

Научная статья

Original article

УДК 628.31

doi: 10.55186/2413046X_2022_7_11_637

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ НИТРАТОВ
ANALYSIS OF NITRATE REMOVAL METHODS FROM WASTEWATER



Работа выполнена в рамках КНТП полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в области разведки и добычи твердых 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» распоряжение правительства от 11.05.2022, N1144-р, № соглашения 075-15-2022-1201

Михайлова Екатерина Сергеевна, канд. хим. наук, начальник управления по реализации КНТП, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет», e_s_mihaylova@mail.ru

Гармашов Сергей Юрьевич, канд. техн. наук, доцент высшей аграрной школы, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия», sergei_garmashov@mail.ru

Mikhailova Ekaterina Sergeevna, Ph.D. chem. Sci., Head of the Department for the Implementation of the ISTP, Kemerovo State University, e_s_mihaylova@mail.ru

Garmashov Sergei Yurievich, Ph.D. tech Sci., Associate Professor of Higher Agrarian School, Kuzbass state agricultural academy, sergei_garmashov@mail.ru

Аннотация. В настоящее время большое количество сточных вод, содержащих повышенные концентрации нитратов, сбрасываются в естественные водоемы. Высокие концентрации нитратов имеют негативные последствия для здоровья человека, пагубно влияют на растительный и животный мир. Цель данной работы состояла в проведении анализа методов очистки сточных вод от нитратов. Объектами исследования являлись научные публикации российских и зарубежных авторов, касающиеся методов очистки сточных вод от нитратов. В системе PubMed был проведен поиск исследований, опубликованных в период 1990–2022 гг. по изучаемой теме. Основным методом исследований служило обобщение. В результате проведенных исследований установлено, что существует несколько методов снижения количества нитратов в сточных водах: биологическая очистка, обратный осмос, электродиализ, использование ионообменников. Описаны преимущества и недостатки представленных методов, их производительность и стоимость. Сделаны выводы об индивидуальном подборе метода очистки сточных вод от нитратов или комбинации этих методов в каждом конкретном случае, в зависимости от концентрации нитратов и других параметров сточных и очищенных вод.

Abstract. Currently, a large amount of wastewater containing elevated concentrations of nitrates is discharged into natural water bodies. High concentrations of nitrates have negative consequences for human health, adversely affect the flora and fauna. The purpose of this work was to analyze the removal methods of nitrates from wastewater. The objects of the study were scientific publications of Russian and foreign authors concerning the methods of nitrate removal from wastewater. PubMed was searched for studies published between 1990 and 2022 on the topic under study. Generalization served as the main research method. As a result of the research, it was found that there are several methods for reducing the amount of nitrates in wastewater: biological treatment,

reverse osmosis, electrodialysis and the use of ion exchangers. The advantages and disadvantages of the presented methods, their performance and cost are described. Conclusions are drawn about the individual selection of a method of nitrate removal from wastewater or a combination of these methods in each case, depending on the concentration of nitrates and other parameters of wastewater and treated water.

Ключевые слова: сточные воды, биологическая очистка, обратный осмос, электродиализ, ионообменники, нитраты

Keywords: wastewater, biological treatment, reverse osmosis, electrodialysis, ion exchangers, nitrates

Введение

Увеличение концентрации нитратов в подземных водах наблюдается во всем мире. Хотя в источниках воды концентрация азота может повышаться по нескольким причинам, основным источником загрязнения нитратами является деятельность человека [1, 2]. Нитраты в водоемы могут поступать в результате интенсивного ведения сельского хозяйства, особенно в результате использования азотных удобрений, а также сбросов недостаточно очищенных или неочищенных сточных вод и отсутствия централизованной системы сбора и очистки бытовых сточных вод в населенных пунктах, где имеются централизованные системы питьевого водоснабжения [1]. Интенсивное сельское хозяйство считается основной причиной загрязнения грунтовых вод азотом [3].

