

Научная статья
УДК 66.067.8.081.3+66.011
EDN: JNCAFG
DOI: 10.21285/achb.923



Закономерности сорбции катионов ртути лигниносерным сорбентом

В.С. Асламова*✉, Е.А. Головкова**, Е.А. Шнейгельбергер***, А.А. Асламов**

*Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Российская Федерация

**Ангарский государственный технический университет, Ангарск, Российская Федерация

***ООО «Сибирский стандарт-экология», Иркутск, Российская Федерация

Аннотация. Неблагоприятная экологическая обстановка в городе Усолье-Сибирском Иркутской области обуславливает актуальность исследования и применения нового лигниносерного сорбента для очистки грунтовых вод от соединений ртути. Сорбент синтезирован на основе отходов производства эпихлоргидрина (1,2,3-трихлорпропана), серы и лигнина. В инфракрасном спектре использованного сорбента идентифицируется связь S–S в области 445–465 см⁻¹. Наблюдается интенсивное поглощение ионов Hg²⁺ в области 2800–2950 см⁻¹ (валентные колебания связей C–H в группах CH и CH₂) и 1460 см⁻¹ (деформационные колебания в группе CH₂). Поглощение ионов Hg²⁺ фрагментами лигнина сопровождается изменением полосы колебаний связей S–S, которая расщепляется на две полосы с более высокими частотами, чем полоса ν_{S–S} в исходном сорбенте. Оптимальное содержание серы, обеспечивающее максимальную сорбционную активность сорбента, составляет 53,25%. Изотермы сорбции ртути при 20 и 60 °C описываются параболическими зависимостями с коэффициентами детерминации 98,9 и 98,6% соответственно. Кинетическая кривая при 20 °C аппроксимируется гиперболой, при 40 °C – кубическим полиномом с коэффициентами детерминации 97,9 и 96,2% соответственно. Определены порядок (при 20 °C – первый, при 40 °C – второй) и константа скорости реакции (при 20 °C – 0,0876 мин⁻¹, при 40 °C – 0,00014 мин⁻¹). Отмечено, что скорость сорбции Hg²⁺ при температуре 20 °C существенно выше, а время сорбции меньше, чем при температуре 40 °C, поэтому сорбцию ртути предлагаемым сорбентом следует проводить при 20 °C, что позволит снизить энергозатраты.

Ключевые слова: сорбция, лигниносерный сорбент, ртуть, регрессионная модель

Для цитирования: Асламова В.С., Головкова Е.А., Шнейгельбергер Е.А., Асламов А.А. Закономерности сорбции катионов ртути лигниносерным сорбентом // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2024. Т. 14. N 2. С. 275–284. DOI: 10.21285/achb.923 EDN: JNCAFG.

CHEMICAL TECHNOLOGY

Original article

Regularities in mercury cation sorption by a lignin-based sulfur-containing sorbent

Vera S. Aslamova*✉, Elena A. Golovkova**,
Evgenia A. Shneygelberger***, Alexander A. Aslamov**

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

**Angarsk State Technical University, Angarsk, Russian Federation

***LLC “Siberian Standard-Ecology”, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. The unfavorable environmental situation in the town of Usolye-Sibirskoye (Irkutsk Oblast, Russia) determines the relevance of investigating and applying a new lignin-based sulfur-containing sorbent for purification of groundwater from mercury compounds. The sorbent was synthesized on the basis of waste products of epichlorohydrin

© Асламова В.С., Головкова Е.А., Шнейгельбергер Е.А., Асламов А.А., 2024

(1,2,3-trichloropropane), sulfur, and lignin. The IR spectrum of the sorbent under study showed the presence of an S–S bond in the region of 445–465 cm^{-1} . Intensive absorption of Hg^{2+} ions in the regions of 2800–2950 cm^{-1} (valence vibrations of C–H bonds in CH and CH_2 groups) and 1460 cm^{-1} (deformation vibrations in CH_2 group) was observed. Absorption of Hg^{2+} ions by lignin fragments was accompanied by a change in the vibration band of S–S bonds, which splits into two bands of higher frequencies than the $\nu_{\text{S-S}}$ band in the original sorbent. The optimum sulfur content, which ensures the maximum sorption activity of the sorbent, was found to be 53.25%. The mercury sorption isotherms at 20 and 60 °C are described by parabolic dependencies with determination coefficients of 98.9 and 98.6%, respectively. The kinetic curve at 20 °C and 40 °C is approximated by a hyperbola and a cubic polynomial with determination coefficients of 97.9 and 96.2%, respectively. The reaction order (first order at 20 °C and second order at 40 °C) and the reaction rate constant (0.0876 min^{-1} at 20 °C and 0.00014 min^{-1} at 40 °C) were determined. At 20 °C, the sorption rate of Hg^{2+} was established to be significantly higher and the sorption time to be faster than those at 40 °C. Therefore, mercury sorption by the proposed sorbent should be carried out at 20 °C in order to reduce energy consumption.

Keywords: sorption, lignin sulfur sorbent, mercury, regression model

For citation: Aslamova V.S., Golovkova E.A., Shneygelberger E.A., Aslamov A.A. Regularities in mercury cation sorption by a lignin-based sulfur-containing sorbent. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2024;14(2):275-284. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.923. EDN: JNCAFG.

ВВЕДЕНИЕ

Деятельность современного человека связана с образованием значительного количества отходов, в том числе сточных вод. Наиболее опасными являются сточные воды, которые включают ионы тяжелых металлов, таких как, ртуть, кадмий, никель, свинец, цинк, кобальт, медь и многие другие, которые представляют большую угрозу для окружающей среды и здоровья человека. В сточных водах гальванических производств Иркутской области концентрации тяжелых металлов (ртути, меди, кадмия, железа, цинка и др.) составляют 0,5–1,0 г/л, что в десятки – сотни раз превосходит предельно допустимые концентрации [1].

Главными техногенными источниками загрязнения окружающей среды ртутью в Иркутской области являются сточные воды электрохимической, нефтехимической, химической, гидрометаллургической, горно-обогатительной и машиностроительной промышленности, выхлопные газы теплоэлектростанций, работающих на угле [1]. Ртуть, относящаяся к отходам первого класса опасности, в свою очередь, является тиоловым ядом и влияет на функционирование нервной, иммунной и выделительной систем, блокирует ферментативную деятельность и белковый обмен живых организмов [2–5].

