Московский экономический журнал. № 11. 2022
Moscow economic journal. № 11. 2022

Научная статья

Original article

УДК 628.31

doi: 10.55186/2413046X_2022_7_11_650

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ СУЛЬФАТОВ

ANALYSIS OF SULFATE REMOVAL METHODS FROM WASTEWATERS

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, 1Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет», e_s_mihaylova@mail.ru

Попова Любовь Владимировна, научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия», gjgjdf07@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

Popova Lyubov Vladimirovna, researcher, Kuzbass state agricultural academy, gjgjdf07@mail.ru

Аннотация. Сточные воды химической и металлургической промышленности часто содержат сульфат-ионы, попадание которых в водоемы пагубно влияет на водную и наземную флору и фауну. Цель данной работы состояла в проведении анализа методов очистки сточных вод от сульфатов. Объектами исследования являлись научные публикации российских и зарубежных авторов, касающиеся методов очистки сточных вод от сульфатов. В системе PubMed был проведен поиск исследований, опубликованных в период 1990–2022 гг. по теме исследований. Основным методом исследований служило обобщение. В результате проведенных исследований установлено, что существуют следующие методы очистки сточных вод от сульфатов: биологическая очистка, физико-химическая очистка, включающая мембранную фильтрацию, ионный обмен, адсорбция, испарение/кристаллизация, электрокоагуляция и химическая очистка. Биологическая очистка с использованием сульфатредуцирующих бактерий подходит для низких и умеренных концентраций. Химическая очистка включает осаждение гидроксидом кальция с получением гипса, осаждение солей бария с получением барита и осаждение эттрингита. Показано, что эффективность удаления сульфатов при осаждении гидроксидом кальция не достаточна из-за относительно высокой растворимости гипса. Метод осаждения гидроксидом кальция снижает концентрацию сульфатов до 1200–2000 мг/л. Метод удаления сульфатов хлоридом бария эффективен, однако редко, используется из-за высокой стоимости хлорид бария и его токсичности. Наиболее эффективный метод осаждения эттрингита позволяет снизить концентрацию сульфатов в сточных водах до уровня менее 200 мг/л. Данная концентрация сульфатов считается нетоксичной для сбрасывания в водоемы.

Abstract. Wastewater from the chemical and metallurgical industries often contains sulfate ions, the entry of which into water bodies adversely affects aquatic

and terrestrial flora and fauna. The purpose of this work was to analyze the methods of sulfate removal from wastewaters. The objects of the study were scientific publications of Russian and foreign authors concerning methods of sulfate removal from wastewaters. PubMed was searched for studies published between 1990 and 2022 on the topic of research. Generalization served as the main research method. As a result of the research, it was found that there are the following methods of sulfate removal from wastewaters: biological, physical and chemical, including membrane filtration, ion exchange, adsorption, evaporation/crystallization, electrocoagulation and chemical method. Biological method using sulfate reducing bacteria is suitable for low to moderate concentrations. Chemical method includes calcium hydroxide precipitation to produce gypsum, precipitation of barium salts to produce barite and precipitation of ettringite. It is shown that the efficiency of sulfate removal during precipitation with calcium hydroxide is not sufficient due to the relatively high solubility of gypsum. The calcium hydroxide precipitation method reduces the sulfate concentration to 1200–2000 mg/l. The method of removing sulfates with barium chloride is effective, but rarely used due to the high cost of barium chloride and its toxicity. The most efficient ettringite sedimentation method reduces the concentration of sulfates in wastewater to levels below 200 mg/l. This concentration of sulfates is considered non-toxic for discharge into water bodies.
Ключевые слова: сточные воды, сульфаты, методы очистки, биологическая очистка, физико-химическая очистка, химическая очистка

Keywords: wastewater, sulfates, treatment methods, biological treatment, physical and chemical treatment, chemical treatment

Введение

Сточные воды многих промышленных производств содержат большое количество сульфатов, образующихся в результате промышленных процессов, в которых используется серная кислота или сырье, богатое сульфатами [1]. Использование менее окисленных сернистых соединений, таких как сульфиды, сульфиты или дитиониты, также приводит к