Поскольку спрос на продовольствие растет, а принцип севооборота не является устойчивым, и почва истощается, фермеры активно добавляют в нее удобрения на основе нитратов [4]. При правильном обращении азот не угрожает здоровью человека и интенсифицирует сельскохозяйственное производство. Однако, если количество азота, вносимого в почву, больше, чем нужно растениям, избыточный азот может просачиваться в подземные воды, загрязняя их [2].

Во многих странах Европы в районах интенсивного земледелия, отмечены высокие концентрации нитратов в воде [5]. Подсчитано, что только 40-60% всего количества азотных удобрений используется растениями, остальные попадают в водоемы, грунтовые воды и другие источники воды [3].

Наличие нитратов в питьевой воде может иметь негативные последствия для здоровья человека [6]. При взаимодействии с бактериальной флорой и слюной нитраты могут превращаться в нитриты, вызывающие метгемоглобинемию. Нитраты могут образовывать такие соединения, как нитрозамины и нитрозамиды, соединения с канцерогенным потенциалом [4].

Если азот или нитраты превращаются в нитриты в организме человека, это может вызвать две химические реакции, которые приводят к проблемам со здоровьем: возникновение метгемоглобемии, особенно у детей в возрасте до одного года, и образование потенциально канцерогенных нитрозаминов и нитрозамидов [7].

Известно, что новорожденные дети не имеют способности взрослых превращать метгемоглобин обратно в гемоглобин. Когда концентрация метгемоглобина достигает значения 5-10%, может появляться вялость, удушье и посинение кожи – «синдром голубого ребенка». Аноксия и смерть могут наступить при высоких концентрациях нитритов или нитратов [4-6].

Рекомендуемый уровень иона аммония, по данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ, 2011 г.), составляет 50 мг/л [6, 7, 10]. Максимально допустимый предел содержания нитратов в питьевой воде – 10 мг N/л [10-12].

Со временем было разработано несколько методов снижения концентрации нитратов в сточных водах [13]. К ним относятся:

- биологическая очистка;
- обратный осмос;
- электродиализ;
- использование ионообменников.

Целью данной работы являлся анализ методов очистки сточных вод от нитратов. Научная новизна заключается в том, что впервые были обобщены научные практические и обзорные исследования на русском и английском языках, описывающие методы очистки сточных вод предприятий различных отраслей промышленности от нитратов, приведены их преимущества и недостатки и представлены перспективы их использования.

Объекты и методы исследований

Объектами данного исследования являлись научные публикации и патенты российских и зарубежных авторов, касающиеся методов очистки сточных вод различных производств от нитратов. Для поиска информации были использованы базы данных Scopus, Web of Science, PubMed, Elibrary за период с начала 1990-х годов до 01.11.2022 г. Отобраны и проанализированы доступные обзорные и исследовательские статьи по анализу методов очистки сточных вод от нитратов, преимуществах и недостатках данных методов, и отдельные статьи, связанные с обоснованием актуальности темы, пониманием свойств и механизмов очистки сточных вод от нитратов, определением перспективных направлений исследований в этой области, на английском и русском языках. Основное внимание уделялось статьям, опубликованным в научных рецензируемых журналах с высоким индексом цитирования за последние пять лет. При проведении анализа использовали также материалы конференций и главы из книг. В системе PubMed был проведен поиск исследований, опубликованных в период 1990–2022 гг., с использованием следующих комбинаций ключевых слов: сточные воды, нитраты, методы очистки, химическая очистка, физико-химическая очистка, биологическая очистка. При этом были исключены статьи, доступные только в виде рефератов, а также библиографии, редакционные материалы и статьи, опубликованные не на английском и русском языках. Основным методом служило обобщение [14]. Были проанализированы статистические и исследовательские данные, относящиеся к исследованию различных методов очистки сточных вод от нитратов. Авторами были рассмотрены аргументы на

основе гипотез ведущих ученых о преимуществах и недостатках методов, сформировано собственное мнение на основе доказательства данных гипотез.