Сложившаяся экологическая обстановка в городе Усолье-Сибирском Иркутской области выдвигает в ряд первоочередных задач применение новых эффективных сорбентов для очистки грунтовых вод от соединений ртути, так как, по словам заместителя председателя правительства Иркутской области Г. Кузьмина, на промышленной площадке бывшего комбината «Усольехимпром», закрытого еще в 2005 г., ртуть проникла на глубину до 8 м. Следует отметить, что за годы действия цеха ртутного электролиза (1970–1988 гг.) объем поступления ртути в окружающую среду составил 1396 т [6], значительная же ее часть оказалась в донных отложениях Братского водохранилища [7–9].

Существуют разнообразные технологии очистки сточных вод, при этом одним из наиболее эффективных по отношению к соединениям тяжелых металлов по праву считается метод адсорбции, при котором степень очистки сточных вод от тяжелых металлов достигает 85–99%. Сорбция обеспечивает наибольшее извлечение токсичных ионов тяжелых металлов, в особенности из

растворов с малой концентрацией [10]. Эффективность сорбции зависит прежде всего от используемого сорбента. В качестве сорбентов применяют активированный уголь [11], гидрофильные углеродные наночастицы, нанесенные на шарики диоксида кремния [12], сшитые хитозаны, синтезированные гомогенной реакцией хитозана с эпихлоргидрином в водном растворе уксусной кислоты [13], с трифосфатом и эпихлоргидрином за счет ионной и ковалентной сшивки [14], хлопковые сорбенты, полученные термической, физической и химической модификацией их поверхности [15], нанокompозиты карбоксиметилцеллюлозы, хитозана, лигнина и альгината [16], цеолиты [17, 18], ионообменные смолы [19] и т.д. Тем не менее следует отметить, что многие из перечисленных сорбентов не обеспечивают достаточную степень извлечения тяжелых металлов, являются дорогостоящими, имеют низкую механическую прочность, склонны к слеживанию, трудно утилизируются после использования. Большинство тяжелых металлов относится к тиофильным элементам, адсорбция которых на активированном угле также недостаточно эффективна [11].

Для достижения качественной очистки металлосо-держающих сточных вод актуальным является создание сорбентов с хорошими адсорбционными характеристиками, удобных в применении, дешевых и имеющих достаточную механическую прочность. В связи с этим перспективным направлением создания сорбентов для извлечения ионов тяжелых металлов из сточных вод может служить применение отходов других производств, например древесных опилок, бентонитовых глин [20], лигнина [21].

Одним из многотоннажных отходов гидролизной и целлюлозно-бумажной промышленности является сетчатый полимер лигнин, утилизация которого также очень важна с экологической точки зрения, так как его значительные запасы представляют экологическую угрозу для окружающей среды. Лигнин имеет очень сложную пористую структуру и неплохие емкостные характеристики, что обеспечивает экономическую целесообразность его применения для получения различного рода сорбционных материалов, в том числе активированного угля. Этот процесс крайне энергозатратен, так как протекает при высоких температурах с большим количеством выбросов вредных

веществ в атмосферу и, как правило, с низким выходом целевого продукта. В то же время на основе лигнина могут быть получены сорбенты, содержащие сернистые функции, чем обеспечивается их сродство к тиофильным металлам [22].

Большую эффективность очистки обеспечивают сорбенты, содержащие атомы серы, с участием которых происходит связывание ионов металлов по комплексообразующему механизму [17, 18, 22–29].

Ввиду вышесказанного целью нашей работы являлось проведение исследования и регрессионного анализа закономерностей сорбции катионов Hg^{2+} из водных растворов сорбентом, созданным на основе лигнина, отходов производств металлургии, нефтехимии (сера) и эпихлоргидрина (1,2,3-трихлорпропан).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Способ синтеза серосодержащего сорбента подробно описан в работах [22, 27]. Для подтверждения сетчатой структуры образовавшихся сорбентов был использован метод инфракрасной спектроскопии¹. Инфракрасные спектры образцов сорбентов записывались на спектрометре Bruker IFS25 HR (Bruker, Германия) в таблетках с KBr. Для регистрации была использована область с диапазоном частот 400–4000 см^{-1} .

Для исследования термодинамических и кинетических характеристик сорбента использовались модельные растворы ($\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ или HgCl_2) с различной начальной концентрацией Hg^{2+} . Значение величины сорбции A , мг/г, оценивались по формуле

$$A = V(C_0 - C_k)/m,$$

где V – объем раствора, мл; C_0 , C_k – концентрации катионов металлов в растворе, измеренные в начале и по окончании сорбции, мг/мл; m – масса сорбента, г.

Остаточную концентрацию катионов Hg^{2+} в растворе определяли фотометрическим методом анализа на фотокolorиметре КФК-3-«ЗОМЗ» (Загорский оптико-механический завод, Россия) [30].

При каждом значении C_0 выполняли не менее 3–5 опытов при температуре 20, 40, 60 °С и $\text{pH} = 3$, так как в таких условиях величина сорбции катионов ртути максимальна [28]. В случае отклонения результатов опыта более чем на 10% проводились добавочные исследования. Точки, изображенные на составленных по результатам проведенной работы графиках, являются среднеарифметическими значениями опытных данных.

На уровне погрешности измерений тепловые эффекты при сорбции Hg^{2+} разработанным сорбентом не наблюдались. Для более четкой регистрации тепловых эффектов понадобится термостатированное оборудование с измерительной аппаратурой повышенного класса точности. В связи с этим с позиции инженерной достаточности считаем реакцию сорбции изотермической, протекающей с незначительным изменением температуры.

Регрессионный анализ сорбционных характеристик сорбента выполнялся с помощью пакета Statgraphics Plus. Об адекватности полученных регрессий судили по следующим критериям: коэффициенту детерминации R^2 , иллюстрирующему процент экспериментальных

данных, описываемых моделью; скорректированному коэффициенту детерминации R_c^2 , который используется для оценки тесноты связи между переменными (зависимой и независимой). Отсутствие автокорреляции устанавливали по коэффициенту Дарбина-Уотсона DW , для оценки точности модели использовали абсолютную и среднеквадратическую ошибки Δ и σ соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис.1 представлен ИК-спектр серосодержащего сорбента, насыщенного катионами Hg^{2+} .

