий — как традиционных, так и новаторских, — но единого универсального метода нет. Очистка сточных вод горнопромышленных предприятий остается актуальной задачей.

Характерными загрязнениями являются повышенное содержание взвешенных веществ, высокая минерализация, содержание специфических растворенных веществ, металлов и их комплексов, токсичных органических компонентов (флотореагентов, коагулянтов и флокулянтов, осадков, полученных на предыдущих этапах очистки и др.). Оптимальные методы обработки должны подбираться индивидуально в соответствии со спецификой исследуемого объекта. Наибольшую эффективность показывают комбинированные технологии, обеспечивающие сочетание современных методов механической, физико-химической и биотехнологической очистки.

Закономерно возрастает доля безреагентных методов очистки, основанных на использовании физическо-химических воздействий на водные системы. Наряду с применением биотехнологий, данные методы обеспечивают низкую стоимость обработки, отсутствие необходимости внесения дополнительных реагентов и компактность установок очистки. Экологически и экономически целесообразны первичная очистка стоков на фильтрах с зернистой загрузкой в безреагентном режиме, позволяющая обеспечить быстрое снижение содержания взвесей, и последующая доочистка стоков с применением различных мембранных методов, гальвано- и электрокоагуляции, гидроакустических и кавитационных методов, более требовательных к содержанию взвесей в исходной воде.

Лучшие результаты достигаются применением комплекса методов, подбираемых для каждого конкретного случая. Методы очистки сточных вод совершенствуются с развитием технической базы и научных разработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Askaer L., Schmidt L. B., Elberling B., Asmund G., and Jónsdóttir I. S. Environmental impact on an Arctic soil – plant system resulting from metals released from coal mine waste in Svalbard (78° N), Water, air, and soil pollut., 2008, Vol. 195, No. 1. — P. 99 – 114.
2. Krasavtseva E., Maksimova V., and Makarov D. Conditions affecting the release of heavy and rare earth metals from the mine tailings Kola Subarctic, Toxics, 2021, Vol. 9, No. 7. — P. 163.
3. Lindsay M. B., Moncur M. C., Bain J. G., Jambor J. L., Ptacek C. J., and Blowes D. W. Geochemical and mineralogical aspects of sulfide mine tailings, Appl. Geochem., 2015, Vol. 57. — P. 157 – 177.
4. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2020 г. [Электронный ресурс] / Министерство природных ресурсов, экологии и рыбного хозяйства Мурманской области, 2021. — 176 с. URL: <https://gov-murman.ru/region/environmentstate>.
5. Younger P. L., Banwart S. A., and Hedin R. S. Mine Water: hydrology, pollution, remediation, Kluwer Academic Press: Dordrecht, Netherlands, 2002. — 442 p.
6. Wolkersdorfer C., Lopes D. V., and Nariyan E. Intelligent mine water treatment — recent international developments, Sanierte Bergbaustandorte im Spannungsfeld zwischen Nachsorge und Nachnutzung, WISSYM, 2015. — P. 63 – 68.
7. Banks D., Younger P. L., Arnesen R. T., Iversen E. R., and Banks S. B. Mine-water chemistry: the good, the bad and the ugly, Environ. Geol., 1997, Vol. 32, No. 3. — P. 157 – 174.
8. Хенце М., Армоэс П., Ля-Кур-Янсен Й., Арван Э. Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы. — М.: Мир, 2004. — 480 с.
9. Hodges A., Fica Z., Wanlass J., VanDarlin J., and Sims R. Nutrient and suspended solids removal from petrochemical wastewater via microalgal biofilm cultivation, Chemosphere, 2017, Vol. 174. — P. 46 – 48.
10. Зиновьев Е. А., Китаев А. Б. О воздействии взвешенных частиц на гидрофауну // Изв. СамНЦ РАН. — 2015. — Т. 17. — № 5. — С. 283 – 288.