образованию сточных вод, богатых сульфатами [2]. Некоторые сточные воды, богатые сульфатами, почти не содержат органических веществ. Они образуются при выщелачивании богатых серой отходов горнодобывающей промышленности или при очистке отведенных серосодержащих газов [3]. Сульфат-ионы присутствуют в природных водах и промышленных сточных водах химической и металлургической промышленности [4]. В большинстве стран концентрация сульфатов в промышленных стоках установлена от 250 до 500 мг/л для защиты окружающей среды. У людей длительное потребление воды, содержащей 500–750 мг/л сульфата, вызывает слабительный эффект, катарсис, обезвоживание и раздражение желудочно-кишечного тракта [3]. Кроме того, высокие концентрации сульфатов в воде вызывают засоление воды [5], что вредно для водных организмов, которые могут выдерживать только ограниченные диапазоны солености воды [6]. Поэтому удаление сульфатов широко изучается исследователями по всему миру [7].

Целью данной работы являлся анализ методов очистки сточных вод от сульфатов. 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 сульфатов, 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 сульфатов. 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 сульфатов, преимуществах и недостатках данных методов, и отдельные статьи, связанные с обоснованием актуальности темы,

пониманием свойств и механизмов очистки сточных вод от сульфатов, 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, сульфаты, методы очистки, 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 [8]. Были проанализированы статистические и исследовательские данные, относящиеся к исследованию различных методов очистки сточных вод от сульфатов. 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

Методы очистки сточных вод от сульфатов

Технологии, используемые для очистки воды от сульфатов, включают биологическую очистку [9, 10], физико-химическую очистку, включающую мембранную фильтрацию [11], ионный обмен [12], адсорбцию [13], испарение/кристаллизацию [14], электрокоагуляцию [15-17] и химическое осаждение [6]. Биологическая очистка с использованием сульфатредуцирующих бактерий подходит для низких и умеренных концентраций, но ей мешает нехватка органических веществ, высокая соленость и образование сероводорода. За исключением химического осаждения, физико-химические методы являются дорогими, и существуют проблемы с утилизацией концентрата или регенерирующего раствора. [18].

Метод химического осаждения основан на образовании малорастворимых сульфатных солей [19]. Методы химического осаждения включают осаждение гидроксидом кальция с получением гипса [13, 20], осаждение солей бария с получением барита ($BaSO_4$) [21] и осаждение эттрингита [22]. Эффективность удаления сульфата при осаждении гидроксидом кальция очень низкая из-за относительно высокой растворимости гипса [23]. Метод осаждения гидроксидом кальция может снизить концентрацию сульфатов примерно до 1200–2000 мг/л [24].

Несмотря на высокую эффективность удаления сульфатов методом осаждения хлоридом бария, он используется редко, поскольку хлорид бария дороже гидроксида кальция [25] и обладает токсичностью. Среди методов химического осаждения [4] осаждение эттрингита является надежным и эффективным методом обработки [26] из-за его низкой растворимости [20], что требует щелочного pH [27] для удаления высоких концентраций сульфатов [3]. Метод осаждения эттрингита позволяет снизить концентрацию сульфатов до уровня менее 200 мг/л [7]. В этом методе эттрингит осаждается путем добавления к стокам гидроксида кальция и солей алюминия [28]. Среди множества фаз, образующихся при реакции ионов Ca^{2+}, Al^{3+} и SO_4^{2-}, только моносульфатная и трисульфатная стабильны в водной среде [29].

Известно, что эттрингит содержит параллельные ионы Al^{3+}, Ca^{2+} и OH^- [3]. Между ними присутствуют молекулы H_2O и ионы SO_4^{2-} [5], которые необходимы для сохранения структуры эттрингита [30]. Фактическое содержание молекул воды в структуре эттрингита может варьироваться от 24 до 32 моль на моль эттрингита [29].

Разработаны некоторые методы осаждения эттрингита для снижения содержания сульфатов в сточных водах с концентрацией сульфатов выше 2000 мг/л. Например, тригидроксид алюминия с извлечением источника алюминия и специальный алюминийсодержащий химический реагент, полученный из цементных продуктов без извлечения источника алюминия,

используются для осаждения эттрингита в процессах [26]. Основным недостатком данных методов является невозможность извлечения тригидроксида алюминия, несмотря на высокую стоимость солей алюминия и большую массу шлама [30].

Еще одним методом осаждения эттрингита при очистке сточных вод, содержащих сульфаты, является осаждение алюминатом натрия. Недостатком использования этого реагента являются высокие концентрации натрия, образующиеся в сточных водах после очистки [30].