Результаты и их обсуждение

Биологическая очистка от нитратов

Использование биологических процессов было внедрено для очистки сточных вод с высоким содержанием нитратов относительно недавно [15]. По сравнению с другими существующими методами очистки, биологическая денитрификация позволяет после обработки преобразовывать нитраты в газообразный азот, который не вреден для окружающей среды и здоровья человека [16-18]. Кроме того, по сравнению с другими существующими методами (например, обратным осмосом, использованием ионообменников или электродиализом), биологическая денитрификация эффективнее и дешевле [18].

Биологическая денитрификация – это метод восстановления нитратов до газообразного азота с помощью денитрифицирующих бактерий. Этот процесс происходит поэтапно, и нитраты последовательно восстанавливаются до соединений азота [19]. В зависимости от используемого питания и источников энергии, бактерии делятся на две основные категории: гетеротрофные и автотрофные [19]. Гетеротрофные денитрифицирующие бактерии нуждаются в источнике органического углерода для дыхания. Если достаточное количество органического углерода не растворено в сточной воде, дополнительно вносятся такие вещества, как метанол, этанол и др. [7, 16]. Установлено, что соотношение между количеством потребляемого бактериями этанола и количеством восстановленного азота равно 0,5 [8].

Автотрофные денитрифицирующие бактерии – это бактерии, которым не требуются источники углерода для дыхания, и поэтому производят денитрификацию сами по себе. Они используют водород или восстановленные виды серы в качестве субстрат и двуокись углерода или бикарбонат в качестве источника углерода [3].

На процесс денитрификации влияют определенные сдерживающие факторы, такие как температура, концентрация растворенного кислорода, рН и щелочность, ингибиторы и соотношение между донорами электронов и азотом [7, 18].

Основными преимуществами использования биологических методов очистки сточных вод от нитратов являются:

- низкие затраты по сравнению с другими используемыми технологиями (обратный осмос, использование ионообменников и т.д.);
- высокая эффективность процесса, независимо от количества нитратов в сточных водах;
- процесс не нуждается в химических веществах, которые продолжают реагировать с соединениями сточных вод и после удаления нитратов [20].

Основными недостатками метода биологической денитрификации являются:

- значительные затраты времени, необходимые для запуска биологического процесса;
- если параметры сточных вод изменяются, то изменяются и параметры очищенной воды;
- необходимость устранения веществ, образующихся в результате микробной деятельности [16];
- необходимость тщательного обслуживания и мониторинга состава и свойств биомассы денитрифицирующих микроорганизмов.

Очистка от нитратов обратным осмосом

Обратный осмос – это физический процесс, в котором используются полупроницаемые мембраны. Сточная вода нагнетается под давлением через полупроницаемую мембрану, позволяющую молекулам воды проходить через поры, удерживая большую часть растворенных веществ [10]. Обратный осмос можно использовать для удаления нескольких загрязнений одновременно (ионы, частицы и органические молекулы) [21].

Использование системы обратного осмоса может обеспечить эффективность очистки сточной воды до 85 %, однако этот процесс требует наличия высокого давления и высокого потребления энергии [22]. Обратный осмос – один из самых дорогих видов очистки сточных вод от нитратов, и является рентабельным только в том случае, если потребность в воде очень низкая или требуется комплексное удаление несколько загрязняющих веществ. Обратный осмос требует тщательного анализа характеристик сточной воды и ее предварительной обработки для предотвращения разрушения мембран. Предварительная очистка заключается в удалении взвешенных веществ из сточной воды. Обычно этот процесс включает в себя прохождение воды через серию фильтров перед обратным осмосом [23].

После обратного осмоса удаляются все ионы из воды. В результате, pH очищенной вода будет колебаться, если его не контролировать. Каждое очистное сооружение, использующее эту систему, должно обеспечивать доочистку и корректировку pH для стабилизации кислотности очищенной воды [9].

Системы обратного осмоса обычно высоко автоматизированы и могут использоваться практически в любом месте, независимо от квалификации оператора. Требуется периодическая очистка мембран, используемых в процессе обратного осмоса [24]. Частота замены и очистки мембран определяется характеристиками сточной воды. Для очистки мембран используют растворы кислот, которые удаляют загрязняющие вещества, оседающие на мембранах. После очистки мембраны помещаются обратно в установку обратного осмоса. Со временем деградация мембраны приводит к постепенному снижению ее эффективности, и приходится заменять ее на новую. Срок службы мембран варьируется от 5 до 20 лет [13].

