Научная статья
УДК 546.711:542.67
EDN: PESWHS
DOI: 10.21285/2227-2917-2024-2-301-310

Комбинированное извлечения марганца при водоочистке техногенных растворов

В.И. Дударев[1]✉, Е.Г. Филатова[2], В.Н. Кульков[3]
[1,2,3]Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Для деманганации техногенных водных растворов представлен метод, основанный на электрокоагуляционной очистке водных систем от больших содержаний металлов и доизвлечения ионов марганца (II) адсорбционным способом с помощью углеродных сорбентов. Используется коагуляционная технология на электрогенерируемом гидроксиде алюминия. По данным дифрактометрических исследований такой гидроксид имеет аморфную пористую структуру гидрогеля с развитой сорбирующей поверхностью. Мицелярное строение свежегенерируемого гидроксида алюминия, отнесенного к модификации гиббсита, может быть представлено коллоидной частицей: $\{[m\ Al(OH)_3]\ nAl(OH)_2^+\ (n-x)\ OH^-\}^{x+}\ xOH^-$. Ассоциативный процесс сорбции на гиббсите идет за счет дисперсионного взаимодействия, которое осуществляется силой электростатического притяжения мгновенного и индуцированного диполей электрически нейтральных молекул сорбента и гидроксоаквакомплекса марганца $[Mn\ (OH_2)_2(OH)_2]^0$. Предельная величина адсорбции ионов марганца при 298 К и pH 5,8 составила 4,9 ммоль/г, а значение константы адсорбционного равновесия $1{,}36 \cdot 10^4$. Расход количества электричества соответствовал 12,0 А·ч при оптимальном времени электрокоагуляции 15 мин и плотности тока 1,6 мА/см^2. Доочистка водных растворов с использованием углеродных сорбентов выполняется в слабощелочной среде при pH 7,5. Величина сорбции марганца достигает 1,68 ммоль/г. Ресурсосберегающий эффект переработки техногенных гидроминеральных ресурсов достигается значительным снижением содержания солей тяжелых металлов и получением из отходов очистки воды востребованных смешанных коагулянтов сульфатов алюминия и железа. Положительным является и то, что при электрохимической очистке воды производится ее обеззараживание, улучшаются ее огранолептические показатели.

Ключевые слова: техногенные растворы, деманганация, электрокоагуляция, сорбция

***Для цитирования*:** Дударев В.И., Филатова Е.Г., Кульков В.Н. Комбинированное извлечение марганца при водоочистке техногенных растворов // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2024. Т. 14. № 2. С. 301–310. https://doi.org/10.21285/2227-2917-2024-2-301-310. EDN: PESWHS.

Original article

Combined extraction of manganese during water purification of technogenic solutions

Vladimir I. Dudarev[1]✉, Elena G. Filatova[2], Victor N. Kulkov[3]
[1,2,3]Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. A method for demanganization of technogenic aqueous solutions is presented. This method involves electrocoagulation purification of aqueous systems from high metal contents and extraction of manganese (II) ions by carbon sorbent adsorption. A coagulation technology based on electrogenerated aluminum hydroxide was used. According to diffraction analysis, such a hydroxide exhibits an amorphous porous hydrogel structure with a developed sorbing surface. The micellar structure of the as-generated aluminum hydroxide, which was attributed to a modification of gibbsite, is represented by the following colloidal particle: $\{[m\ Al(OH)_3]\ nAl(OH)_2^+\ (n-x)\ OH^-\}^{x+}\ xOH^-$. The associative process of sorption on gibbsite occurs by dispersion interaction, which is governed by the force of electrostatic attraction of

© Дударев В.И., Филатова Е.Г., Кульков В.Н., 2024

instantaneous and induced dipoles of electrically neutral sorbent molecules and the $[Mn(OH_2)_2(OH)_2]^0$ manganese hydroxo-aquo complex. The adsorption limiting value of manganese ions amounted to 4.9 mmol/g at 298 K and pH 5.8, with the adsorption equilibrium constant reaching $1.36 \cdot 10^4$. The electricity consumption corresponded to 12.0 A·h at an optimal electrocoagulation duration of 15 min and a current density of 1.6 мА/см^2. The final purification of aqueous solutions using carbon sorbents was conducted in a slightly alkaline medium at pH 7.5. The manganese sorption value reached 1.68 mmol/g. Therefore, the resource-saving effect of processing of technogenic hydro-mineral solution is manifested in a significant reduction of heavy metal salts and in obtaining of demanded mixed coagulants of aluminum and iron sulfates from water purification wastes. Another positive effect of electrochemical water purification consist in water disinfection and its improved ogranoleptic parameters.

Keywords: technogenic solutions, demanganation, electrocoagulation, sorption

For citation: Dudarev V.I., Filatova E.G., Kulkov V.N. Combined extraction of manganese during water purification of technogenic solutions. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2024;14(2):301-310. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/2227-2917-2024-2-301-310. EDN: PESWHS.

