

ВЛИЯНИЕ СОЛЕСОДЕРЖАНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ИОНОВ ЖЕЛЕЗА (III) ЭЛЕКТРОФЛОТОСОРБЦИОННЫМ МЕТОДОМ**А.М. Гайдукова, А.А. Похвалитова, Т.В. Конькова, А.Д. Стоянова**

Анастасия Михайловна Гайдукова (ORCID 0000-0001-9820-9053)*, Анастасия Александровна Похвалитова (ORCID 0000-0002-2763-8173), Татьяна Владимировна Конькова (ORCID 0000-0002-7151-6317), Алена Дмитриевна Стоянова (ORCID 0000-0001-6749-1770)

Кафедра технологии неорганических веществ и электрохимических процессов, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, пл. Миусская, 9, Москва, Российская Федерация, 125047
E-mail: gaidukova.a.m@muctr.ru *, pokhvalitova_anastasia@mail.ru, kontat@list.ru, stoianova.a.d@muctr.ru

*Проведены исследования влияния солей хлорида, сульфата и нитрата натрия на сорбцию ионов железа (III) на промышленном порошковом сорбенте марки «ОУ-А» в статическом режиме. Установлено, что наряду с природой соли ее концентрация влияет на механизм сорбции. Изотерму адсорбции ионов железа (III) из раствора нитрата натрия можно отнести к типу *H* по классификации Гильса, что подразумевает наличие специфического взаимодействия с поверхностью активного угля. Сорбционная емкость угля растет с увеличением концентрации солей хлорида и нитрата натрия от 1 до 50 г/л, при этом полного насыщения адсорбента Fe^{3+} в растворе 50 г/л нитрата натрия не наблюдается. Исследован процесс электрофлотационного извлечения отработанного сорбента из растворов солей. На эффективность электрофлотации влияет как природа соли, так и ее концентрация в растворе. Установлено, что с ростом концентрации солей хлорида натрия и нитрата натрия до 50 г/л степень извлечения отработанного сорбента снижается незначительно в среднем на 1–5%. В то же время эффективность электрофлотационного процесса падает до нуля в растворах сульфата натрия с концентрацией более 5 г/л при $pH = 7$. Однако, в кислых растворах ($pH = 4$) с концентрацией соли 50 г/л Na_2SO_4 степень извлечения угля составляет 71%. Проведенные исследования показали, что использование комбинированного метода, включающего в себя сорбцию на углях с последующим извлечением отработанного сорбента электрофлотационным методом, может обеспечить качественную предочистку воды от ионов железа (III) для надежной эксплуатации систем обессоливания в промышленных системах очистки воды.*

Ключевые слова: электрофлотация, сорбция, углеродный материал, ионы железа (III), флокулянт, повышенное солесодержание, степень извлечения

THE EFFECT OF SALINITY ON THE EFFICIENCY OF WASTEWATER TREATMENT FROM IRON (III) IONS BY ELECTROFLOTOSORPTION METHOD**A.M. Gaydukova, A.A. Pokhvalitova, T.V. Kon'kova, A.D. Stoyanova**

Anastasia M. Gaydukova (ORCID 0000-0001-9820-9053)*, Anastasia A. Pokhvalitova (ORCID 0000-0002-2763-8173), Tatiana V. Kon'kova (ORCID 0000-0002-7151-6317), Alyona D. Stoyanova (ORCID 0000-0001-6749-1770)

Department of Technology of Inorganic Substances and Electrochemical Processes, D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, Miusskaya sq., 9, Moscow, 125047, Russia
E-mail: gaidukova.a.m@muctr.ru *, pokhvalitova_anastasia@mail.ru, kontat@list.ru, stoianova.a.d@muctr.ru

Studies of the effect of sodium chloride, sulfate and nitrate salts on the sorption of iron (III) ions on an industrial powder sorbent of the brand "OU-A" in static mode have been carried out. It has been established that along with the nature of the salt, its concentration affects the sorption mechanism. The isotherm of adsorption of iron (III) ions from sodium nitrate solution can be attributed to type H according to the Gilsa classification, which implies the presence of a specific interaction with the surface of activated carbon. The sorption capacity of coal increases with an increase in the concentration of salts of chloride and sodium nitrate from 1 to 50 g/l, while the full saturation of the adsorbent Fe^{3+} in a solution of 50 g/l of sodium nitrate is not observed. The process of electroflotation extraction of spent sorbent from salt solutions is investigated. The effectiveness of electroflotation is affected by both the nature of the salt and its concentration in the solution. It was found that with an increase in the concentration of sodium chloride and sodium nitrate salts to 50 g/l, the degree of extraction of the spent sorbent decreases slightly by an average of 1-5%. At the same time, the efficiency of the electroflotation process drops to zero in sodium sulfate solutions with a concentration of more than 5 g/l at pH = 7. However, in acidic solutions (pH = 4) with a salt concentration of 50 g/l Na_2SO_4 , the degree of coal extraction is 71%. Studies have shown that the use of a combined method, including sorption on coals with subsequent extraction of spent sorbent by electroflotation method, can provide high-quality pretreatment of water from iron (III) ions for reliable operation of desalination systems in industrial water purification systems.