11. **Boujounoui K., Abidi A., Bacaoui A., Elamari K., and Yaacoubi A.** Effect of water quality on the performance of the galena and blend flotation: case of Draa Sfar complex sulphide ore, Morocco, Moroccan J. Chem., 2019, Vol. 7, No. 2. — P. 337–345.
12. **Liu W., Moran C., and Vink S.** A review of the effect of water quality on flotation, Miner. Eng., 2013, Vol. 53. — P. 91–100.
13. **Muzinda I. and Schreithofer N.** Water quality effects on flotation: Impacts and control of residual xanthates, Miner. Eng., 2018, Vol. 125. — P. 34–41.
14. **Морева Ю. Л., Чернобережский Ю. М., Лоренцсон А. В.** Теоретические основы очистки и обезвреживания выбросов и сбросов. Ч. 1. — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2018. — 82 с.
15. **Шлекова И. Ю., Кныш А. И.** Механическая очистка сточных вод. — Омск, 2020. — 82 с.
16. **Вертинский А. П.** Современные методы очистки сточных вод: особенности применения и проблематика // Инновации и инвестиции. — 2019. — № 1. — С. 175–182.
17. **Малиновская Т. А., Кобринский И. А., Кирсанов О. С., Рейнфарт В. В.** Разделение суспензий в химической промышленности. — М.: Химия, 1983. — С. 108–111.
18. **Ланина Т. Д., Прохоренко Н. Н., Селиванова Е. С.** Очистка нефтесодержащих вод в поле центробежных сил // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. — 2012. — № 7. — С. 33–38.
19. **Старостин А. Г., Федотова О. А., Кобелева А. Р.** Очистка сточных вод от мелкодисперсных частиц на гидроциклоне // Вестн. ПНИПУ. Хим. технология и биотехнология. — 2020. — № 1. — С. 99–112.
20. **Dueck J., Farghaly M., and Neesse Th.** The theoretical partition curve of the hydrocyclone, Miner. Eng., 2014, Vol. 62. — P. 25–30.
21. **Курников А. С., Распопов А. В.** Очистка сточных вод в гидроциклонах // Научные проблемы водного транспорта. — 2003. — № 5. — С. 27–33.
22. **Навесов Ш., Еримбетова А., Изтлеуов Г., Байбатырова Б., Досбаева А., Аскербекова А.** Исследование процесса фильтрования сточных вод машиностроительного производства // Актуальные научные исследования в современном мире. — 2017. — № 1–3. — С. 138–142.
23. **Зуева С. Б.** Экозащитные технологии систем водоотведения предприятий пищевой промышленности. — Воронеж: ВГУ, 2011. — 332 с.
24. **Maximovich N. and Khayrulina E.** Artificial geochemical barriers for environmental improvement in a coal basin region, Environ. Earth Sci., 2014, Vol. 72, No. 6. — P. 1915–1924.
25. **Максимович Н. Г., Хайрулина Е. А.** Геохимические барьеры и охрана окружающей среды. — Пермь: ПГУ, 2011. — 248 с.
26. **Chanturiya V., Masloboev V., Makarov D., Nesterov D., Bajurova Yu., Svetlov A., and Men'shikov Yu.** Geochemical barriers for environment protection and recovery of nonferrous metals, J. Environ. Sci. Health, Part A, 2014, Vol. 49, No. 12. — P. 1409–1415.
27. **Baltrėnaitė E., Lietuvninkas A., and Baltrėnas P.** Biogeochemical and engineered barriers for preventing spread of contaminants, Env. Sci. Pollut. Res., 2018, Vol. 25, No. 6. — P. 5254–5268.
28. **Веженкова И. В., Дружинина К. В., Зайцева А. А.** Методы очистки питьевой воды / Материалы XX молодежной междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых “Наука XXI в.: новый подход”. — СПб., 2018. — С. 5–10.
29. **Гетманцев С. В., Нечаев И. А., Гандурина Л. В.** Очистка производственных сточных вод коагулянтами и флокулянтами. — М.: АСВ, 2008. — 271 с.
30. **Качалова Г. С.** Коагуляционно-сорбционная очистка сточных вод // Вода и экология: проблемы и решения. — 2019. — № 2. — С. 32–39.
31. **Butler E., Hung Y. T., Yeh R. Y. L., Suleiman A., and Ahmad M.** Electrocoagulation in wastewater treatment, Water, 2011, Vol. 3, No. 2. — P. 495–525.