ВВЕДЕНИЕ

Методы и приемы извлечения марганца из различных природных и техногенных растворов имеют большое значение в водоподготовке для питьевого и технологического использования [1]. Как правило, для этого применяются недорогие и эффективные способы, показавшие себя, в том числе и в решении экологических проблем [2–8]. Однако, защитная роль многих действующих сооружений для очистки воды, их подземных или поверхностных источников, крайне низка. Станции водоочистки, действующие по традиционным технологиям осаждения, отстаивания, фильтрации и хлорирования не обеспечивают требования нормативных показателей по удалению многих загрязняющих и вредных примесей [9–10]. Значимая физиологическая и экологическая роль марганца, факты, указывающие на неблагоприятное политропное действие металла при его попадании в организм в значительных количествах, вызывают необходимость внимательного отношения к его присутствию в используемых водных растворах. Рекомендуемый СНИП 2.04.02-84 метод деманганации очищаемой воды с помощью перманганата калия позволяет удалять до 95 % металла[1]. Но высокий расход реактива на осаждение, дополнительный расход на окисление органических примесей при высокой цветности воды, необходимость утилизации значительных количеств осадка, приводит к тому, что применение перманганата калия для обеззараживания воды экономически нецелесообразно [10]. Исследовательские работы показали, что проблема деманганации техногенных растворов остается актуальной и востребованной [11–13]. Ресурсосберегающий и экологический эффект переработки техногенных гидроминеральных ресурсов может быть достигнут при электрохимической очистке воды [10]. Эффективным оказывается удаление марганца из воды углеродными пористыми материалами гранулированными или порошковыми углеродными сорбентами [14–17], особенно в периоды аварийных сбросов сточных вод. В этом случае решается проблема резкого ухудшения качества воды, пиковой дезодорации от запахов, привкусов, снижения замутненности и цветности воды [10]. Новые инновационные методы деманганации водных растворов можно отнести к комбинированным или гибридным приемам очистки воды [18–21]. Нами предложен двухвариантный метод, основанный на электрокоагуляционной очистке водных систем от больших содержаний металлов (поллютантов) и доизвлечения ионов марганца (II) адсорбционным методом с помощью углеродных сорбентов [22–25].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Комбинированная технология извлечения марганца представляется ресурсосберегающим способом переработки техногенных гидроминеральных ресурсов с получением востребованной товарной продукции из отходов очистки воды. Очистку технологических водных растворов от основной части ионов металлов целесообразно проводить электрокоагуляционным методом на свежеосаждаемом алюминии [22]. Для электролитического получения гидроксида алюминия использовали установку, включающую источник питания Б5-71, амперметр М-1104 и вольтметр М-243,

[1]Фрог Б.Н., Первов А.Г. Водоподготовка. М.: АСВ, 2015. 512 с.

электрохимическую ячейку объемом 100 см^3 с алюминиевыми электродами, кулонометр и реостат, термостат UNU-4. Силу тока варьировали от 4 до 160 мА при напряжении 12 В. Физико-химический исследования осадков выполняли на рентгенографическом дифрактометре D8 ADVANCE с детектором VÅNTEC-1 PSD. Остаточные количества ионов марганца доизвлекали адсорбционными приемами с использованием углеродных сорбентов [24].

Изучение адсорбционных свойств материалов проводили с использованием модельных растворов, изготовленных из солей металлов $MnSO_4 \cdot 5H_2O$ и $Fe_2(SO_4)_3$ квалификации «хч» и дистиллированной воды. Реальный состав производственных водных растворов служил основой для создания заданных концентрации модельных растворов [23, 26]. Для подготовки модельных карьерных вод использовали растворы с концентрациями ионов марганца (II) от 5 до 70 мг/м^3 и ионов железа (III) до 70 мг/дм^3. Содержание ионов металлов в растворах устанавливали по стандартным методикам [27, 28]. Для определения адсорбционных характеристик материалов применяли методы переменных концентраций (от 1 до 70 мг/дм^3) и неизменных навесок (0,1 г). В экспериментальных растворах (100 см^3) массовое соотношение жидкой и твердой фаз составляло 1:100. Численное значение величины адсорбции (A, ммоль/г) вычисляли по формуле:

$$A = (C_0 - C_{равн}) V / m$$

где C_0 и $C_{равн.}$ – исходная и равновесная концентрации металла в растворе, ммоль/дм^3, V – объем раствора, дм^3, m – масса сорбента, г. Для исключения влияния на процесс динамики перемещения ионов, опыты проводили в термостатированных условия при постоянной скорости перемешивания растворов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Применение алюминиевых электродов для электрокоагуляционной очистки воды основано на способности алюминия при пропускании постоянного электрического тока корродировать в положении анода с образованием катиона Al^{3+} и в дальнейшем переходить в свежегенерированный гидроксид $Al(OH)_3$ [22]. Дифрактометрические исследования показали, что такой гидроксид имеет аморфную пористую структуру гидрогеля с развитой сорбирующей поверхностью. Ионы тяжелых металлов активно реагируют с такой поверхностью и сорбируются благодаря разным механизмам взаимодействия [26]. Мицелярное строение генерируемого гидроксида алюминия, отнесенного к модификации гиббсита, может быть представлено коллоидной частицей: $\{[m\ Al(OH)_3] nAl(OH)_2^+ (n-x)\ OH^-\}^{x+} xOH^-$. Коагулирующее действие на такую частицу могут оказывать сульфат-ионы, присутствующие в растворах. При этом снижается заряд коллоидной частицы и сжимается двойной электрический слой. В итоге такой процесс приводит к концентрационной коагуляции за счет потери заряда указанной частицей. Коллоидные частицы гидроксида алюминия, лишенные заряда, объединяются в более крупные агрегаты по следующей схеме:

$$(Al(OH)_3)_m + (Al(OH)_3)_m + \ldots (Al(OH)_3)_m \rightarrow (Al(OH)_3)_q\downarrow$$

В свою очередь ионы марганца (II) образуют, в зависимости от кислотности водного раствора, ряд мультизаряженных гидроксоаквакомплексов [29]. В частности, в слабощелочной среде существует нейтральный комплекс $[Mn\ (OH_2)_2(OH)_2]^0$, имеющий константу устойчивости 18,5 [27]. Вероятно, именно с ним происходит ассоциативный процесс сорбции на гиббсите за счет дисперсионного взаимодействия, осуществляемого силой электростатического притяжения мгновенного и наведенного индукцией диполей электрически нейтральных молекул. На рис. 1 представлены кинетические кривые сорбционного процесса при разной кислотности среды.

Анализ полученных результатов показывает, что максимальная сорбция наблюдается при pH 5,8 и составляет 150 мг/г ионов марганца (II). Это количество хорошо согласуется с массой растворенного алюминия на аноде. Также происходит заметное увеличение pH растворов в интервале кислотности среды от 4,5 до 8,5.

Вероятно, что такое снижение концентрации катионов водорода происходит потому, что в этой области pH преобладают положительно заряженные гидроксокомплексы, образующиеся по схеме:

$$Al(OH)_3 + H^+ = Al(OH)^{2+} + H_2O + OH^-$$

Образование и накопление гидроксид ионов приводит к проявлению наблюдаемого эффекта. Вместе с тем, такой процесс ускоряет старение коагулянта, приводящее к самопроизвольному увеличению пассивности системы к проявлению поверхностных явлений и, следовательно, адсорбция замедляется.

В ходе электрокоагуляционной обработки исследуемых растворов установлено, что в начальный период 15 мин процесса концентрация ионов марганца (II) уменьшается примерно на 70 %, а в следующие 15 мин всего на 10 %.

Полученные при этом изотермы адсорбции имеют выраженный ступенчатый характер. С ростом температуры величина максимального извлечения марганца возрастает.

Это может быть объяснено увеличением доступности внутренней поверхности сорбента ввиду пептизации гидроксида алюминия.

Возрастание адсорбируемости в таком случае может быть связано со степенью ассоциированности ионов, образующих мицеллу [30].

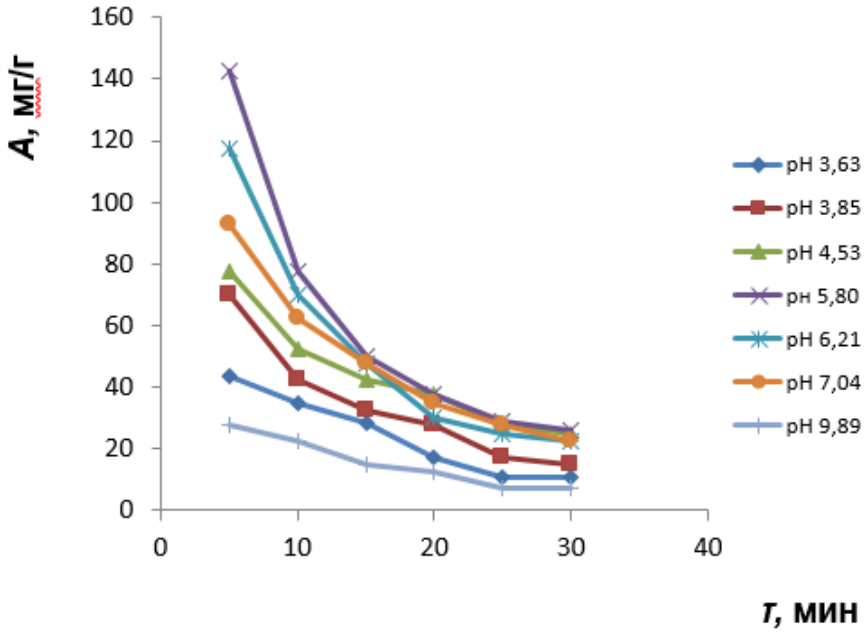

Рис. 1. Кинетические кривые адсорбции ионов марганца (II) при различной кислотности среды
Fig. 1. Kinetic adsorption curves of maraghanes (II) ions with different acidity of the environment

В целом изотермы адсорбции могут быть описаны с помощью модели Лэнгмюра [25]. Ступенчатый характер изотерм в теории мономолекулярной адсорбции объясняется тем, что на неоднородной поверхности свежегенерированного гидроксида алюминия появляются группы активных центров, резко отличающихся друг от друга по своей адсорбционной способности.