Key words: electroflotation, sorption, carbon material, iron (III) ions, flocculant, increased salinity, degree of extraction

Для цитирования:

Гайдукова А.М., Похвалитова А.А., Конькова Т.В., Стоянова А.Д. Влияние солесодержания на эффективность очистки сточных вод от ионов железа (III) электрофлотосорбционным методом. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 12. С. 119–125. DOI: 10.6060/ivkkt.20226512.6587.

For citation:

Gaydukova A.M., Pokhvalitova A.A., Kon'kova T.V., Stoyanova A.D. The effect of salinity on the efficiency of wastewater treatment from iron (III) ions by electroflotosorption method. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 11. P. 119–125. DOI: 10.6060/ivkkt.20226511.6587.

ВВЕДЕНИЕ

Обезвреживание промышленных сточных вод, особенно сточных вод гальванических цехов, является одной из наиболее важных и актуальных проблем. Сточные воды образуются после операций промывки деталей различных электрохимических и химических технологических процессов (меднение, никелирование, хромирование, кадмирование и т.д.), после операций обработки поверхности деталей (травление, активация), где в сточные воды попадают кислоты, а также отработанные технологические растворы. Особенно опасны сточные воды, содержащие ионы тяжелых металлов и отработанные технологические растворы. При сбросе отработанных растворов в сточные воды попадают, помимо ионов тяжелых металлов, хлориды, сульфаты, нитраты в достаточно высоких концентрациях (100-300 г/л), что может затруднять процесс их очистки.

Большое число различных загрязнений в промышленных сточных водах обуславливает и

многочисленные методы, приемы и технологические схемы, используемые при их очистке. Применение одного метода малоэффективно, в технологических схемах очистки комбинируют методы [1-3]. Комбинированный метод включает в себя сорбцию ионов металлов на углях в статическом режиме с последующим извлечением отработанного сорбента в процессе электрофлотационной обработки. В настоящей работе исследовано влияние солей хлорида, нитрата и сульфата натрия на эффективность электрофлотосорбционного метода очистки от ионов тяжелых металлов.

Адсорбционный метод очистки экономически выгоден, прост и эффективен при очистке воды от вредных органических примесей и ионов металлов [4, 5]. Однако, при использовании данного метода сохраняется необходимость выбора сорбента, обладающего высокой селективностью по отношению к ионам металлов на фоне высоких концентраций солей. Изучению процессов сорбции ионов металлов, а также органических примесей на активированных углях посвящено большое количество

работ [6-11]. Большинство исследований сорбционного процесса проводится в статическом режиме с последующим извлечением отработанного сорбента фильтрацией или седиментацией. Однако из-за большой продолжительности процесса (более 2 ч) и частой замены или регенерации фильтрующего материала сорбционные процессы на практике проводят по динамическому типу как более приемлемому для автоматизации производственного процесса и осуществления его непрерывности. В то же время проводятся исследования по разработке эффективной технологии извлечения отработанных сорбентов из очищенной воды при реализации статического режима [12-15]. Ранее в РХТУ им. Д.И. Менделеева были проведены исследования по извлечению промышленных углеродных сорбентов электрофлотационным методом. Преимуществами данного метода являются высокая эффективность процесса, низкие энергозатраты, сокращенное время обработки жидкости [16-18].

Цель настоящей работы – определение величины сорбции ионов металлов из растворов с повышенным содержанием солей (сульфата, хлорида и нитрата натрия до 50 г/л) и установление возможности проведения электрофлотационного процесса извлечения отработанного сорбента из данных растворов.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве сорбента использовали углеродный материал марки «ОУ-А» с суммарным объемом пор 0,75 см³/г, в том числе объем микропор 0,28 см³/г.

Сорбционные испытания проводили в статическом режиме при непрерывном перемешивании раствора, содержащего 10-300 мг/л Fe³⁺ и 1-50 г/л NaNO₃, Na₂SO₄ и NaCl с сорбентом в течение 0,5 ч. Соотношение сорбент:раствор = 1:125. После сорбции проводилась корректировка pH раствора до pH = 7, с целью перевода не адсорбированного Fe³⁺ в малорастворимое соединение Fe(OH)₃ и последующего его извлечения в процессе электрофлотационной обработки. Далее отработанный сорбент извлекали в процессе электрофлотационной обработки раствора.

Величину сорбции (А, мг/г) определяли по формуле (1)

$$A = \frac{(c_0 - c_p) \cdot V}{m} \quad (1)$$

где c₀ – начальная концентрация, мг/л; c_p – равновесная или остаточная концентрация загрязняющего вещества в растворе, мг/л; V – объем обрабатываемого раствора, л; m – масса сорбента, г.