32. **Chaiwong N. and Nuntiya A.** Influence of pH, electrolytes and polymers on flocculation of kaolin particle, *Chiang Mai. J. Sci.*, 2008, Vol. 35. — P. 11–16.
33. **Гандурина Л. В.** Характеристики синтетических флокулянтов, применяемых для очистки сточных вод // *Вода и экология: проблемы и решения.* — 2006. — № 1. — С. 40–52.
34. **Park J., Oh C., Han Y., and Ji S.** Optimizing the addition of flocculants for recycling mineral-processing wastewater, *Geosystem Eng.*, 2016, Vol. 19, No. 2. — P. 83–88.
35. **Ali N., Zaheer S., Khan W. A., and Malik S. R.** Removal of suspended solids and turbidity from wastewater using natural & primary coagulant, *J. Pakistan Inst. Chem. Eng.*, 2017, Vol. 45, No. 2.
36. **Веляев Ю. О., Майоров Д. В., Захаров К. В.** Усовершенствование технологии получения алюмокремниевых коагулянта-флокулянта на основе сернокислотного вскрытия нефелина // *Химическая технология.* — 2011. — Т. 12. — № 10. — С. 614–620.
37. **Пат. 2588535 РФ.** Способ получения алюминиевого флокулянта-коагулянта / Н. Е. Кручинина, Е. Н. Кузин // *Опубл. в БИ.* — 2016. — № 18.
38. **Волкова М. А., Недугов А. Н.** Нефелиновые флокулянты-коагулянты // *Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П. Н. Чирвинского.* — 2016. — № 19. — С. 342–345.
39. **Кузин Е. Н.** Комплексные коагулянты в процессах очистки сточных вод от взвешенных веществ // *Тр. КНЦ РАН.* — 2019. — Т. 10. — № 1–3. — С. 164–168.
40. **Wang Y. and Zhang J.** Experimental investigation on removal of suspended solids from wastewater produced in the processing of carclazyte catalyst, *Desalination*, 2009, Vol. 244, No. 1–3. — P. 72–79.
41. **Бабенков Е. Д.** Очистка воды коагулянтами. — М.: Наука, 1997. — 347 с.
42. **Виноградов С. С.** Экологически безопасное гальваническое производство. — М.: Глобус, 2002. — 352 с.
43. **Zubareva G. I.** Flotation in technological schemes of industrial wastewater treatment, *Construction and Geotechnics*, 2019, Vol. 10, No. 4. — P. 67–77.
44. **Walz J. Y.** Colloidal particles at liquid interfaces edited by Bernard P. Binks and Tommy S. Horozov (University of Hull, U.K.), *J. Am. Chem. Soc.*, 2007, Vol. 129, No. 13. — P. 4106–4107.
45. **Алексеев Д. В., Николаев Н. А., Лаптев А. Г.** Комплексная очистка стоков промышленных предприятий методом струйной флотации. — Казань: КГТУ, 2005. — 156 с.
46. **Алексеев Е. В.** Основы технологии очистки сточных вод флотацией. — М.: АСВ. — 2009. — 137 с.
47. **Crini G. and Lichtfouse E.** Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment, *Environ. Chem. Lett.*, 2019, Vol. 17, No. 1. — P. 145–155.
48. **Кочетов Л. М., Сажин Б. С., Сажин В. Б., Попов И. А., Хазанов Г. И., Бутков А. С.** Применение напорной флотации при очистке стоков // *Успехи в химии и хим. технологии.* — 2010. — Т. 24. — № 3. — С. 113–117.
49. **Пат. 2268860 РФ.** Способ очистки природных и сточных вод электрофлотацией / В. Ф. Литвинов, С. И. Кулакова, С. Г. Кулакова // *Опубл. в БИ.* — 2006. — № 3.
50. **Пат. 2747663 РФ.** Система и способ очистки сточных вод с помощью усовершенствованной электрофлотации / Д. Касбиэр, Р. Бария, С. Патель, Р. Матусек, Т. Ривз // *Опубл. в БИ.* — 2021. — № 14.
51. **Bodzek M. and Konieczny K.** Comparison of various membrane types and module configurations in the treatment of natural water by means of low-pressure membrane methods, *Sep. Purif. Technol.*, 1998, Vol. 14, No. 1–3. — P. 69–78.
52. **Adham S. S., Snoeyink V. L., Clark M. M., and Bersillon J. L.** Predicting and verifying organics removal by PAC in an ultrafiltration system, *J. Am. Water Works Assoc.*, 1991, Vol. 83, No. 12. — P. 81–91.
53. **Agboola O., Mokrani T., Sadiku E. R., Kolesnikov A., Olukunle O. I., and Maree J. P.** Characterization of two nanofiltration membranes for the separation of ions from acid mine water, *Mine Water Environ.*, 2017, Vol. 36, No. 3. — P. 401–408.