Молекулярные агрегаты $Al(OH)_3$ с цепочечной структурой шарообразной формы можно отнести к ним. Наличие похожих неоднородных активных центров сорбции служит основной причиной увеличения адсорбции ионов марганца (II) при нагревании [22].

Кроме того, рост скорости процессов коагуляции гидроксида алюминия и образование большого количества коагулянта с возрастанием температуры также приводят к росту величины адсорбции. Представление изотерм адсорбции в линейной форме уравнения Лэнгмюра $c/A=f(c)$ позволило выполнить термодинамические расчеты адсорбционного процесса (рис. 2). Так значение константы адсорбционного равновесия составило $1{,}36 \cdot 10^4$, а предельная величина адсорбции ионов марганца при 298 К – 4,9 ммоль/г. Параметры, характеризующие изменения энтальпии адсорбции и свободной энергии Гиббса, представлены в таблице. Анализ результатов свидетельствует, что с увеличением температуры силы адсорбционного процесса возрастают.

На экзотермический характер процесса указывают отрицательные значения энтальпии, а отрицательная величина энтропии на то, что при адсорбции происходит упорядочение ионов металлов на поверхности адсорбента. Однако с повышением температуры такая упорядоченность снижается.

Анодное поведение алюминия зависит от структуры и природы электрода, от состава электролита, плотности тока и величины поляризации.

Изучение поляризационных кривых растворения алюминия в модельных водных растворах показало, что при малых плотностях тока пассивация алюминиевой поверхности не происходит и оптимальной является плотность тока 1,6 мА/см^2.

Минимальный удельный расход алюминия, необходимый для удаления 1 г марганца (II) из модельных карьерных вод, определенный на основании закона Фарадея, составил 4,0 г.

При этом расход количества электричества соответствовал 12,0 А·ч для оптимального времени электрокоагуляции 15 мин.

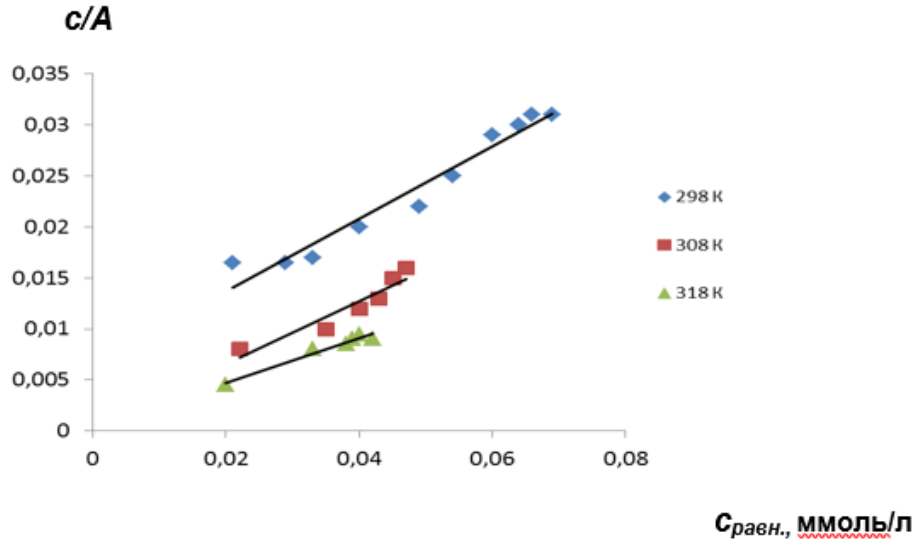

Рис. 2. Изотермы адсорбции в линейных координатах уравнения Лэнгмюра при температурах процесса 298 К, 308 К и 318 К: А – величина адсорбции, моль/г; с – концентрация раствора, мг/л
Fig. 2. Adsorption isotherms in linear coordinates of the Langmuir equation at process temperatures of 298 K, 308 K and 318 K: A – adsorption value, mol/g; c is the concentration of the solution, mg/l

Характерные термодинамические параметры адсорбции ионов марганца (II) R^2=0,97)
Characteristic thermodynamic parameters of manganese (II) ion adsorption (R^2=0.97)

Температура, К	**Константа адсорбционного равновесия, $K \cdot 10^{-4}$**	**Изменение энтальпии ΔH, кДж/моль**	**Изменение энтропии ΔS, Дж/(моль·К)**	**Свободная энергия Гиббса ΔG^0, кДж/моль**
298	1,36	-26,79	-10,77	-23,58
308	1,28	-26,29	-6,73	-24,22
318	1,26	-25,93	-3,08	-24,95