В результате обратного осмоса образуется достаточно большой объем концентрированного потока (15-50% от исходного объем воды), который необходимо утилизировать. Поскольку в данном концентрате высокая

концентрация растворенных веществ, особенно солей, требуется его доочистка перед сбросом в канализационную систему [25].

Основным преимуществом использования обратного осмоса является то, что он позволяет получать воду высокого качества независимо от качества сточной воды. Другие преимущества включают многократное удаление загрязняющих веществ, высокий уровень автоматизации процесса, простоту использования и пригодность системы для очень маленьких объемов сточных вод, содержащих нитраты [26].

К основным недостаткам обратного осмоса можно отнести:

- высокие затраты на электроэнергию (вода должна перекачиваться через мембрану на высокой скорости), на повышенное давление;
- вода нуждается в предварительной и последующей очистке;
- потенциально большой объем отходов, который необходимо утилизировать;
- изменения рН воды, требующие корректировки.

Очистка от нитратов электродиализом

Электродиализ является эффективным и гибким процессом с точки зрения очистки сточных вод от нитратов [6]. Этот процесс более предпочтителен по сравнению с обратным осмосом из-за скорости удаления нитратов [27]. Из-за высокой стоимости электродиализ не получил широкого распространения. Он подходит для малых объемов воды, поэтому не нашел широкого применения в процессах очистки сточных вод от нитратов [28].

При электродиализе, в процессе очистки сточных вод от нитратов, электроды помещаются в объем воды, между ними подается переменный ток, что приводит к электродиализу загрязненной нитратами воды [6, 13].

В процессе электродиализа нитрат-ионы мигрируют через селективные полупроницаемые перегородки в результате наличия электрически заряженных поверхностей мембраны [29]. Положительный электрод (катод) и отрицательный электрод (анод) используется для зарядки мембраны. Нитрат-ионы проходят через мембрану к аноду. Продолжая движение к

аноде, нитрат-ион отбрасывается непроницаемой для ионного обмена мембраной и улавливается рециркулирующим потоком сточных вод [30].

Процесс электродиализа требует предварительной обработки сточной воды, обычно это фильтрация. Мембраны, используемые в электродиализе, можно очищать с помощью разбавленных растворов кислот. Очистку мембраны рекомендуется проводить не реже одного раза в неделю, в зависимости от качества и количества сточной воды и содержания нитратов. [13]

Необходим мониторинг, чтобы убедиться, что электродиализ эффективен для снижения уровня нитратов в сточных водах. Мониторинг включает в себя ежедневный отбор проб или непрерывный мониторинг содержания нитратов в очищенной воде, измеряя, например, электропроводность [9].

Основными преимуществами использования электродиализа для снижения содержания нитратов являются:

- более низкое давление, чем при обратном осмосе;
- мембраны имеют достаточно длительный срок службы;
- подходит для систем любого размера.

Основными недостатками использования электродиализа для снижения нитратов являются:

- необходимость предварительной обработки при высоких концентрациях нитратов, Fe, Mn, H₂S в сточных водах;
- стоки электродиализной стадии требуют регулирования pH;
- необходимость специальной утилизации концентрата, полученного в результате промывки мембран [9].

Использование ионообменников для очистки от нитратов

Ионный обмен определяется как замена иона, связанного с инертной матрицей, другим ионом с помощью разрыва ионной связи и образования новой связи, не вызывая существенных структурных изменений [31]. В

зависимости от природы обмениваемых ионов процесс ионного обмена может быть двух типов: анионный обмен и катионный обмен.

Отрицательно заряженные ионообменники называются анионитами, положительно заряженные ионообменники – катионитами [32]. Ионообменники представляют собой гранулированные нерастворимые вещества, молекулярная структура которых содержит основные радикалы или кислоты, которые могут обмениваться отрицательными или положительными ионами с жидкостью, с которой они контактируют. В процессе ионного обмена общее количество ионов в жидкости остается неизменным [33].