В спектре достаточно надежно идентифицируется связь S–S, колебания которой проявляются в области 445–465 см^{-1} [31]. Наблюдается интенсивное поглощение катионов Hg^{2+} в области 2800–2950 см^{-1} (валентные колебания связей C–H в группах CH и CH_2) и 1460 см^{-1} (деформационные колебания в группе CH_2) [32].

Поглощение ионов Hg^{2+} обусловлено фрагментами лигнина. При сорбции существенного количества Hg^{2+} в сорбенте наблюдаются изменения в полосах, обусловленных колебаниями связей S–S. Она из них расщепляется на две полосы, обе из которых проявляются при более высоких частотах, чем полоса $\nu_{\text{S-S}}$ в исходном сорбенте. Хотя это смещение полос достаточно однозначно не идентифицируется, оно подтверждает участие атомов серы в координации с ионами металлов. Спектральные характеристики остальных частей спектров, обусловленные колебаниями связей в лигниновых фрагментах, практически не меняются.

Перед получением сорбента лигнин обрабатывали хлорной водой с различной концентрацией хлора 3,5–5,7%. Далее хлорлигнин подвергали поликонденсации с Na_2S_n (полисульфидом натрия) в присутствии 77% 1,2,3-трихлорпропана (отхода производства эпихлоргидрина). Твердые частицы хлорлигнина выступали в качестве центров поликонденсации, являясь одновременно сомономером с хлорорганическими отходами при образовании лигниносерного полимера. Это обеспечивало преобразование продукта в пространственную макромолекулу, состоящую из фрагментов лигнина, связанных ковалентной химической связью. Данная связь S– Hg^{2+} настолько прочна, что с насыщенного ионами Hg^{2+} сорбента десорбировать ионы Hg^{2+} с поверхности серосодержащих полимеров не удастся. Вследствие этого предложено утилизировать насыщенные тяжелыми металлами сорбенты термоллизом [33].

Выход получившегося сорбента и его сорбционные характеристики определяются величиной n в соотношении $\text{NaOH}:\text{S}$ при получении Na_2S_n .

При помощи вариации значений n и S были получены образцы сорбента, приведенные в табл. 1.

Как следует из табл. 1, наибольший выход сорбента наблюдался при $n = 2-3$. Увеличение $n > 3$, как и снижение $n < 2$, сопровождается получением неоднородного продукта, снижением его выхода и увеличением в нем содержания остаточного хлора.

Величина активности A , мг/г, синтезированных сорбентов была исследована путем встряхивания

¹Сильверстейн Р., Вебстер Ф., Кимл Д. Спектрометрическая идентификация органических соединений: учеб. пособие / пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. 557 с.

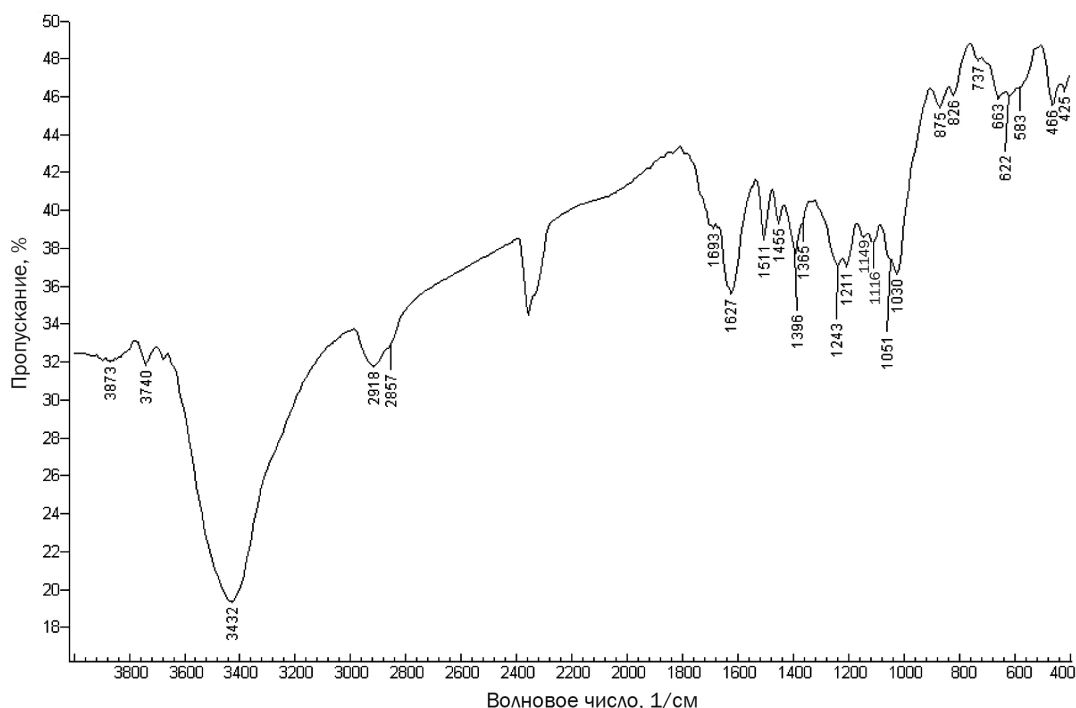


Рис. 1. Серосодержащий сорбент на основе отходов производств, насыщенный Hg^{2+}

Fig. 1. Sulfur-containing sorbent based on industrial waste saturated with Hg^{2+}

Таблица 1. Результаты синтеза серосодержащих сорбентов

Table 1. Results of the synthesis of sulfur-containing sorbents

Номер образца продукта	n	Масса реагентов, г			Выход продукта, г	Содержание в продукте, %	
		хлорлигнин	S	отходы		Cl	S
IIa	2,0	10,0	5,00	8,0	20,0	4,8	26,2
IIб	3,0	10,0	7,50	8,0	19,3	3,6	39,1
IIв	4,0	10,0	10,00	8,0	18,2	7,2	65,0
IIг	1,5	10,0	3,75	8,0	16,6	13,5	18,3
IIд	2,0	12,0	5,00	8,0	21,3	4,6	19,1
IIе	2,0	8,0	5,00	8,0	18,2	4,8	29,3
IIж	2,0	6,0	5,00	8,0	14,2	5,6	28,1

в течение 3 ч сорбента массой 0,5 г в 50 мл модельного водного раствора солей тяжелых металлов с $C_0 = 5,0$ г/л при температуре 20 °С (табл. 2). Видно, что максимальная активность сорбента IIв к ионам цинка, ртути и кадмия существенно превосходит показатель А по сравнению с известными серосодержащими сорбентами. Наличие

в нем большого числа атомов S гарантирует стремительное протекание сорбции по комплексо-координационному механизму. По этой причине для дальнейших исследований кинетических и термодинамических закономерностей сорбции катионов цинка, кадмия и ртути выбран сорбент IIв.