Концентрацию Fe³⁺ определяли фотометрическим методом [19] в присутствии сульфосалициловой кислоты. Оптическую плотность растворов измеряли на спектрофотометре СФ-2000 при длине волны 500 нм.

В экспериментах для повышения эффективности процесса использовали неионогенный флокулянт марки Superfloc серии N-300 и катионный флокулянт С-496 с концентрацией 5 мг/л.

Исследования электрофлотационного процесса извлечения взвешенных веществ проводились в лабораторной установке, схема и принцип работы которой подробно описаны в работе [18].

Эффективность извлечения частиц угля (α_{эф}, %) из раствора оценивали по формуле (2):

$$\alpha_{эф} = \frac{c_0 - c_{кон}}{c_0} \cdot 100 \quad (2)$$

где, c₀ – исходная концентрация, мг/л; c_{кон} – остаточная концентрация угля в растворе, мг/л.

Массовую концентрацию угля измеряли турбидиметрическим методом [20] при помощи мутномера марки НИ 98703.

Для определения поверхностных функциональных групп углеродного материала был использован метод инфракрасной спектроскопии (ИК-спектроскопии). ИК спектры углей регистрировали на Фурье-спектрометре «Nicolet 380» в области 400-4000 см⁻¹.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Активированные угли, благодаря пористой поверхности и наличию функциональных групп, могут участвовать как в физической, так и в химической адсорбции различных веществ. При дисперсионном взаимодействии атомов и молекул за счет Ван-дер-Ваальсовых сил притяжения в порах углеродного материала протекает физическая адсорбция. Связь между растворенными веществами и функциональными группами на поверхности угля подразумевает химическую адсорбцию. Поверхностные функциональные группы углеродных материалов играют важную роль в удалении тяжелых металлов из водных растворов. В предыдущих исследованиях [21] по методу Бозма было определено количество кислотных и основных групп на поверхности сорбента «ОУ-А». Установлено наличие кислородсодержащих групп в количестве 0,85 ммоль-экв/г, основных – 0,688 ммоль-экв/г.

Более полная информация о молекулярном строении органического вещества угля была получена методом инфракрасной спектроскопии. На ИК спектрах наблюдалась наиболее интенсивная полоса в области 1000-1120, характеризующая ко-

лебания в различных кислородсодержащих группах (пик 1120см^{-1} $\nu(\text{C}-\text{OH})$). Менее интенсивные пики в области 1450 см^{-1} характеризуют деформационные колебания в алифатических структурах металльных и метиленовых групп; полоса 1560 образована пиками валентных колебаний функциональных групп $-\text{COO}^-$. ИК спектры углей в области > 1880 формируются в основном за счет валентных колебаний OH -групп [22, 23].

Эффективность сорбционного процесса зависит не только от площади поверхности сорбента и наличия функциональных групп, но и от присутствующих в растворе примесей и их концентрации.

Были получены экспериментальные данные, показывающие влияние концентрации соли нитрата натрия на сорбционную емкость сорбента при извлечении Fe^{3+} из раствора (рис. 1).

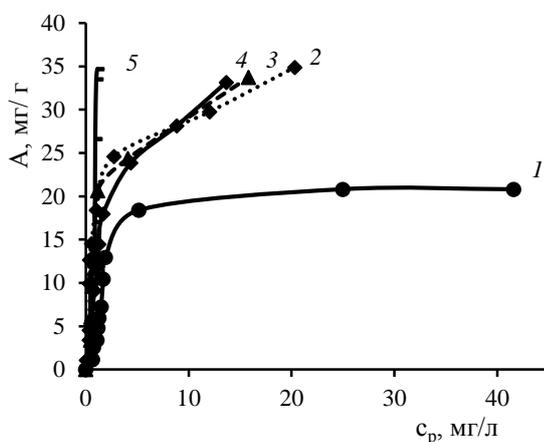


Рис. 1. Изотермы адсорбции ионов железа (III) на порошковом углеродном сорбенте из воды (1), и раствора NaNO_3 с концентрацией: 2 - 1 г/л, 3 - 5 г/л, 4 - 10 г/л, 5 - 50 г/л; $\text{pH} = 2,5$
 Fig. 1. Isotherms of adsorption of iron (III) ions on a powdered carbon sorbent from water (1) and a NaNO_3 solution with a concentration of: 2 - 1 g/l, 3 - 5 g/l, 4 - 10 g/l, 5 - 50 g/l; $\text{pH} = 2.5$

Из данных, представленных на рис. 1, видно, что повышение концентрации нитрата натрия в водном растворе увеличивает сорбционную емкость углеродного материала. Необходимо отметить, что изотерма адсорбции в этом случае относится к Н типу по классификации Гильса, и полного насыщения адсорбента при этом не наблюдается.