54. Lin S. W., Pérez Sicairos S., and Félix Navarro R. M. Preparation, characterization and salt rejection of negatively charged polyamide nanofiltration membranes, *J. Mexican Chem. Soc.*, 2007, Vol. 51, No. 3. — P. 129–135.
55. Schäfer A. I., Fane A. G., and Waite T. D. Fouling effects on rejection in the membrane filtration of natural waters, *Desalination*, 2000, Vol. 131, No. 1–3. — P. 215–224.
56. Jarusutthirak C., Amy G., and Croué J. P. Fouling characteristics of wastewater effluent organic matter (EfOM) isolates on NF and UF membranes, *Desalination*, 2002, Vol. 145, No. 1–3. — P. 247–255.
57. Asfaha Y. G., Tekile A. K., and Zewge F. Hybrid process of electrocoagulation and electrooxidation system for wastewater treatment: A review, *Cleaner Eng. Technol.*, 2021, Vol. 4. — P. 100261.
58. Chen G. Electrochemical technologies in wastewater treatment, *Sep. Purif. Technol.*, 2004, Vol. 38, No. 1, P. 11–41.
59. Kuokkanen V., Kuokkanen T., Rämö J., and Lassi U. Recent applications of electrocoagulation in treatment of water and waste-water — A review, *Green Sustainable Chem.*, 2013, Vol. 3, No. 2. — P. 89–121.
60. Holt P. K., Barton G. W., and Mitchell C. A. The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology, *Chemosphere*, 2005, Vol. 59, No. 3. — P. 355–367.
61. Светлов А. В., Миненко В. Г., Самусев А. Л., Салахов Е. М. Очистка шахтных вод рудника “Северный” АО “Кольская ГМК” методом электрохимической коагуляции // *Цв. металлы*. — 2019. — № 11. — С. 52–56.
62. Пат. 2038319 РФ. Способ очистки растворов от взвешенных частиц / Г. П. Федотов, В. А. Кравцов, А. Д. Уваров, В. М. Зинченко, В. Г. Буткеев, Н. Н. Блохин, В. А. Аваргин // *Опубл. в БИ*. — 1995.
63. Пат. 2031857 РФ. Способ осветления воды / Б. М. Стефанюк // *Опубл. в БИ*. — 1995. — № 9.
64. Коростовенко В. В., Гронь В. А., Шахрай С. Г., Капличенко Н. М., Галайко А. В. Применение электроимпульсного метода очистки сточных вод угольных месторождений // *Современные наукоемкие технологии*. — 2013. — № 10-1. — С. 164–169.
65. Пат. 2467956 РФ. Способ очистки водной среды / П. А. Гаврилин, В. С. Шибуня, В. В. Пучков, Р. Г. Саруханов // *Опубл. в БИ*. — 2012. — № 33.
66. Пат. 2615398 РФ. Способ безреагентной очистки сточных вод от взвешенных веществ, тяжелых металлов и солей / С. А. Бахарев // *Опубл. в БИ*. — 2017. — № 7.
67. Миненко В. Г. Обоснование и разработка электрохимического метода извлечения сапонита из оборотных вод // *ФТПРПИ*. — 2014. — № 3. — С. 180–186.
68. Чантурия В. А., Миненко В. Г., Самусев А. Л., Тимофеев А. С., Островская Г. Х. Электрохимическая сепарация сапонитсодержащих вод предприятий ОАО “Севералмаз” // *Обогащение руд*. — 2014. — № 1. — С. 49–52.

Поступила в редакцию 15/II 2022

После доработки 05/V 2022

Принята к публикации 06/V 2022