Таблица 2. Сопоставление максимальных величин сорбции разработанных сорбентов (II) с известными

Table 2. Comparison of the maximum sorption values of the developed sorbents (II) with known ones

Номер продукта	Величина сорбции А, мг/г, катионов металлов						
	Ni^{+2}	Zn^{+2}	Cd^{+2}	Pb^{+2}	Hg^{+2}	Cu^{+2}	Co^{+2}
IIa	452	326	335	338	367	408	446
IIб	387	404	445	417	428	378	452
IIв	304	423	443	404	436	397	372
IIг	436	412	297	386	304	378	417
Серосодержащий сорбент из отходов производства эпихлоргидрина [26]	–	74	31	–	152	25	–
Модифицированный серным полимером холинский цеолит [29]	398	268	262	432	437	287	–

Кинетические и сорбционные характеристики сорбции катионов кадмия и цинка предлагаемым сорбентом подробно изложены в статье [34].

Очень часто оптимальные параметры технологического процесса определяются из решения задачи безусловной оптимизации целевой регрессионной функции (адсорбционной емкости, конечной концентрации ионов тяжелых металлов в растворе и т.д.) с использованием необходимых условий экстремума² [17].

Зависимость величины сорбции ртути A_{Hg} , мг/г, от содержания серы S , %, в сорбенте, описываемая моделью (1), представлена на рис. 2.

$$A_{Hg} = 108,389 + 12,992 \times S - 0,122 \times S^2. \quad (1)$$

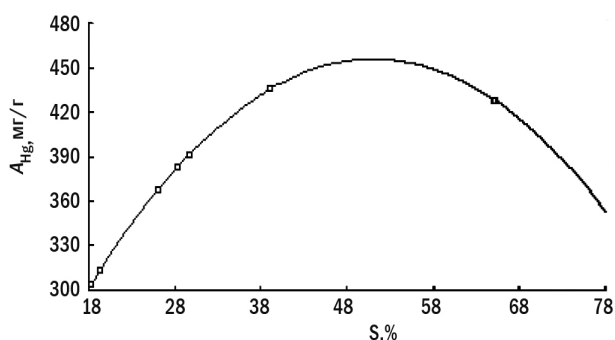


Рис. 2. Зависимость величины сорбции ртути от содержания серы в сорбенте

Fig. 2. Relationship between the magnitude of mercury sorption and the sulfur content in the sorbent

Вид модели регрессии выбирался по наибольшему значению коэффициента детерминации R^2 , %. На рис. 3 приведен результат сопоставления рассчитанных по модели (1) значений A_{Hg} с экспериментальными данными A_{HgP} . Критерии адекватности полученной модели представлены в табл. 3.

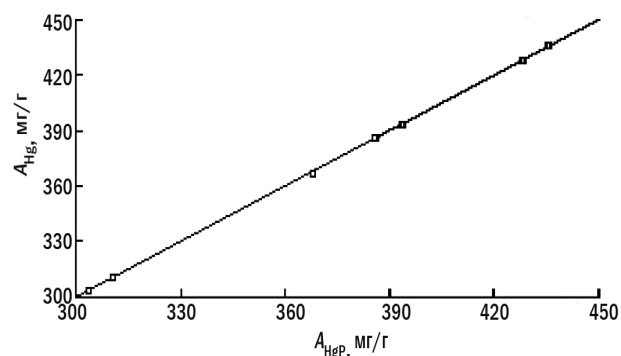


Рис. 3. Сопоставление расчетных значений величины сорбции ртути с опытными значениями

Fig. 3. Comparison of calculated magnitude of mercury sorption values with experimental values

Таблица 3. Критерии адекватности моделей регрессии

Table 3. Criteria for the adequacy of regression models

Модель	R^2 , %	$R^2_{ср}$, %	DW	σ	Δ
(1)	99,98	99,95	2,03	0,560	1,310
(3)	98,86	98,64	2,98	3,820	2,360
(4)	94,72	92,08	2,30	4,260	2,670
(5)	97,90	97,30	0,55	62,840	68,920
(6)	96,25	94,84	1,32	60,700	42,430
(8)	100,00	100,00	0,06	0,007	0,004
(10)	92,66	92,66	1,21	1,200	0,940

Как видно из табл. 3, рис. 2 и 3, полученная модель регрессии (1) описывает изотерму сорбции очень точно.

Найдем оптимальное содержание серы $S_{опт.}$, обеспечивающее максимальную сорбционную активность, из необходимого условия экстремума:

$$dA_{Hg}/dS = 12,992 - 2 \times 0,122 \times S = 0. \quad (2)$$

Из уравнения (2) следует, что

$$S_{опт.} = 12,992 / (2 \times 0,122) \approx 53,246\%.$$

Изотермы сорбции ртути, мг/г, A_{20} при 20 °C (рис. 4) и A_{60} при 60 °C (рис. 5) до величины $C_0 = 1000$ мг/л описываются параболическими зависимостями (3) и (4) соответственно:

$$A_{20} = 0,052C_0 + 0,35 \times 10^{-4}C_0^2. \quad (3)$$

$$A_{60} = -12,151 + 0,2042C_0 - 0,00012C_0^2. \quad (4)$$

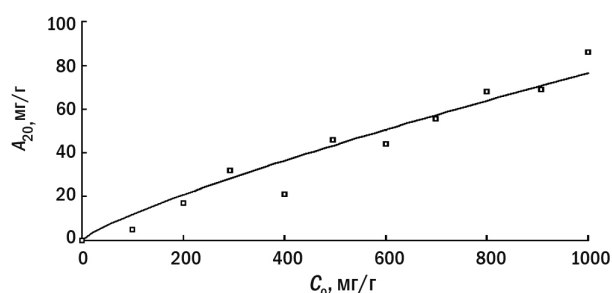


Рис. 4. Изотермы сорбции ртути при 20 °C

Fig. 4. Mercury sorption isotherms at 20 °C

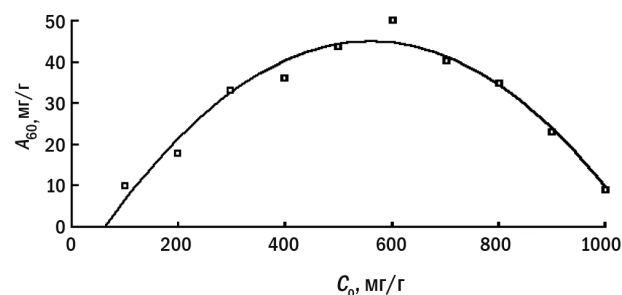


Рис. 5. Изотермы сорбции ртути при 60 °C

Fig. 5. Mercury sorption isotherms at 60 °C

²Перерва О.В., Гартман Т.Н. Компьютерное моделирование химико-технологических процессов в программе Aspen Plus: практическое руководство для технологов и проектировщиков: учеб. пособие для вузов. М.: Лань, 2023. 224 с.