При увеличении концентрации нитрата натрия до 50 г/л степень извлечения ионов железа (III) с начальной концентрацией до 280 мг/л приближается к 98%. Таким образом, можно сделать вывод о перспективности использования порошкового сорбента для извлечения Fe^{3+} из растворов с повышенным содержанием нитрата натрия. Можно предположить, что в результате сорбции Fe^{3+} из раствора, содержащего нитрат натрия в достаточно

высокой концентрации, происходит модификация поверхности угля с включением азотных групп, повышающих основные свойства сорбента и усиливающих адсорбцию ионов металла.

Также было исследовано влияние содержания в растворе хлорида натрия на величину адсорбции Fe^{3+} (рис. 2).

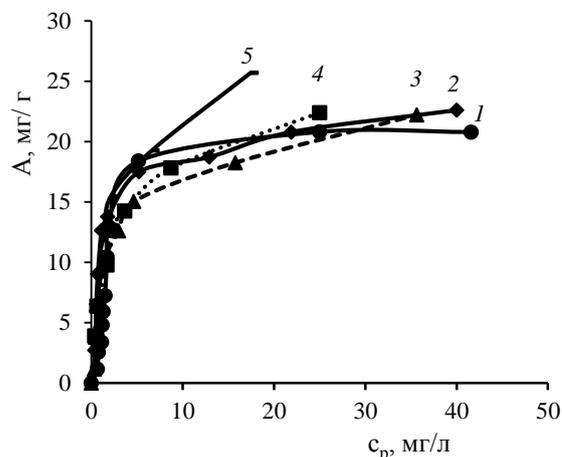


Рис. 2. Изотермы адсорбции ионов железа (III) на углеродном сорбенте из воды (1), раствора NaCl с концентрацией: 2 - 1 г/л; 3 - 5 г/л; 4 - 10 г/л; 5 - 50 г/л; $\text{pH} = 2$

Fig. 2. Isotherms of adsorption of iron (III) ions on a carbon sorbent from water (1), NaCl solution with concentration: 2 - 1 g/l; 3 - 5 g/l; 4 - 10 g/l; 5 - 50 g/l; $\text{pH} = 2$

Установлено, что повышение концентрации хлорида натрия до 50 г/л приводит к росту величины адсорбции ионов железа (III), при этом степень извлечения при начальной концентрации ионов металла в растворе более 220 мг/л составляет не менее 90%.

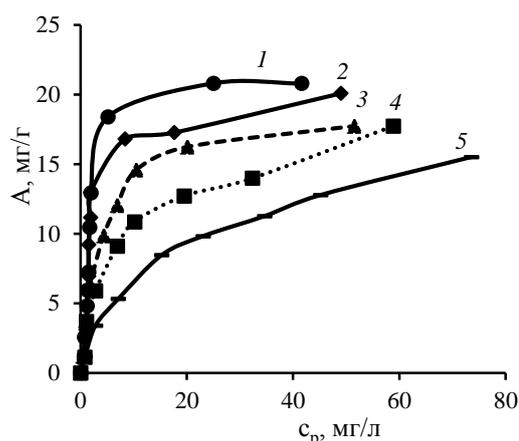


Рис. 3. Изотермы адсорбции ионов железа (III) на порошковом углеродном сорбенте марки «ОУ-А» из воды (1), раствора Na_2SO_4 : 2 - 1 г/л $\text{pH}=2$, 3 - 5 г/л, 4 - 10 г/л, 5 - 50 г/л; $\text{pH} = 2,5$
 Fig. 3. Isotherms of adsorption of iron (III) ions in powder on carbon sorbent of the brand "OU-A" from water (1), Na_2SO_4 solution: 2 - 1 g/l $\text{pH} = 2$, 3 - 5 g/l, 4 - 10 g/l, 5 - 50 g/l; $\text{pH} = 2.5$

В ходе дальнейших исследований были получены данные, показывающие влияние концентрации соли сульфата натрия на величину адсорбции Fe^{3+} на углеродном материале (рис. 3).

Результаты свидетельствуют, что чем больше концентрация сульфата натрия, тем меньше величина адсорбции железа (III) на углеродном материале.

Из литературных источников [24] известно, что сульфат анион адсорбируется на поверхности угля специфически и сильно изменяет величину электрокинетического потенциала. Установлено, что изменение электрокинетического потенциала частиц угля влияет не только на процесс сорбции, но и на электрофлотационный процесс извлечения отработанного сорбента.