Биологический метод очистки

В анаэробных условиях диссимилирующие сульфатредуцирующие бактерии (ДСБ) используют сульфат в качестве конечного акцептора электронов для разложения органических соединений и водорода [5, 6], что приводит к образованию сульфида. Хорошо известно, что при наличии сульфатов в сточных водах гидрогенотрофные СРБ превосходят все другие микроорганизмы по степени биологической очистки [24]. Это подтверждается тем, что данные СРБ получают больше энергии за счет потребления молекулярного водорода, имеют более высокое сродство к субстрату, увеличивая степень очистки стоков от сульфатов [25]. При очистке органических сточных вод, богатых сульфатами, баланс между углеродистым веществом и сульфатом является важным параметром для прогнозирования начала удаления сульфатов СРБ. Этот баланс обычно измеряется как отношение между химическом потреблением кислорода (ХПК) и концентрацией сульфатов (отношение ХПК/SO_4^{2-}).

СРБ обычно подразделяют на полные и неполные окислители. Первые минерализуют органические соединения до CO_2, тогда как вторые частично окисляют органические соединения и образуют ацетат в качестве побочного продукта, но не могут использовать ацетат в качестве донора электронов [20]. Неполные окислители составляют большую часть СРБ [21] и способны использовать многие органические соединения в качестве доноров электронов, в том числе спирты, аминокислоты, алифатические соединения,

алканы, монооксид углерода и некоторые сахара [22]. Органические сточные воды обычно содержат сложную смесь нескольких органических соединений, которые могут использоваться в качестве доноров электронов при неполном окислении СРБ и способствовать лучшему потреблению сульфатов. В этом случае неполностью окисляющиеся СРБ действуют как ацетогены, а полученный ацетат может быть утилизирован другими бактериями. Сообщается, что наиболее эффективный процесс биологической очистки сточных вод от сульфатов происходит с помощью СРБ в анаэробных условиях [13, 23].

Осаждение гидроксидами металлов

Этот процесс включает осаждение металлов, таких как магний, путем добавления гидроксида кальция при приблизительном значении pH=12 [31]. Насыщенные сульфаты кальция могут быть осаждены гидроксидами металлов и действовать как зародыши кристаллизации и соосаждения. Предыдущие исследования показали, что ионы Mg^{2+} могут реагировать с ионами OH^- с образованием $Mg(OH)_4^{2-}$, который, предпочтительно в присутствии SO_4^{2-} и $Al(OH)^{4-}$, образует соединение типа гидротальцита ($Mg_6Al_2SO_4(OH)_{16}\times nH_2O$), а не эттрингит [32]. В конкуренции Mg^{2+} и Ca^{2+} за реакцию с Al^{3+}, образование соединения типа гидротальцита ионами Mg^{2+} с более высоким потреблением Al^{3+} и OH^- ингибирует образование соединения эттрингита ионами Ca^{2+} и, следовательно, ингибирует дальнейшее восстановление сульфата [32].

Осаждение/кристаллизация гипса

Этот процесс включает кристаллизацию сульфата в перенасыщенном растворе в присутствии гипса [33]. Два этапа осаждения гидроксидов металлов и перенасыщенного гипса включаются в качестве предварительной обработки сточных вод [21]. Растворимость гипса в воде составляет 0,24 г на 100 мл [16]. Одним из преимуществ этого процесса является образование твердого гипсового побочного продукта, который можно продавать гипсовой промышленности для снижения себестоимости процесса [33].

Добавление зародышей гипса в перенасыщенный раствор сульфат-ионов является средством обеспечения достаточно большой площади поверхности роста [34], на которой может собираться большое количество молекул. Энергетически более выгодно повысить чистоту, улучшить размер кристаллов [35], ускорить удаление сульфата из фазы раствора в виде гипса и сократить время индукции, чем образовать новый цент роста [36]. Время индукции зависит от степени перенасыщения [35]. Время индукции уменьшается с увеличением степени перенасыщения раствора [36].

Осаждение эттрингита

Этот метод включает осаждение сульфата в форме эттрингита путем добавления гидроксида алюминия [36]. При образовании эттрингита наблюдается значительное снижение концентрации сульфатов в сточных водах при высоком pH [37]. Добавление $Ca(OH)_2$ увеличивает концентрацию ионов Ca^{2+} и OH^- в растворе. Ионы Al^{3+} из $Al(OH)_3$ образуют частицы $[Al(OH)_6]^{3-}$, которые реагируют с Ca^{2+} с образованием эттрингита [38]. Исследования показали, что оптимальный диапазон pH для осаждения стабильного эттрингита составляет 11–12,5 [39]. Концентрации сульфатов и кальция значительно снижаются при осаждении нерастворимого эттрингита [39]. Время очистки от сульфатов, необходимое для этого метода, зависит от необходимого конечного уровня удаления сульфатов и количества добавленного реагента [40].

Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что существуют следующие методы очистки сточных вод различных производств от сульфатов: биологическая очистка, физико-химическая очистка, включающая мембранную фильтрацию, ионный обмен, адсорбция, испарение/кристаллизация, электрокоагуляция и химическая очистка. Биологическая очистка с использованием сульфатредуцирующих бактерий подходит для низких и умеренных концентраций, но ей мешает нехватка органических веществ, высокая соленость и образование сероводорода.

Методы химического осаждения включают осаждение гидроксидом кальция с получением гипса, осаждение солей бария с получением барита и осаждение эттрингита. Эффективность удаления сульфата при осаждении гидроксидом кальция очень низкая из-за относительно высокой растворимости гипса. Метод осаждения гидроксидом кальция может снизить концентрацию сульфатов примерно до 1200–2000 мг/л. Несмотря на высокую эффективность удаления сульфатов методом осаждения хлоридом бария, он используется редко, поскольку хлорид бария дороже гидроксида кальция и обладает токсичностью. Метод осаждения эттрингита позволяет снизить концентрацию сульфатов до уровня менее 200 мг/л, что позволяет избежать пагубного воздействия на флору и фауну природных водоемов, в которые сбрасываются очищенные сточные воды.

Список источников

1. Biancalana Costa, Rachel & O'Flaherty, Vincent & Lens, P.N.L. (2020). Biological treatment of organic sulfate-rich wastewaters. 10.2166/9781789060966_0167.

2. Zan F. and Hao T. (2020). Sulfate in anaerobic co-digester accelerates methane productionfrom food waste and waste activated sludge. Bioresource Technology,298, 122536.

3. Wei C., Wei L., Li C., Wei D. and Zhao Y. (2018). Effects of salinity, C/S ratio, S/N ratio onthe BESI process, and treatment of nanofiltration concentrate. Environmental Scienceand Pollution Research,25, 5129–5139.

4. Yuan Y., Cheng H., Chen F., Zhang Y., Xu X., Huang C., Chen C., Liu W., Ding C., Li Z.,Chen T. and Wang A. (2020). Enhanced methane production by alleviating sulfideinhibition with a microbial electrolysis coupled anaerobic digestion reactor.Environment International,136, 105503.

5. Souza T. S. O., Okada D. Y. and Foresti E. (2018). Proof of concept and improvement of atriple chamber biosystem coupling anaerobic digestion, nitrification and mixotrophicendogenous denitrification for organic matter,

nitrogen and sulfide removal fromdomestic sewage. Bioprocess and Biosystems Engineering,41(12), 1839–1850.

6. Yekta S., Ziels R. M., Björn A., Skyllberg U., Ejlertsson J., Karlsson A., Svedlund M., WillénM. and Svensson B. H. (2017). Importance of sulfide interaction with iron as regulator ofthe microbial community in biogas reactors and its effect on methanogenesis, volatilefatty acids turnover, and syntrophic long-chain fatty acids degradation. Journal ofBioscience and Bioengineering,123, 597–605.

7. Nogueira E. W., Licona F. M., Godoi L. A. G., Brucha G. and Damianovic M. H. R. Z.(2019). Biological treatment removal of rare earth elements and yttrium (REY)and metals from actual acid mine drainage. Water Science and Technology,80,1485–1493.

8. 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

9. Nzeteu C. O., Trego A. C., Abram F. and O'Flaherty V. (2018). Reproducible, high-yielding,biological caproate production from food waste using a single-phase anaerobic reactorsystem. Biotechnology for Biofuels,11,1–14.

10. Reyes-Alvarado L. C., Okpalanze N. N., Kankanala D., Rene E. R., Esposito G. and LensP. N. L. (2017a). Forecasting the effect of feast and famine conditions on biologicalsulphate reduction in an anaerobic inverse fluidized bed reactor using artificial neuralnetworks. Process Biochemistry,55, 146–161.