Зависимости конечной концентрации ртути $C_{к20}$, мг/л, в растворе от времени сорбции t , мин, представлены при температурах 20 °С (рис. 6) и 40 °С (рис. 7) и аппроксимированы моделями (5) и (6) соответственно. Критерии адекватности моделей указаны в рассмотренной ранее табл. 3.

$$C_{к20} = -348,255 + 79489,10/(t + 57,227). \quad (5)$$

$$C_{к40} = 1058,160 - 13,218t + 0,082t^2 - 0,173 \times 10^{-3}t^3. \quad (6)$$

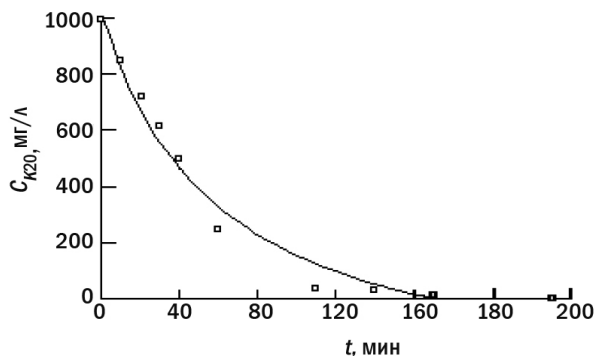


Рис. 6. Зависимость конечной концентрации ртути от времени сорбции при температуре 20 °С

Fig. 6. Relationship between the mercury final concentration and sorption time at a temperature of 20 °С

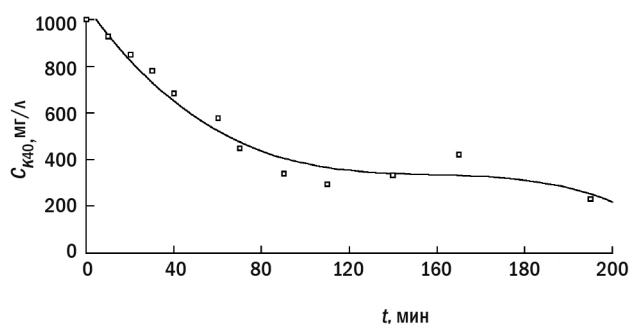


Рис. 7. Зависимость конечной концентрации ртути от времени сорбции при температуре 40 °С

Fig. 7. Relationship between the mercury final concentration and sorption time at a temperature of 40 °С

Небольшой рост конечной концентрации ртути $C_{к40}$ при времени сорбции $t > 120$ мин (см. рис. 7) можно объяснить координацией ртути с одним или двумя атомами серы, которая менее прочна и при повышении температуры раствора инициирует десорбцию ртути из сорбента. С увеличением времени сорбции Hg^{2+} размещаются в порах сорбента и величина $C_{к40}$ в растворе вновь снижается.

Как видно из табл. 3, для модели (5) значение $R^2 = 97,9\%$ достаточно велико, поэтому для определения порядка n и константы скорости сорбции k подставим значение $dC_{к20}/dt$, найденное дифференцированием модели (5) в кинетическое уравнение n -го порядка:

$$V_{20} = -dC_{к20}/dt = 79489,1/(t + 57,2273)^2 = kC_{к20}^n. \quad (7)$$

Вычисленные по формуле (7) значения скорости сорбции V , мг/(л×мин), представлены в табл. 4. Они описываются точной регрессией (8), критерии адекватности которой указаны в табл. 3:

$$V_{20} = 0,0876C_{к20}^{0,8321}. \quad (8)$$

Из формулы (8) следует, что $k = 0,0876 \text{ мин}^{-1}$, $n \approx 1$.

Найдем порядок и константу скорости сорбции при температуре 40 °С, определив $dC_{к40}/dt$ дифференцированием модели (6):

$$V_{40} = -dC_{к40}/dt = 13,218 - 0,164t + 0,519 \times 10^{-3}t^2 = kC_{к40}^n. \quad (9)$$

Вычисленные по формуле (9) значения скорости сорбции V_{40} , мг/(л×мин), также представлены в табл. 4. Они описываются регрессией (10), критерии адекватности которой указаны в табл. 3:

$$V_{40} = 0,139 \times 10^{-4}C_{к40}^2. \quad (10)$$

Из формулы (8) следует, что $k = 0,139 \times 10^{-4} \text{ мин}^{-1}$, $n = 2$.

В табл. 4 также представлена кинетика сорбции ртути в растворе при 20 и 40 °С, где $C_{к20}$, $C_{к40}$ – конечная концентрация ртути в растворе при температуре 20 и 40 °С. Скорости сорбции V_{20} и V_{40} рассчитаны по регрессионным моделям (8) и (10) соответственно.