Для достижения предельно допустимых концентраций ионов марганца (II) в очищенных водах нами разработан процесс доизвлечения металла с использованием углеродных сорбентов [25]. Очистка выполняется в слабо-щелочной среде при pH 7,5. Величина сорбции марганца достигает 1,68 ммоль/г. Десорбция и регенерация углеродного сорбента выполняется разбавленным раствором серной кислоты. Получаемый в результате комбинированной электрофлотационной и углеадсорбционной очистки металлсодержащий технологический шлам является ценным сырьевым материалом. Шламовый осадок может быть переработан кислотным растворением и дальнейшим последовательным осаждением, чтобы стать востребованной в процессах водоочистки товарной продукцией. На одном только карьерном водохранилище Коршуновского горно-обогатительного комбината может быть получено ежегодно до 150 т смешанных коагулянтов в виде сульфатов алюминия и железа, а также 30 т диоксида марганца [23]. Положительным эффектом представленной технологии очистки воды является и то, что при электрохимической очистке воды производится ее обеззараживание, улучшаются органолептические показатели, значительно снижается содержание солей тяжелых металлов. Эффективность очистки загрязненных водных растворов при электрокоагуляционной обработке составляет 90 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Коагуляционная технология деманганации техногенных водных растворов основана на применении электрогенерируемого гидроксида алюминия, имеющего аморфную пористую структуру гидрогеля с развитой сорбирующей поверхностью. Мицелярное строение свежегенерируемого гидроксида алюминия, отнесенного к модификации гиббсита, может быть представлено коллоидной частицей: $\{[m\ Al(OH)_3]\ nAl(OH)_2^+\ (n-x)\ OH^-\}^{x+}\ xOH^-$. Процесс очистки объясняется явлением сорбции поллютанта на гиббсите за счет дисперсионного взаимодействия. Предельная величина

адсорбции ионов марганца при 298 К и pH 5,8 составила 4,9 ммоль/г, а значение константы адсорбционного равновесия $1{,}36 \cdot 10^4$. Расход количества электричества соответствовал 12,0 А·ч при оптимальном времени электрокоагуляции 15 мин и плотности тока 1,6 мА/см^2. Эффективность очистки загрязненных водных растворов при электрокоагуляционной обработке составляет 90 %. Доочистка водных растворов с использованием углеродных сорбентов выполняется в слабощелочной среде при pH 7,5. Величина сорбции марганца достигает 1,68 ммоль/г.

Особенностью комбинированной технологии извлечения марганца из водных растворов является возможность избежать вторичного загрязнения очищаемых водных растворов вносимыми регентами.

Положительным является и то, что при электрохимической очистке воды производится ее обеззараживание, улучшаются ее огранолептические показатели.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ястребов К.Л., Дружинина Т.Я., Надршин В.В., Карлина А.И. Подготовка и очистка природных и сточных вод. Иркутск: Иркутский государственный технический университет, 2014. 564 с. EDN: TJNFUX.
2. Jerroumi S., Amarine M., Gourich B. Technological trends in manganese removal from groundwater: A review // Journal of Water Process Engineering. 2023. Vol. 56. Iss. 12. P. 1–23. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104365.
3. Alvarez-Bastida C., Martínez-Miranda V., Solache-Ríos M., Linares-Hernández I, Teutli-Sequeira A., Vázquez-Mejía G. Drinking Water Characterization and Removal Of Manganese. Removal Of Manganese from Water // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2018. Vol. 6. Iss. 2. P. 2119–2125. https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.03.019.
4. Иванова Л.А., Беляева О.В., Гора Н.В., Угарова И.М., Голубева Н.С. Анализ эффективности методов очистки сточных вод угольной промышленности от ионов железа и марганца // Уголь. 2023. № 11. С. 81–87. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-11-81-87. EDN: LDYBYC.
5. Niksirat M., Sadeghi R., Esmaili J. Removal of Mn from Aqueous Solutions, By Activated Carbon Obtained from Tire Residuals // SN Applied Sciences. 2019. Vol. 1. P. 1–12. https://doi.org/10.1007/s42452-019-0797-5.
6. Гора Н.В., Беляева О.В., Голубева Н.С., Горелкина А.К., Тимощук И.В., Иванова Л.А. Анализ способов повышения эффективности процесса обезжелезивания природных вод сорбционными методами // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 1 (127). С. 1–7. https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.44. EDN: AWERRK.
7. Моль Ж. Подготовка питьевой воды в XXI веке // Водоснабжение и санитарная техника. 1999. № 1. С. 14−15.
8. Filatova E.G. Optimization of Electrocoagulation Technology of Purifying Wastewaters of Ions of Heavy Metals // Journal of Water Chemistry and Technology. 2016. Vol. 38. Iss. 3. P. 167–172. https://doi.org/10.3103/S1063455X16030085.
9. Янин Е.П., Кузьмич В.Н., Иваницкий О.М. Региональная природная неоднородность химического состава поверхностных вод суши и необходимость ее учета при оценках их экологического состояния и интенсивности техногенного загрязнения // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2016. № 6. С. 3–72. EDN: WBALCN.
10. Дударев В.И., Минаева Л.А., Филатова Е.Г. Аналитический обзор методов очистки природных и технологических вод от марганца: монография. Иркутск: Иркутский государственный технический университет, 2013. 124 с. EDN: TJNFML.
11. Trus I. Optimal Conditions of Ion Exchange Separation of Anions in Low-Waste Technologies of Water Desalination // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2022. Vol. 57. Iss. 3. P. 550–558. EDN: TVIJLM.
12. Rajoria S., Vashishtha M., Sangal V.K. Treatment of Electroplating Industry Wastewater: A Review On the Various Techniques // Environmental Science and Pollution Research. 2022. Vol. 29. P. 72196–72246. https://doi.org/10.1007/s11356-022-18643-y.
13. Пат. 2755988, Российская Федерация, C02F9/00, C02F9/12, C02F1/463, C02F1/32, C02F1/48, B01D61/14. Способ очистки сточных вод / С.И. Сапега, В.Н. Дигин; заявитель и патентообладатель Сапега С.И., Дигин В.Н. Заявл. 10.03.2021; опубл. 23.09.2021.
14. Дедюхина Е.М., Дылгирова В.А., Аполлонова В.С. Очистка карьерных сточных вод от ионов железа // Заметки ученого. 2020. № 12. С. 83–87. EDN: PENWCE.
15. Niksirat M., Sadeghi R., Esmaili J. Removal of Mn from Aqueous Solutions, By Activated Carbon Obtained from Tire Residuals // SN Applied Sciences. 2019. Vol. 1. P. 1–12. https://doi.org/10.1007/s42452-019-0797-5.