Обнаружено, что в растворах солей с концентрацией до 1 г/л электрокинетический потенциал частиц углеродного материала приобретает отрицательные значения от -35 мВ (в растворе Na_2SO_4) до -20 мВ (в растворе $NaNO_3$) и до -10 мВ (в растворе $NaCl$). Процесс сорбции Fe^{3+} способствует смещению значений электрокинетического потенциала частиц к нулю, что положительно сказывается на электрофлотационном процессе их извлечения. Однако, с ростом концентрации фоновых солей происходит снижение электрокинетического потенциала частиц в область сильно отрицательных значений, что затрудняет процесс их извлечения. Кроме того, было установлено, что частицы угля имеют небольшой размер (до 16 мкм) и не захватываются электролитически выделяющимися газовыми пузырьками. На основании полученных значений заряда частиц были подобраны флокулянты с целью увеличения их размеров.

Таблица 1

Влияние концентрации $NaNO_3$ и pH среды на электрофлотационный процесс извлечения углеродного материала «ОУ-А» в присутствии Fe^{3+}

Table 1. Effect of $NaNO_3$ concentration and pH of the medium on the electroflotation process of extraction of carbon material "OU-A" in the presence of Fe^{3+}

c ($NaNO_3$), г/л	Степень извлечения «ОУ-А» ($\alpha_{эф}$), %			
	pH = 4		pH = 7	
	0,2	0,5	0,2	0,5
1	90	97	97	98
5	90	97	95	97
10	90	97	94	97
50	90	96	94	95

Примечание: Условия эксперимента: $\tau=20$ мин; $i_v=0,2$ А/л; $c(Fe^{3+})=25$ мг/л; $c_{флок.(N-300)}=5$ мг/л
 Note: Experimental conditions: $\tau=20$ min; $i_v=0.2$ A/l; $c(Fe^{3+})=25$ mg/l; $c_{флок.(N-300)}=5$ mg/l

Таблица 2

Влияние концентрации $NaCl$ и pH среды на электрофлотационный процесс извлечения углеродного материала «ОУ-А» в присутствии Fe^{3+}

Table 2. Effect of $NaCl$ concentration and pH of the medium on the electroflotation process of extraction of carbon material "OU-A" in the presence of Fe^{3+}

c ($NaCl$), г/л	Степень извлечения «ОУ-А» ($\alpha_{эф}$), %			
	pH = 4		pH = 7	
	0,2	0,5	0,2	0,5
1	94	96	82	94
5	94	95	81	93
10	94	94	80	90
50	89	93	79	89

Примечание: Условия эксперимента: $\tau=20$ мин; $i_v=0,4$ А/л; $c(Fe^{3+})=25$ мг/л; $c_{флок.(C-496)}=5$ мг/л
 Note: Experimental conditions: $\tau=20$ min; $i_v=0.4$ A/l; $c(Fe^{3+})=25$ mg/l; $c_{флок.(C-496)}=5$ mg/l

Выявлено, что увеличение концентрации нитрата и хлорида натрия в кислой и нейтральной среде (табл. 1, 2) не оказывает существенного влияния на степень извлечения отработанного сорбента (изменение степени извлечения не превышает 5%). Остаточная концентрация ионов железа (III) после электрофлотации составляет 0,1-0,4 мг/л.

Определено, что электрофлотационный процесс извлечения сорбента подавляется с ростом концентрации Na_2SO_4 (рис. 4) и pH раствора.

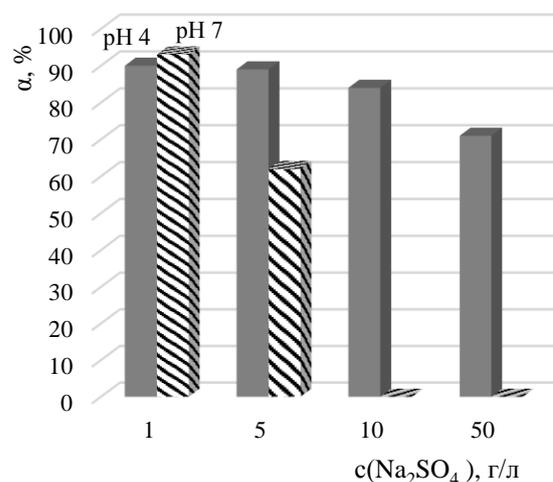


Рис. 4. Зависимость степени извлечения (α) угля от концентрации Na_2SO_4 и кислотности среды

Fig. 4. Dependence of the degree of coal extraction (α) on the concentration of Na_2SO_4 and the acidity of the medium

Можно предположить, что снижение степени извлечения отработанного сорбента связано с уменьшением газонасыщения раствора. Высокая концентрация соли подавляет реакцию выделения водорода на катоде за счет восстановления сульфат-ионов.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволили установить, что рост концентрации солей в растворе влияет не только на сорбционную емкость углеродного материала и механизм адсорбции металла, но и на эффективность электрофлотационного процесса последующего извлечения отработанного сорбента.