Таблица 4. Кинетика сорбции ртути в растворе при 20 и 40 °С

Table 4. Kinetics of mercury sorption in solution at 20 and 40 °С

Время сорбции t , мин	20 °С		40 °С		V_{20}/V_{40}
	$C_{к20}$, мг/г	V_{20} , мг/(л×мин)	$C_{к40}$, мг/г	V_{40} , мг/(л×мин)	
0	1000	27,486	1000	13,218	2,079
10	850	24,009	930	11,630	2,064
20	720	20,911	850	10,146	2,061
30	620	18,464	780	8,765	2,107
40	500	15,438	685	7,488	2,062
60	250	8,671	580	5,246	1,653
70	60	2,644	450	4,281	0,618
90	46	2,120	340	2,662	0,796
110	40	1,887	295	1,458	1,294
140	30	1,485	335	0,430	3,451
170	20	1,060	420	0,337	3,144
230	0	0,000	230	2,953	0,000

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Первый порядок реакции отвечает как кинетической, так и диффузионной области развития процесса. Учитывая, что в водных растворах коэффициент диффузии Hg^{2+} при 20 °C равен $0,9 \times 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$, можно полагать, что суммарная скорость сорбции будет лимитироваться процессом диффузии катионов Hg^{2+} к активным центрам серосодержащего сорбента, что согласуется с выводом авторов работы [23].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Домрачева В.А. Об экологической ситуации в Иркутской области и возможности ее улучшения // Успехи современного естествознания. 2009. N 7. С. 149–151. EDN: KWXPDL.
2. Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В. Тяжелые металлы и растения: монография. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. 194 с. EDN: UAJSQV.
3. Медведев И.Ф., Деревягин С.С. Тяжелые металлы в экосистемах: монография. Саратов: Ракурс, 2017. 178 с. EDN: ZUOCLR.
4. Adriano D.C. Trace elements in the terrestrial environment. Springer-Verlag: New York – Berlin – Heidelberg – Tokio, 1986. 533 p.
5. Янин Е.П. Ртуть в окружающей среде промышленного города. М.: Изд-во ИМГРЭ, 1992. 169 с.
6. Соковикова М.И., Старостина В.Ю. Сравнительный анализ различных мероприятий по ликвидации загрязнения промышленной территории ООО «Усолье-химпром» тяжелыми металлами // Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология-2019): материалы XV Междунар. науч.-техн. конф. Уфа: Изд-во УГАТУ, 2019. С. 129–134. EDN: ZPVXVG.
7. Руш Е.А. Ртутное загрязнение р. Ангары в зоне действия химического комбината // Водоснабжение и санитарная техника. 2003. N 11. С. 12–24. EDN: PXIEQX.
8. Седых Е.С., Зарипов Р.Х. Ртуть в почвах Усольского промышленного района (Верхнее Приангарье) // Сибирский экологический журнал. 2002. Т. 9. N 1. С. 21–28.
9. Вертинский А.П. К вопросу о ртутной интоксикации техногенного происхождения Байкало-Ангарского бассейна // Экологические технологии. 2010. N 9. С. 66–70. EDN: NAWTSR.
10. Смирнов А.Д. Сорбционная очистка воды. Л.: Химия, 1982. 168 с.
11. Иринчинова Н.В., Дударев В.И., Филатова Е.Г., Асламова В.С. Регрессионные модели адсорбции ионов никеля (II) углеродными сорбентами // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2021. Т. 11. N 3. С. 349–357. DOI: 10.21285/2227-2925-2021-11-3-349-357. EDN: DCWLGI.
12. Di Natale F., Gargiulo V., Alfè M. Adsorption of heavy metals on silica-supported hydrophilic carbonaceous nanoparticles (SHNPs) // Journal of Hazardous Materials. 2020. Vol. 393. P. 122374. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122374.
13. Chen A.-H., Liu S.-C., Chen C.-Y., Chen C.-Y. Comparative adsorption of Cu(II), Zn(II), and Pb(II) ions in aqueous solution on the crosslinked chitosan with epichlorohydrin // Journal of Hazardous Materials. 2008. Vol. 154, no. 1–3. P. 184–191. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.10.009.
14. Laus R., Costa T.G., Szpoganicz B., Fávere V.T. Adsorption and desorption of Cu(II), Cd(II) and Pb(II) ions using chitosan crosslinked with epichlorohydrin-triphosphate as the adsorbent // Journal of Hazardous Materials. 2010. Vol. 183, no. 1–3. P. 233–241. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.07.016.
15. Akpomie K.G., Conradie J. Advances in application of cotton-based adsorbents for heavy metals trapping, surface modifications and future perspectives // Ecotoxicology Environmental Safety. 2020. Vol. 201. P. 110825. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.110825.
16. Fouda-Mbanga B.G., Prabakaran E., Pillay K. Carbohydrate biopolymers, lignin based adsorbents for removal of heavy metals (Cd^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+}) from wastewater, regeneration and reuse for spent adsorbents including latent fingerprint detection: a review // Biotechnology Reports. 2021. Vol. 30. P. e00609. DOI: 10.1016/j.btre.2021.e00609.
17. Асламова В.С., Шалунц Л.В., Обуздина М.В., Грабельных В.А. Моделирование процесса адсорбции в системе жидкость – твердое тело: регрессионный анализ извлечения меди из водных растворов цеолитом Холинского месторождения, модифицированным серосодержащим полимером // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2019. Т. 9. N 2. С. 351–359. DOI: 10.21285/2227-2925-2019-9-2-351-359. EDN: ICEAVU.
18. Асламова В.С., Шалунц Л.В., Грабельных В.А., Асламов А.А. Регрессионные модели адсорбции ионов цинка из водных растворов цеолитом Холинского месторождения, модифицированным серосодержащим полимером // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2020. Т. 10. N 1. С. 29–38. DOI: 10.21285/2227-2925-2020-10-1-29-38. EDN: WDQLZE.
19. Нойман Ш. Применение ионообменных смол в гальваническом производстве // Вода: химия и экология. 2014. N 5. С. 116–123. EDN: SFEZNT.
20. Сомин В.А., Фогель А.А., Комарова Л.Ф. Очистка воды от ионов металлов на сорбентах из древесных отходов и минерального сырья // Экология и промышленность России. 2014. N 2. С. 56–60. EDN: RVBJL.
21. Хмылко Л.И., Орехова С.Е. Сорбенты на основе лигнина и целлюлозосодержащих материалов // Свиридовские чтения: сб. ст. / отв. ред. Т.Н. Воробьева. Минск: Изд-во БГУ, 2012. Вып. 8. С. 232–239. EDN: LMUTIJ.
22. Грабельных В.А., Леванова Е.П., Рединова А.В., Русавская Н.В., Игнатова О.Н., Корчевин Н.А. Новый тип сорбентов на основе полисульфида натрия из отходов производства эпихлоргидрина для извлечения соединений тяжелых металлов // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. Т. 20. N 2. С. 199–203. EDN: OXPHSR.
23. Рединова А.В., Грабельных В.А., Леванова Е.П., Корчевин Н.А. Извлечение ионов тяжелых металлов из водных растворов серосодержащими полимерными сорбентами // Вестник Иркутского государственного

технического университета. 2013. N 1. С. 113–116. EDN: PUZYFY.