16. Краснова Т.А., Беляева Е.Е., Беляева О.В., Гора Н.В., Иванова Л.А. Использование углеродных сорбентов для удаления марганца из водных сред // Водоснабжение и санитарная техника. 2022. № 7. С. 18–24. https://doi.org/10.35776/VST.2022.07.03. EDN: OPPBQZ.
17. Тимощук И.В., Горелкина А.К., Иванова Л.А., Просеков А.Ю., Латохин В.А. К вопросу о возможности использования адсорбции при очистке карьерных сточных вод // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2021. № 3. С. 59–63. EDN: BCZQVT.
18. Krasnova T.A., Gora N.V., Belyaeva O.V., Gorelkina A.K., Golubeva N.S., Timoshchuk I.V. The Use of Semi-Coke for Phenol Removal from Aqueous Solutions // Carbon Letters. 2021. Vol. 31 P. 1023–1032. https://doi.org/10.1007/s42823-020-00216-z.
19. Гайдукова А.М., Колесников В.А., Похвалитова А.А. Очистка сточных вод гальванического производства от ионов металлов с применением сорбции в статическом режиме и электрофлотации // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 4. С. 160–166. https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-4-160-166. EDN: EMPPDT.
20. Jebur M., Yu-Hsuan Chiao, Kupaaikekaiao Th., Tanmoy Patra, Yuhe Cao, Kyunghoan Lee [et al.] Combined Electrocoagulation-Microfiltration-Membrane Distillation for Treatment of Hydraulic Fracturing Produced Water // Desalination. 2021. Vol. 500. P. 1–12. https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114886.
21. Salahshoori I., Seyfaee A., Babapoor A., Cacciotti I. Recovery of Manganese Ions from Aqueous Solutions with Cyanex 272 Using Emulsion Liquid Membrane Technique: A Design of Experiment Study // Journal of Sustainable Metallurgy. 2021. Vol. 7. P. 1074–1090. https://doi.org/10.1007/s40831-021-00396-6.
22. Веденяпина М.Д., Курмышева А.Ю., Кулайшин С.А., Кряжев Ю.Г. Адсорбция некоторых тяжелых металлов на активированных углях (обзор) // Химия твердого топлива. 2021. № 2. С. 18–41. https://doi.org/10.31857/S0023117721020092. EDN: UOOLVP.
23. Филатова Е.Г., Дударев В.И. Оптимизация электрокоагуляционной очистки сточных вод гальванических производств. Иркутск: Иркутский государственный технический университет, 2013. 140 с. EDN: TJNHKV.
24. Дударев В.И., Минаева Л.А., Филатова Е.Г., Саламатов В.И. Электрокоагуляционное извлечение марганца из производственных вод обогатительного комбината // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 1. С. 194–201. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-194-201. EDN: YMMWIS.
25. Дударев В.И., Минаева Л.А. Современные методы деманганации природных и сточных вод // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2014. № 5. С. 76–81. EDN: TCTUFT.
26. Дударев В.И., Минаева Л.А. Применение углеродных сорбентов для извлечения марганца из растворов // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2024. Т. 14. № 1. С. 35–40. https://doi.org/10.21285/achb.897. EDN: NNHBMP.
27. Чугунов А.Д., Филатова Е.Г. Тяжелые металлы: химические вопросы экологической безопасности. Монография. Иркутск: Иркутский национально-исследовательский технический университет, 2024. 180 с.
28. Лаврухина А.К., Юкина Л.В. Аналитическая химия марганца. М.: Наука, 1974. 230 с.
29. Марченко З. Фотометрическое определение элементов. М.: Мир, 1971. 502 с.
30. Курдюмов В.Р., Тимофеев К.Л., Мальцев Г.И., Лебедь А.Б. Сорбционное извлечение ионов никеля (II) и марганца (II) из водных растворов // Записки Горного института. 2020. Т. 242. С. 209–2018. http://doi.org/10.31897/PMI.2020.2.209. EDN: WOJCRR.