Высокая концентрация нитрата и хлорида натрия в растворе способствует росту величины адсорбции Fe^{3+} , в то время как сульфат ионы, специфически адсорбируясь на поверхности, наоборот уменьшают сорбционную емкость исследуемого сорбента. Увеличение концентрации нитрат ионов в водном растворе до 50 г/л изменяет механизм сорбции. Полученная изотерма адсорбции свидетельствует о специфической адсорбции ионов железа (III) или хемосорбции с поверхностными функциональными группами.

Повышенное содержание нитрата и хлорида натрия не снижает эффективность электрофлотационного процесса, в отличие от сульфата натрия, где степень извлечения понижается с

увеличением концентрации соли и pH раствора. Подавление электрофлотационного процесса извлечения может быть связано с уменьшением газонасыщения раствора за счет реакции восстановления сульфат-ионов на катоде.

Предложенный электрофлотосорбционный метод может обеспечить качественную предочистку воды для надежной эксплуатации систем обессоливания в промышленных системах очистки воды.

Работа выполнена при финансовой поддержке РХТУ им. Д.И. Менделеева в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» № ВИГ_2022_002.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The work was carried out with the financial support of the RKhTU im. DI. Mendeleev in the framework of the program of strategic academic leadership "Priority-2030" No. VIG_2022_002.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шестаков И.Я., Шестаков В.И. Комбинированный метод очистки воды от ионов металлов. *Актуал. пробл. авиации и космонавтики*. 2017. Т.1. Вып.13. С.382-383.
2. Kyzas G.Z., Matis K.A. Electroflotation process: A review. *J. Molec. Liq.* 2016. V. 220. P. 657-664. DOI: 10.1016/j.molliq.2016.04.128.
3. Dimoglo A., Sevim-Elibol P., Dinç Ö., Gökmen K., Erdoğan H. Electrocoagulation/electroflotation as a combined process for the laundry wastewater purification and reuse. *J. Water Process Eng.* 2019. V. 31. Art. Numb. 100887. DOI: 10.1016/j.jwpe.2019.100877.
4. Ameri A., Tamjidi S., Dehghankhalili F., Farhadi A., Saati M. Application of algae as low cost and effective bio-adsorbent for removal of heavy metals from wastewater: a review study. *Environ. Technol. Rev.* 2020. V. 9. N 1. P. 85-110. DOI: 1080/21622515.2020.1831619.
5. Хоботова Э.Б., Грайворонская И.В., Калужная Ю.С., Игнатенко М.И. Сорбционная очистка сточных вод от органических красителей с помощью гранулированного доменного шлака. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 6. С. 89-94. DOI: 10.6060/ivkkt.20216406.6302.
6. Фогель А.А., Сомин В.А., Комарова Л.Ф. Изучение сорбционных материалов на основе отходов производства древесины и минерального сырья. *Химия в интер. устойч. развития*. 2011. Т. 19. Вып.4. С. 461-465.
7. Фазылова Г.Ф., Валинурова Э.Р., Хатмуллина Р.М., Кудашева Ф.Х. Сорбционные параметры производных фенолов на различных углеродных материалах. *Сорбц. и хроматограф. процессы*. 2013. Т. 13. Вып.5 С. 728-735.
8. Thajeel A.S. Isotherm, Kinetic and Thermodynamic of Adsorption of Heavy Metal Ions onto Local Activated Carbon. *Aquatic Sci. Tech.* 2013. V. 1. N 2. P. 53-77. DOI: 10.5296/ast.v1i2.3763.

REFERENCES

1. Shestakov I.Ya., Shestakov V.I. Combined method of water purification from metal ions. *Aktual. Probl. Aviatsii Kosmonavтики*. 2017. V.1. N 13. P.382-383 (in Russian).
2. Kyzas G.Z., Matis K.A. Electroflotation process: A review. *J. Molec. Liq.* 2016. V. 220. P. 657-664. DOI: 10.1016/j.molliq.2016.04.128.
3. Dimoglo A., Sevim-Elibol P., Dinç Ö., Gökmen K., Erdoğan H. Electrocoagulation/electroflotation as a combined process for the laundry wastewater purification and reuse. *J. Water Process Eng.* 2019. V. 31. Art. Numb. 100887. DOI: 10.1016/j.jwpe.2019.100877.
4. Ameri A., Tamjidi S., Dehghankhalili F., Farhadi A., Saati M. Application of algae as low cost and effective bio-adsorbent for removal of heavy metals from wastewater: a review study. *Environ. Technol. Rev.* 2020. V. 9. N 1. P. 85-110. DOI: 1080/21622515.2020.1831619.
5. Khabotova E.B., Hraivoronska I.V., Kaliuzhna I.S., Ignatenko M.I. Sorption purification of wastewater from organic dyes using granulated blast-furnace slag. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 6. P. 89-94. DOI: 10.6060/ivkkt.20216406.6302.
6. Vogel A.A., Somina V.A., Komarova L.F. Study of sorption materials based on wood and mineral raw materials production waste. *Khimiya Inter. Ustoich. Razvitiya*. 2011. 19. N 4. P. 461-465 (in Russian).
7. Fazylova G.F., Valinurova E.R., Khatmullina R.M., Kudashева F.H. Sorption parameters of phenol derivatives on various carbon materials. *Sorbts. Khromatograf. Prots.* 2013. V. 13. N 5. P. 728-735 (in Russian).
8. Thajeel A.S. Isotherm, Kinetic and Thermodynamic of Adsorption of Heavy Metal Ions onto Local Activated Carbon. *Aquatic Sci. Tech.* 2013. V. 1. N 2. P. 53-77. DOI: 10.5296/ast.v1i2.3763.