Использование ионообменников является эффективным и экономичным методом снижения содержания нитратов в сточной воде [34]. Метод обеспечивает управление технологическим процессом, легко автоматизируется и не требует воздействия высоких температур в обычном рабочем диапазоне. Метод ионного обмена используется для водоочистных сооружений малой и средней мощности [7, 15]. Объем воды обрабатывается полностью или частично, в зависимости от концентрации нитратов в сточной и очищенной воде. Основные типы ионообменников:

- органический;
- неорганический.

Ионообменники могут удерживать вполне определенное количество ионов – имеют ионообменную емкость. После достижения максимального количества задержанных ионов, ионообменники необходимо регенерировать. Регенерация включает удаление оставшихся ионов и замену их гидроксид-ионами (для анионитов) или протонами водорода (для катионов) [35].

В зависимости от направления потока регенерирующего раствора различают два метода:

- прямоточная регенерация – регенерирующее вещество течет в том же направлении, что и истощенный ионообменник;

- противоточная регенерация – раствор для регенерации течет в направлении, противоположном направлению истощенного ионообменника [7, 10, 15].

Противоточная регенерация является наиболее часто используемым методом. Он имеет два важных преимущества:

- более высокая эффективность и, как следствие, снижение потребности в реагентах;

- улучшение качества очистной воды за счет регенерации нижних слоев ионообменников с большим количеством реагента [10].

Нитраты легко восстанавливаются из сточных вод с помощью ионообменной смолы, но смолу при регенерации трудно удалить из воды. Для удаления одного иона нитрата требуется больше ионов хлора [36].

Количество раствора, полученного в результате регенерации, может составлять около 1% от обработанной воды. Этот раствор насыщен хлоридами, нитратами, сульфатами, бикарбонатами и обычно утилизируется на станциях доочистки сточных вод.

Кроме того, утилизация использованного регенеранта способствует увеличению затрат на очистку с использованием ионообменников [7].

Технологии на основе ионообменников обеспечивают управление технологическим процессом, легко автоматизируются, процесс запускается за считанные минуты и обеспечивает стабильную работу независимо от температуры [37]. В зависимости от количества сточных вод, подлежащих очистке, и концентрации в ней нитратов, можно очищать часть объема или весь объем воды. Это делает востребованным использование ионообменников для очистных сооружений малой и средней мощности [37, 38].

Основными недостатками этой технологии являются возможность управления раствором, полученным в результате регенерации ионообменников, повышение коррозионной активности и агрессивности воды из-за замены ионов бикарбоната и сульфата в воде. Если технология

ионообменников используется для очистки от нитратов большого потока сточных вод, данный метод становится дорогим [39].

Выводы

Как уже говорилось, во всем мире наблюдается увеличение концентрации нитратов в подземных водах. Основными методами, применимые к сточным водам с повышенным содержанием нитратов, являются:

- биологические процессы;
- обратный осмос;
- электродиализ;
- использование ионообменников.

Определение наиболее подходящей технологии очистки сточных вод от нитратов – непростая задача из-за многих факторов, которые необходимо учитывать. Наиболее важные факторы представлены характеристиками входящего потока воды и желаемой концентрацией нитратов, которую необходимо получить в выходящем потоке.

Наиболее подходящую схему очистки сточных вод от нитратов можно определить только после проведения исследований и анализов, которые выполняются для каждого вида оборудования и установок. Предварительная и основная обработка сточных вод должна предусматривать вопрос утилизации или хранения осадков.

Список источников

1. Racovițeanu G (2003) Decantation and filtration theory (Bucharest: Matrix Rom) chapter 7 pp 113–140.
2. Babuțiu S (2016) Nitrites and nitrates in drinking water Academia, April 10, 2020
https://www.academia.edu/36249656/Nitra%C8%9Bii_%C8%99i_Nitri%C8%9Bii_%C3%AEn_Apa_Potabil%C4%83.