REFERENCES

1. Yastrebov K.L., Druzhinina T.Ya., Nadrshin V.V., Karlina A.I. *Preparation and Purification of Natural and Waste Waters*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University, 2014. 564 p. (In Russ.). EDN: TJNFUX.
2. Jerroumi S., Amarine M., Gourich B. Technological Trends in Manganese Removal from Groundwater: A Review. *Journal of Water Process Engineering*. 2023;56(12):1-23. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104365.
3. Alvarez-Bastida C., Martínez-Miranda V., Solache-Ríos M., Linares-Hernández I, Teutli-Sequeira A., Vázquez-Mejía G. Drinking Water Characterization and Removal Of Manganese. Removal Of Manganese from Water. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2018;6(2):2119-2125. https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.03.019.
4. Ivanova L.A., Belyaeva O.V., Gora N.V., Ugarova I.M., Golubeva N.S. Efficiency Analysis of Methods to Remove Iron and Manganese Ions from Coal Industry Waste Water. *Ugol' = Russian Coal Journal.* 2023;11:81-87. (In Russ.). https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-11-81-87. EDN: LDYBYC.
5. Niksirat M., Sadeghi R., Esmaili J. Removal of Mn from Aqueous Solutions, By Activated Carbon Obtained from Tire Residuals. *SN Applied Sciences*. 2019;1:1-12. https://doi.org/10.1007/s42452-019-0797-5.
6. Gora N.V., Belyaeva O.V., Golubeva N.S., Gorelkina A.K., Timoshchuk I.V., Ivanova L.A. An Analysis of Ways to Improve the Efficiency of Natural Water Deferrization by Sorption Methods. *Mezhdunarodnyi nauchno-*

issledovatel'skii zhurnal = International Research Journal. 2023;1(127):1-7. (In Russ.). https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.44. EDN: AWERRK.
7. Mol' Zh. Preparation of Drinking Water in The 21st Century. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water Supply and Sanitary Technique.* 1999;1:14−15. (In Russ.).
8. Filatova E.G. Optimization of Electrocoagulation Technology of Purifying Wastewaters of Ions of Heavy Metals. *Journal of Water Chemistry and Technology*. 2016;38(3):167-172. https://doi.org/10.3103/S1063455X16030085.
9. Yanin E.P., Kuz'mich V.N., Ivanitskii O.M. Regional Natural Heterogeneity of the Chemical Composition of Land Surface Waters and The Need to Take It into Account When Assessing Their Ecological State and The Intensity of Technogenic Pollution. *Problemy okruzhayushchei sredy i prirodnykh resursov = Environmental and Natural Resource Issues*. 2016;6:3-72. (In Russ.). EDN: WBALCN.
10. Dudarev V.I., Minaeva L.A., Filatova E.G. *Analytical Review of Methods for Purifying Natural and Process Waters from Manganese: Monograph.* Irkutsk: Irkutsk State Technical University, 2013. 124 p. (In Russ.). EDN: TJNFML.
11. Trus I. Optimal Conditions of Ion Exchange Separation of Anions in Low-Waste Technologies of Water Desalination. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2022;57(3):550-558. EDN: TVIJLM.
12. Rajoria S., Vashishtha M., Sangal V.K. Treatment of Electroplating Industry Wastewater: A Review On the Various Techniques. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022;29:72196-72246. https://doi.org/10.1007/s11356-022-18643-y.
13. Sapega S.I., Digin V.N. *Waste Water Purification Method*. Patent RF, no. 2755988; 2021. (In Russ.).
14. Dedyukhina E.M., Dylgirova V.A., Apollonova V.S. Purification of Quarry Waste Water from Iron Ions. *Zametki uchenogo = Scientist's Notes*. 2020;12:83-87. (In Russ.). EDN: PENWCE.
15. Niksirat M., Sadeghi R., Esmaili J. Removal of Mn from Aqueous Solutions, By Activated Carbon Obtained from Tire Residuals. *SN Applied Sciences*. 2019;1:1-12. https://doi.org/10.1007/s42452-019-0797-5.
16. Krasnova T.A., Belyaeva E.E., Belyaeva O.V., Gora N.V., Ivanova L.A. The Use of Carbon Sorbents to Remove Manganese from Aqueous Media. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water Supply and Sanitary Technique.* 2022;7:18-24. (In Russ.). https://doi.org/10.35776/VST.2022.07.03. EDN: OPPBQZ.
17. Timoshchuk I.V., Gorelkina A.K., Ivanova L.A., Prosekov A.Yu., Latokhin V.A. On The Issue of Possibility to Use Adsorption While the Open-Cast Mine Wastewater Treatment. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noi promyshlennosti = Vestnik of Safety in Coal Mining Scientific Center.* 2021;3:59-63. (In Russ.). EDN: BCZQVT.
18. Krasnova T.A., Gora N.V., Belyaeva O.V., Gorelkina A.K., Golubeva N.S., Timoshchuk I.V. The Use of Semi-Coke for Phenol Removal from Aqueous Solutions. *Carbon Letters*. 2021;31:1023-1032. https://doi.org/10.1007/s42823-020-00216-z.
19. Gaydukova A.M., Kolesnikov V.A., Pokhvalitova A.A. Treatment of Electroplating Wastewater from Metal Ions with The Use of Sorption in Static Mode and Electroflotation. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya = Theoretical and Applied Ecology.* 2021;4:160-166. (In Russ.). https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-4-160-166. EDN: EMPPDT.
20. Jebur M., Yu-Hsuan Chiao, Kupaaikekaiao Th., Tanmoy Patra, Yuhe Cao, Kyunghoan Lee [et al.] Combined Electrocoagulation-Microfiltration-Membrane Distillation for Treatment of Hydraulic Fracturing Produced Water. *Desalination.* 2021;500:1-12. https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114886.
21. Salahshoori I., Seyfaee A., Babapoor A., Cacciotti I. Recovery of Manganese Ions from Aqueous Solutions with Cyanex 272 Using Emulsion Liquid Membrane Technique: A Design of Experiment Study. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2021;7:1074-1090. https://doi.org/10.1007/s40831-021-00396-6.
22. Vedenyapina M.D., Kurmysheva A.Y., Kulaishin S.A., Kryazhev Y.G. Adsorption of Heavy Metals On Activated Carbons (A Review). *Khimiya tverdogo topliva = Solid Fuel Chemistry*. 2021;2:18-41. (In Russ.). https://doi.org/10.31857/S0023117721020092. EDN: UOOLVP.
23. Filatova E.G., Dudarev V.I. *Optimization of Electrocoagulation Wastewater Treatment of Galvanic Industries.* Irkutsk: Irkutsk State Technical University, 2013. 140 p. (In Russ.). EDN: TJNHKV.
24. Dudarev V.I., Minaeva L.A., Filatova E.G., Salamatov V.I. Electrocoagulation Extraction of Manganese from Processing Plant Industrial Water. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University.* 2018;22(1):194-201. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-194-201. EDN: YMMWIS.
25. Dudarev V.I., Minaeva L.A. Modern Methods of Natural Water and Sewage Demanganization. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2014;5:76-81. (In Russ.). EDN: TCTUFT.
26. Dudarev V.I., Minaeva L.A. Use of Carbon Sorbents to Extract Manganese from Solutions. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2024;14(1):35-40. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/achb.897. EDN: NNHBMP.