9. Amerkhanova S., Shlyapov R., Uali A. The active carbons modified by industrial wastes in process of sorption concentration of toxic organic compounds and heavy metals ions. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 2017. V. 532. N 5. P. 36–40. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2017.07.015.
10. Sharaf El-Deen S.E.A., Sharaf El-Deen G.E. Adsorption of Cr(VI) from Aqueous Solution by Activated Carbon Prepared from Agricultural Solid Waste. *Separat. Sci. Technol.* 2015. V. 50. N 10. P.1469–1479. DOI: 10.1080/01496395.2015.1004348.
11. Yu L., Ruiqi F., Zimo L., Wenzhe F., Zhuoxing W., Xinhua X. Preparation of Functional Carbon-Based Materials for Removal of Heavy Metals from Aqueous Solution. *Progr. Chem.* 2015. V. 27. N 11. P. 1665–1678. DOI: 10.7536/PC150401.
12. Schwentner G., Kremp W., Mauritz A., Hein A., Metzger S., Rößler A. Spurenstoffelimination in den Klärwerken Böblingen-Sindelfingen und Mannheim. *Gemeindetag Baden-Württemberg.* 2013. V. 5. P.193–201 (in German).
13. Löwenberg J., Zenker A., Krahnstöver T., Böhler M., Baggenstos M., Koch G., Wintgens T. Upgrade of deep bed filtration with activated carbon dosage for compact micropollutant removal from wastewater in technical scale. *Water Res.* 2016. V. 94. P. 246–256. DOI: 10.1016/j.watres.2016.02.033.
14. Meinel F., Zietzschmann F., Ruhl A. S., Sperlich A., Jekel M. The benefits of powdered activated carbon recirculation for micropollutant removal in advanced wastewater treatment. *Water Res.* 2016. V. 91. P. 97–103. DOI: 10.1016/j.watres.2016.01.009.
15. Krahnstöver T., Wintgens Th. Separating powdered activated carbon (PAC) from wastewater – Technical process options and assessment of removal efficiency. *J. Environ. Chem. Eng.* 2018. V. 6. N 5. P. 5744–5762. DOI: 10.1016/j.jece.2018.09.001.
16. Gaydukova A.M., Nenasheva A.S., Kolesnikov V.A., Vetlugin N.A. The extraction of activated carbon from aqueous solution in the presence of organic and inorganic compounds by the electroflotation method. *J. Water Chem. Technol.* 2021. V. 43. N 2. P. 116–122. DOI 10.3103/S1063455X21020077.
17. Gaydukova A.M., Kolesnikov V.A., Brodskiy V.A., Kolesnikov A.V. Electroflotation extraction of carbon material powders in the presence of metal ions. *CIS Iron Steel Rev.* 2021. V. 22. P. 102–106. DOI: 10.17580/cisirs.2021.02.19.
18. Gaydukova A., Kolesnikov V., Stoyanova A., Kolesnikov A. Separation of highly dispersed carbon material of OU-B grade from aqueous solutions using electroflotation technique. *Separat. Purificat. Technol.* 2020. V. 245. Art. Numb. 116861. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.116861.
19. ПНД Ф 14.1:2:4.50-96. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации общего железа в питьевых, поверхностных и сточных водах фотометрическим методом с сульфосалициловой кислотой.
20. ГОСТ Р 57164-2016. Вода питьевая. Методы определения запаха, вкуса и мутности.
21. Gaydukova A., Kon'kova A., Kolesnikov V., Pokhvalitova A. Adsorption of Fe³⁺ ions onto carbon powder followed by adsorbent electroflotation. *Environ. Technol. Innovat.* 2021. V. 23. Art. Numb. 101722. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101722.
22. Vimont A., Thibault-Starzyk F., Daturi M. Analysing and understanding the active site by IR spectroscopy. *Chem. Soc. Rev.* 2010. V. 39. N 12. P. 4928–4950. DOI: 10.1039/b919543m.
23. Lamberti C., Zecchina A., Groppo E., Bordiga S. Probing the surfaces of heterogeneous catalysts by in situ IR spectroscopy. *Chem. Soc. Rev.* 2010. V. 39. N 12. P. 4951–5001. DOI: 10.1039/c0cs00117a.
24. Sokolova T.A., Alekseeva S.A. Adsorption of sulfate ions by soils (A Review). *Eurasian Soil Sci.* 2008. V. 41. N 2. P. 140–148. DOI: 10.1134/S106422930802004X.