24. Запорожских Т.А., Третьякова Я.К., Грабельных В.А., Руссавская Н.В., Вшивцев В.Ю., Леванова П.Е. [и др.]. Гранулированные серосодержащие сорбенты для извлечения ионов тяжелых металлов из водных растворов // Журнал прикладной химии. 2008. Т. 81. N 5. С. 849–851.

25. Дарманская Т.А., Корчевин Н.А., Асламова В.С. Утилизация зольных отходов // Экология и промышленность России. 2010. N 1. С. 39–41. EDN: MTWCHN.

26. Пат. № 2475299, Российская Федерация, МПК В01J 20/02(2006.01), В01J 20/26(2006.01), В01J 20/30. Способ получения серосодержащих сорбентов для очистки сточных вод от тяжелых металлов / А.В. Рединова, О.Н. Игнатова, В.А. Грабельных, Е.П. Леванова, Н.В. Руссавская, С.В. Терек [и др.]. Заявл. 27.12.2010; опубл. 20.02.2013. Бюл. № 5.

27. Пат. № 2558896, Российская Федерация, МПК В01J20/30, В01J20/02, В01J20/22. Способ получения сорбента для очистки сточных вод от соединений тяжелых металлов / Е.А. Чернышева, В.А. Грабельных, Е.П. Леванова, О.Н. Игнатова, И.Б. Розенцвейг, Н.В. Руссавская [и др.]. Заявл. 06.06.2014; опубл. 10.08.2015. Бюл. № 22.

28. Чернышева Е.А., Грабельных В.А., Леванова Е.П., Корчевин Н.А. Применение серосодержащего сорбента на основе лигнина для извлечения ртути из водных растворов // Известие вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2017. Т. 7. N 3. С. 169–177. DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-3-169-177. EDN: ZQJUMR.

29. Пат. № 2624319, Российская Федерация. Способ получения сорбента для извлечения соединений тяжелых металлов из сточных вод / М.В. Обуздина, Е.А. Руш, А.В. Днепровская, Л.В. Шалунц, О.Н. Игнатова, Е.П. Леванова [и др.]. Заявл. 30.03.2016; опубл. 03.07.2017. Бюл. № 19.

30. Марченко З. Фотометрическое определение элементов / пер. с польск. М.: Мир, 1971. 502 с.

31. Trofimov B.A., Sinegovskaya L.M., Gusarova N.K. Vibrations of the S–S bond in elemental sulfur and organic polysulfides: a structural guide // Journal of Sulfur Chemistry. 2009. Vol. 30, no. 5. P. 518–554. DOI: 10.1080/17415990902998579.

32. Бёккер Ю. Спектроскопия: монография / пер. с нем. М.: Техносфера, 2009. 528 с.

33. Асламова В.С., Шнейгельберг Е.А., Грабельных В.А. Утилизация насыщенного ионами тяжелых металлов серосодержащего сорбента // VI Научные чтения, посвященные памяти академика А.Е. Фаворского: сб. тез. докл. школы-конференции молодых ученых с междунар. уч. Иркутск: Иркутский институт химии им. А.Е. Фаворского СО РАН, 2020. С. 58. EDN: RPALQU.

34. Aslamova V.S., Chernysheva E.A., Grabelnykh V.A., Levanova E.P., Russavskaya N.V. Regression analysis of zinc and cadmium ion extraction from aqueous solutions using a lignin-based sulphur-containing sorbent // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2018. Т. 8. N 4. С. 174–183. DOI: 10.21285/2227-2925-2018-8-4-174-183. EDN: VQTQHU.

REFERENCES

1. Domracheva V.A. About the environmental situation in the Irkutsk region and the possibility of improving it. *Advances in current natural sciences*. 2009;7:149-151. (In Russian). EDN: KWXPDL.

2. Titov A.F., Kaznina N.M., Talanova V.V. *Heavy metals and plants*. Petrozavodsk: Karelian Research Centre RAS; 2014, 194 p. (In Russian). EDN: UAJSQV.

3. Medvedev I.F., Derevyagin S.S. *Heavy metals in ecosystems*. Saratov: Rakurs; 2017, 178 p. (In Russian). EDN: ZUOCLR.

4. Adriano D.C. *Trace elements in the terrestrial environment*. Springer-Verlag: New York – Berlin – Heidelberg – Tokyo; 1986. 533 p.

5. Yanin E.P. *Mercury in the environment of an industrial city*. Moscow: Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements; 1992, 169 p. (In Russian).

6. Sokovikova M.I., Starostina V.Y. The comparative analysis of various measures to eliminate the pollution of the industrial territory OOO “Usoliehimprom” with heavy metals. In: *Nauka, obrazovanie, proizvodstvo v reshenii ekologicheskikh problem (Ekologiya-2019): materialy XV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Science, education, production in solving environmental problems (Ecology-2019): Proceedings of the 15th International Scientific and Technical Conference*. Ufa: Ufa State Aviation Technical University; 2019, p. 129-134. (In Russian). EDN: ZPVXVG.

7. Rush E.A. Mercury pollution of the Angara within the area of operation of the chemical. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2003;11:2-20. (In Russian). EDN: PXIEQX.

8. Sedyh E.S., Zaripov R.H. Mercury in soils of the Usolsky industrial region (Upper Angara region). *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*. 2002;9(1):21-28. (In Russian).

9. Vertinskiy A.P. To a question on a mercury intoxication of a technogenic origin of Bajkalo-Angarsk pool. *Ekologicheskie tekhnologii*. 2010;9:66-70. (In Russian). EDN: NAWTSR.

10. Smirnov A.D. *Sorptive water purification*. Leningrad: Khimiya; 1982, 168 p. (In Russian).

11. Irinchinova N.V., Dudarev V.I., Filatova E.G., Aslamova V.S. Regression models of nickel (II) ion adsorption by carbon sorbent. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2021;11(3):349-357. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2021-11-3-349-357. EDN: DCWLGJ.

12. Di Natale F., Gargiulo V., Alfè M. Adsorption of heavy metals on silica-supported hydrophilic carbonaceous nanoparticles (SHNPs). *Journal of Hazardous Materials*. 2020;393:122374. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122374.

13. Chen A.-H., Liu S.-C., Chen C.-Y., Chen C.-Y. Comparative adsorption of Cu(II), Zn(II), and Pb(II) ions in aqueous solution on the crosslinked chitosan with epichlorohydrin. *Journal of Hazardous Materials*. 2008;154(1-3):184-191. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.10.009.