11. Arahman N, Mulyati S, Lubis MR, Takagi R, Matsuyama H (2017) Removal profile of sulfate ion from mix ion solution with different type and configuration of anion exchange membrane in elctrodialysis. J Water Process Eng 20:173–179. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.10.007.

12. Choi JY, Lee T, Cheng Y, Cohen Y (2019) Observed crystallization induction time in seeded gypsum crystallization. Ind Eng Chem Res 58(51):23359–23365. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b06050.

13. De Godoi LAG, Foresti E, Damianovic MHRZ (2017) Down-flow fixed-structured bed reactor: an innovative reactor configuration applied to acid mine drainage treatment and metal recovery. J Environ Manag 197:597–604. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.027.

14. de Luna MDG, Rance DPM, Bellotindos LM, Lu MC (2017) Removal of sulfate by fluidized bed crystallization process. J Environ Chem Eng 5(3):2431–2439. https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.04.052.

15. Mamelkina MA, Tuunila R, Sillänpää M, Häkkinen A (2019) Systematic study on sulfate removal from mining waters by electrocoagulation. Sep Purif Technol 216:43–50. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.01.056.

16. Vepsäläinen M, Sillanpää M (2020) Electrocoagulation in the treatment of industrial waters and wastewaters. Advanced water treatment. Elsevier, Newyork, pp 1–78.

17. Dou W, Zhou Z, Jiang LM, Jiang A, Huang R, Tian X, Zhang W, Chen D (2017) Sulfate removal from wastewater using ettringite precipitation: Magnesium ion inhibition and process optimization. J Environ Manag 196:518–526. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.054.

18. Fang P, Tang ZJ, Chen XB, Huang JH, Tang ZX, Cen CP (2018) Removal of high-concentration sulfate ions from the sodium alkali FGD wastewater using ettringite precipitation method: factor assessment, feasibility, and prospect. J Chem. https://doi.org/10.1155/2018/1265168.

19. Hong S, Cannon FS, Hou P, Byrne T, Nieto-Delgado C (2017) Adsorptive removal of sulfate from acid mine drainage by polypyrrole modified activated carbons: effects of polypyrrole deposition protocols and activated carbon source. Chemosphere 184:429–437. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.019.

20. Kartic DN, Narayana BCA, 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.

21. Kefeni KK, Msagati TA, Mamba BB (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.

22. Kinnunen P, Kyllönen H, Kaartinen T, Mäkinen J, Heikkinen J (2017) Miettinen V (2018) Sulphate removal from mine water with chemical, biological and membrane technologies. Water Sci Technol 1:194–205. https://doi.org/10.2166/wst.2018.102.

23. 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.

24. 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.

25. 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.

26. 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.

27. 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.

28. Garcia G. P. P, Diniz R. C. O, Bicalho S. K., Franco V., Pereira A. D., Brandt E. F.,Etchebehere C., Chernicharo C. A. L. and Araujo J. C. (2017). Microbial community and sulphur behaviour in phototrophic reactors treating UASB effluent under differentoperational conditions. International Biodeterioration and Biodegradation,119,486–498.

29. 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.

30. 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.

31. 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.

32. 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.

33. Braga A. F. M., Pereira M. B. O. C., Zaiat M., Silva G. H. R. and Fermoso F. (2018).Screening of trace metal supplementation for black water anaerobic digestion.Environmental Technology,39, 1776–1785.

34. 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.

35. Kiran MG, Pakshirajan K, Das G (2017) Heavy metal removal from multicomponent system by sulfate reducing bacteria: mechanism and cell surface characterization. J Hazard Mater 324:62–70. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.12.042.

36. 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.

37. Mamelkina MA, Cotillas S, Lacasa E, Sáez C, Tuunila R, Sillanpää M, Häkkinen A, Rodrigo MA (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.

38. Nurmesniemi ET, 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.

39. Oyewo OA, Agboola O, Onyango MS, Popoola P, Bobape MF (2018) Current methods for the remediation of acid mine drainage including continuous removal of metals from wastewater and mine dump. Bio-Geotechnol Mine Site Rehabilit. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812986-9.00006-3.

40. 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

Для цитирования: Михайлова Е.С., Попова Л.В. Анализ методов очистки сточных вод от сульфатов // Московский экономический журнал. 2022. № 11. URL: https://qje.su/rekreacia-i-turizm/moskovskij-ekonomicheskij-zhurnal-11-2022-20/

© Михайлова Е.С., Попова Л.В., 2022. Московский экономический журнал, 2022, № 11.