27. Chugunov A.D., Filatova E.G. *Heavy Metals: Chemical Environmental Issues Security. Monograph.* Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University, 2024. 180 p. (In Russ.).
28. Lavrukhina A.K., Yukina L.V. *Analytical Chemistry of Manganese*. Moscow: Nauka, 1974. 230 p. (In Russ.).
29. Marchenko Z. *Photometric Determination of Elements*. Moscow: Mir, 1971. 502 p. (In Russ.).
30. Kurdyumov V.R., Timofeev K.L., Mal'tsev G.I., Lebed' A.B. Sorption of Nickel (II) and Manganese (II) Ions from Aqueous Solutions. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2020;242:209-2018. (In Russ.). http://doi.org/10.31897/PMI.2020.2.209. EDN: WOJCRR.

Информация об авторах

Дударев Владимир Иванович,
д.т.н, профессор,
профессор кафедры химии и биотехнологии
им. В.В. Тутуриной,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
✉e-mail: vdudarev@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-2378-7574
Author ID: 676659

Филатова Елена Геннадьевна,
к.т.н, доцент,
доцент кафедры химии и биотехнологии
им. В.В. Тутуриной,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Россия,
e-mail: efila@list.ru
https://orcid.org/0000-0002-8704-7455
Author ID: 461353

Кульков Виктор Николаевич,
д.т.н., профессор,
профессор кафедры инженерных коммуникаций
и систем жизнеобеспечения,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Россия,
e-mail: kulkof.viktor@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0003-3838-0777
Author ID: 730720

Information about the authors

Vladimir I. Dudarev,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Chemistry
and Biotechnology named after V.V. Tuturina,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
✉e-mail: vdudarev@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-2378-7574
Author ID: 676659

Elena G. Filatova,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Chemistry
and Biotechnology named after V.V. Tuturina,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russia,
e-mail: efila@list.ru
https://orcid.org/0000-0002-8704-7455
Author ID: 461353

Victor N. Kulkov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Urban
Construction and Economy,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russia,
e-mail: kulkof.viktor@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0003-3838-0777
Author ID: 730720

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 25.03.2024.
Одобрена после рецензирования 11.04.2024.
Принята к публикации 12.04.2024.

Information about the article

The article was submitted 25.03.2024.
Approved after reviewing 11.04.2024.
Accepted for publication 12.04.2024.