3. Vaclav B, Pekny V, Skorepa J and Vrba J (1998) Impact of Diffuse Nitrate Pollution Sources on Groundwater Quality Some Examples from Czechoslovakia Environ. Health Perspect. 83 5-24.
4. World Health Organization (2016) Nitrate and Nitrite in Drinking-water 1 Geneva.
5. World Health Organization (2004) Guidelines for Drinking-water Quality Fourth Edition Geneva.
6. Iacob O, Tudor A, Neamțu A and Cristea A (2012) Fountain water: Nitrate contamination and methemoglobinemia vol 1 (Bucharest: Carol Davila University Publishing House) chapter 2 pp 7–12.
7. Calin C. (2011) Processes and technologies for controlling the nitrogen content of water, (Bucharest: Technical University of Civil Engineering of Bucharest).
8. Koorngold E, Kock K and Strathmann H (1977) Electrodialysis in advanced wastewater treatment, Desalination 24 129–139.
9. Environmental Public Health Office of Drinking Water (2018) Nitrate Treatment and Remediation for Small Water Systems – Guidance Document 331-309.
10. Degremont (1991) Water Treatment Handbook vol 6 (Paris: Rueil-Malmaison).
11. Letimela O.N. (1993) Denitrification of groundwater for potable purposes WRC Report No 403/1/93.
12. Parliament of Romania (2011) Law nr. 458.
13. Jensen V.B., Darby J.L., Seidel C., Gorman C. (2012) Drinking Water Treatment for Nitrate Technical Report 6.
14. Moher, D.; Liberati, A.; Tetzlaff, J. PRISMA Group Preferred reporting items for systematic re-views and meta-analyses: The PRISMA statement. Public Library of Science Medicine 2009, 6(7), e1000097. <https://doi.org/10.1136/bmj.b2535>
15. Vit M, Simona Č, Krejci J and Janoch T (1992) Biological water denitrification – A review Enzyme Microb. Technol. 14 170–183.
16. Mackenzie L.D. (2020) Water and Wastewater Engineering: Design Principles and Practice vol 2 (USA: McGraw-Hill).

17. Rivett M.O., Buss S.R., Morgan P., Smith J.W.N., Bemment C.D. (2008) Nitrate attenuation in groundwater: A review of biogeochemical controlling processes *Water Res.* 42 16.
18. American Water Works Association (2011) *Water quality and treatment: A handbook of Community water supplies vol 5.*
19. Mohseni-Bandpi A., Elliott D.J., Zazouli M.A. (2013) Biological nitrate removal processes from drinking water supply-a review *J. Environ Health Sci. Eng.* 11.
20. Elzinga M., Liu D., Klok J. B. M, Roman P., Buisman C. J. N. and Heijne A. (2020) Microbial reduction of organosulfur compounds at cathodes in bioelectrochemicalsystems. *Environmental Science & Technology*,1, 100009.
21. De Vrieze J., Arends J. B. A., Verbeeck K., Gildemyn S. and Rabaey K. (2018). Interfacinganaerobic digestion with (bio)electrochemical systems: Potentials and challenges. *WaterResearch*,146, 244–255.
22. Cunha M. P., Ferraz R. M., Sancinetti G. P. and Rodriguez R. P. (2019). Long-termperformance of a UASB reactor treating acid mine drainage: effects of sulfate loadingrate, hydraulic retention time, and COD/SO₄²⁻ratio. *Biodegradation*,30,47–58.
23. Cetecioglu Z., Dolfing J., Taylor J., Purdy K. J. and Eyice Ö. (2019). COD/sulfate ratio doesnot affect the methane yield and microbial diversity in anaerobic digesters. *WaterResearch*,155, 444–454.
24. Braga A.F.M., Pereira M.B.O.C., Zaiat M., Silva G.H.R. and Feroso F. (2018) Screening of trace metal supplementation for black water anaerobic digestion.*Environmental Technology*,39, 1776–1785.
25. Bhattarai S., Cassarini C. and Lens P. N. L. (2019) Physiology and distribution of anaerobicoxidation of methane by archaeal methanotrophs. *Microbiology and Molecular BiologyReviews*,83,9–62.
26. Kiran M.G., Pakshirajan K., Das G. (2017) Heavy metal removal from multicomponent system by sulfate reducing bacteria: mechanism and cell surface

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.12.042>.