9. Amerkhanova S., Shlyapov R., Uali A. The active carbons modified by industrial wastes in process of sorption concentration of toxic organic compounds and heavy metals ions. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 2017. V. 532. N 5. P. 36–40. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2017.07.015.
10. Sharaf El-Deen S.E.A., Sharaf El-Deen G.E. Adsorption of Cr(VI) from Aqueous Solution by Activated Carbon Prepared from Agricultural Solid Waste. *Separat. Sci. Technol.* 2015. V. 50. N 10. P.1469–1479. DOI: 10.1080/01496395.2015.1004348.
11. Yu L., Ruiqi F., Zimo L., Wenzhe F., Zhuoxing W., Xinhua X. Preparation of Functional Carbon-Based Materials for Removal of Heavy Metals from Aqueous Solution. *Progr. Chem.* 2015. V. 27. N 11. P. 1665–1678. DOI: 10.7536/PC150401.
12. Schwentner G., Kremp W., Mauritz A., Hein A., Metzger S., Rößler A. Spurenstoffelimination in den Klärwerken Böblingen-Sindelfingen und Mannheim. *Gemeindetag Baden-Württemberg.* 2013. V. 5. P.193–201 (in German).
13. Löwenberg J., Zenker A., Krahnstöver T., Böhler M., Baggenstos M., Koch G., Wintgens T. Upgrade of deep bed filtration with activated carbon dosage for compact micropollutant removal from wastewater in technical scale. *Water Res.* 2016. V. 94. P. 246–256. DOI: 10.1016/j.watres.2016.02.033.
14. Meinel F., Zietzschmann F., Ruhl A. S., Sperlich A., Jekel M. The benefits of powdered activated carbon recirculation for micropollutant removal in advanced wastewater treatment. *Water Res.* 2016. V. 91. P. 97–103. DOI: 10.1016/j.watres.2016.01.009.
15. Krahnstöver T., Wintgens Th. Separating powdered activated carbon (PAC) from wastewater – Technical process options and assessment of removal efficiency. *J. Environ. Chem. Eng.* 2018. V. 6. N 5. P. 5744–5762. DOI: 10.1016/j.jece.2018.09.001.
16. Gaydukova A.M., Nenasheva A.S., Kolesnikov V.A., Vetlugin N.A. The extraction of activated carbon from aqueous solution in the presence of organic and inorganic compounds by the electroflotation method. *J. Water Chem. Technol.* 2021. V. 43. N 2. P. 116–122. DOI 10.3103/S1063455X21020077.
17. Gaydukova A.M., Kolesnikov V.A., Brodskiy V.A., Kolesnikov A.V. Electroflotation extraction of carbon material powders in the presence of metal ions. *CIS Iron Steel Rev.* 2021. V. 22. P. 102–106. DOI: 10.17580/cisirs.2021.02.19.
18. Gaydukova A., Kolesnikov V., Stoyanova A., Kolesnikov A. Separation of highly dispersed carbon material of OU-B grade from aqueous solutions using electroflotation technique. *Separat. Purificat. Technol.* 2020. V. 245. Art. Numb. 116861. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.116861.
19. MON F 14.1:2:4.50-96. Quantitative chemical analysis of waters. Method of measuring the mass concentration of total iron in drinking, surface and wastewater by photometric method with sulfosalicylic acid. (in Russian).
20. GOST R 57164-2016. Drinking water. Methods for determining odor, taste and turbidity. (in Russian).
21. Gaydukova A., Kon'kova A., Kolesnikov V., Pokhvalitova A. Adsorption of Fe³⁺ ions onto carbon powder followed by adsorbent electroflotation. *Environ. Technol. Innovat.* 2021. V. 23. Art. Numb. 101722. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101722.
22. Vimont A., Thibault-Starzyk F., Daturi M. Analysing and understanding the active site by IR spectroscopy. *Chem. Soc. Rev.* 2010. V. 39. N 12. P. 4928–4950. DOI: 10.1039/b919543m.
23. Lamberti C., Zecchina A., Groppo E., Bordiga S. Probing the surfaces of heterogeneous catalysts by in situ IR spectroscopy. *Chem. Soc. Rev.* 2010. V. 39. N 12. P. 4951–5001. DOI: 10.1039/c0cs00117a.
24. Sokolova T.A., Alekseeva S.A. Adsorption of sulfate ions by soils (A Review). *Eurasian Soil Sci.* 2008. V. 41. N 2. P. 140–148. DOI: 10.1134/S106422930802004X.

Поступила в редакцию (Received) 26.01.2022

Принята к опубликованию (Accepted) 10.10.2022