27. Luo S, Liu M, Yang L, Chang J (2019) Effects of drying techniques on the crystal structure and morphology of ettringite. *Constr Build Mater* 195:305–311.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.078>.

28. Mamelkina M.A., Cotillas S., Lacasa E., Sáez C., Tuunila R., Sillanpää M., Häkkinen A., Rodrigo M.A. (2017) Removal of sulfate from mining waters by electrocoagulation. *Sep Purif Technol* 182:87–93.

<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.03.044>.

29. Nurmesniemi E.T., Hu T., Rajaniemi K., Lassi U. (2021) Sulphate removal from mine water by precipitation as ettringite by newly developed electrochemical aluminium dosing method. *Desalin Water Treat* 217:195–202.

<https://doi.org/10.5004/dwt.2021.26920>.

30. Oyewo O.A., Agboola O., Onyango M.S., Popoola P., Bobape M.F. (2018) Current methods for the remediation of acid mine drainage including continuous removal of metals from wastewater and mine dump. *Bio-Geotechnol Mine Site Rehabil.* <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812986-9.00006-3>.

31. Zahedi, R., Mirmohammadi, S.J. Sulfate removal from chemical industries' wastewater using ettringite precipitation process with recovery of Al(OH)₃. *Appl Water Sci* 12, 226 (2022). <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01748-7>.

32. Kartic D.N., Narayana B.C.A., Arivazhagan M. (2018) Removal of high concentration of sulfate from pigment industry effluent by chemical precipitation using barium chloride: RSM and ANN modeling approach. *J Environ Manage* 206:69–76. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.10.017>.

33. Kefeni K.K., Msagati T.A., Mamba B.B. (2017) Acid mine drainage: prevention, treatment options, and resource recovery: a review. *J Clean Prod* 151:475–493. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.082>.

34. Kinnunen P, Kyllönen H, Kaartinen T, Mäkinen J, Heikkinen J (2017) Mietinen V (2018) Sulphate removal from mine water with chemical, biological

<https://doi.org/10.2166/wst.2018.102>.

35. Muñoz Sierra J. D., Lafita C., Gabaldón C., Spanjers H. and van Lier J. B. (2017). Tracemetals supplementation in anaerobic membrane bioreactors treating highly salinephenolic wastewater. *Bioresource Technology*,234, 106–114.

36. Nanusha M. Y., Carlier J. D., Carvalho G. I., Costa M. C. and Paiva A. P. (2019). Separationand recovery of Pd and Fe as nanosized metal sulphides by combining solvent extractionwith biological strategies based on the use of sulphate-reducing bacteria. *Separation andPurification Technology*,212, 747–756.

37. Kiran M. G., Pakshirajan K. and Das G. (2017). Heavy metal removal from multicomponentsystem by sulfate reducing bacteria: Mechanism and cell surface characterization.*Journal of Hazardous Materials*,324,62–70.

38. Aygun A, Dogan S, Argun ME (2018) Statistical optimization of ettringite precipitation in landfill leachate. *Braz J Chem Eng* 35:969–976. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20180353s20170528>.

39. Costa R. B., Bevilaqua D. and Lens P. N. L. (2020). Pre-treatment and temperature effects onthe use of slow release electron donor for biological sulphate reduction. *Journal ofEnvironmental Management*,275, In Press.

Для цитирования: Михайлова Е.С., Гармашов С.Ю. Анализ методов очистки сточных вод от нитратов // Московский экономический журнал. 2022. № 11. URL: <https://qje.su/rekreacia-i-turizm/moskovskij-ekonomicheskij-zhurnal-11-2022-7/>

© *ФИО авторов Михайлова Е. С., Гармашов С. Ю., 2022. Московский экономический журнал, 2022, № 11.*