14. Laus R., Costa T.G., Szpoganicz B., Fávere V.T. Adsorption and desorption of Cu(II), Cd(II) and Pb(II) ions using chitosan crosslinked with epichlorohydrin-tri-phosphate as the adsorbent. *Journal of Hazardous Materials*. 2010;183(1-3):233-241. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.07.016.

15. Akpomie K.G., Conradie J. Advances in application of cotton-based adsorbents for heavy metals trapping, surface modifications and future perspectives. *Ecotoxicology Environmental Safety*. 2020;201:110825. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.110825.

- 16.** Fouda-Mbanga B.G., Prabakaran E., Pillay K. Carbohydrate biopolymers, lignin based adsorbents for removal of heavy metals (Cd^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+}) from wastewater, regeneration and reuse for spent adsorbents including latent fingerprint detection: a review. *Biotechnology Reports*. 2021;30:e00609. DOI: 10.1016/j.btre.2021.e00609.
- 17.** Aslamova V.S., Shalunc L.V., Obuzdina M.V., Grabelnykh V.A. Modelling the process of adsorption in the liquid-solid system: Regression analysis of copper extraction from aqueous solutions by zeolite from the Kholinskoye deposit modified by a sulphur-containing polymer. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2019;9(2):351-359. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2019-9-2-351-359. EDN: ICEAVU.
- 18.** Aslamova V.S., Shalunc L.V., Grabelnykh V.A., Aslamov A.A. Regression models of zinc ion adsorption from aqueous solutions on zeolite from Kholinski deposit, modified with a sulphur-containing polymer. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2020;10(1):29-38. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2020-10-1-29-38. EDN: WDQLZE.
- 19.** Neumann Sh. Ion-exchange resins in electroplating industry. *Water: chemistry and ecology*. 2014;5:116-123. (In Russian). EDN: SFEZNT.
- 20.** Somin V.A., Fogel' A.A., Komarova L.F. Purification of water from metal ions using sorbents made from wood waste and mineral raw materials. *Ecology & Industry of Russia*. 2014;2:56-60. (In Russian). EDN: RVBZJL.
- 21.** Khmylko L.I., Orekhova S.E. Sorbents based on lignin and cellulose-containing materials. In: Vorob'eva T.N. (ed.). *Sviridovskie chteniya: sb. st. = Sviridov readings a collection of articles*. Minsk: Belarusian State University; 2012, iss. 8, p. 232-238. (In Russian). EDN: LMUTIJ.
- 22.** Grabelnykh V.A., Levanova E.P., Redinova A.V., Russavskaya N.V., Ignatova O.N., Korchevin N.A. New type of sorbents based on sodium polysulphide from the wastes of epichlorhydrin production for the extraction of heavy metal compounds. *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya*. 2012;20(2):199-203. (In Russian). EDN: OXPHSR.
- 23.** Redinova A.V., Grabel'nyh V.A., Levanova E.P., Korchevin N.A. Extraction of heavy metal ions from water solutions by sulfur-containing polymer sorbents. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2013;1:113-116. (In Russian). EDN: PUZFYF.
- 24.** Zaporozhskikh T.A., Tret'yakova Ya.K., Grabel'nykh V.A., Russavskaya N.V., Vshivtsev V.Yu., Levanova E.P., et al. Granulated sulfur-containing sorbents for recovery of heavy metal ions from aqueous solutions. *Zhurnal prikladnoi khimii*. 2008;81(5):849-851. (In Russian). EDN: JSBDQR.
- 25.** Darmanskaya T.A., Korchevin N.A., Aslamova V.S. Recycling of ashy waste products. *Ecology & Industry of Russia*. 2010;1:39-41. (In Russian). EDN: MTWCHH.
- 26.** Redinova A.V., Ignatova O.N., Grabel'nyh V.A., Levanova E.P., Russavskaya N.V. et al. Method of producing sulphur-containing sorbents for removing heavy metals from waste water. Patent RF, no. 2010153438; 2013. (In Russian).
- 27.** Chernysheva E.A., Grabel'nyh V.A., Levanova E.P., Ignatova O.N., Rozencvejg I.B., et al. Method of producing sorbent for removing heavy metals from waste water. Patent RF, no. 2558896; 2015. (In Russian).
- 28.** Chernysheva E.A., Grabelnykh V.A., Levanova E.P., Korchevin N.A. The using of sulfurcontaining lignin based sorbent for extraction of mercury from aqueous solutions. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2017;7(3):169-177. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-3-169-177. EDN: ZQJUMR.
- 29.** Obuzdina M.V., Rush E.A., Dneprovskaya A.V., Shalunts L.V., Ignatova O.N., Levanova E.P., et al. Method of obtaining a sorbent to extract heavy metals from wastewater. Patent RF, no. 2624319; 2017. (In Russian).
- 30.** Marczenko Z. Colorimetric determination of elements; 1968, 716 p. (Russ. ed.: *Fotometricheskoe opredelenie elementov*. Moscow: Mir; 1971, 502 p.).
- 31.** Trofimov B.A., Sinegovskaya L.M., Gusarova N.K. Vibrations of the S-S bond in elemental sulfur and organic polysulfides: a structural guide. *Journal of Sulfur Chemistry*. 2009;30(5):518-554. DOI: 10.1080/17415990902998579.
- 32.** Bocker J. Spectroscopy: Instrumental analysis with atomic and molecular spectrometry; 1997, 528 p. (Russ. ed.: *Spektroskopiya*. Moscow: Tekhnosfera; 2009, 528 p.).
- 33.** Aslamova V.S., Shneigel'berger E.A., Grabel'nykh V.A. Recycling of sulfur-containing sorbent saturated with heavy metal ions. In: *VI Nauchnye chteniya, posvyashchennye pamyati akademika A.E. Favorskogo: sb. tez. dokl. shkoly-konferentsii molodykh uchenykh s mezhdunar. uch. = 6th Scientific Readings dedicated to the memory of Academician A.E. Favorsky: Collection of abstracts of the school-conference of young scientists with international participation*. Irkutsk: A.E. Favorsky Irkutsk Institute of Chemistry SB RAS; 2020, p. 58. (In Russian). EDN: RPALQU.
- 34.** Aslamova V.S., Chernysheva E.A., Grabelnykh V.A., Levanova E.P., Russavskaya N.V. Regression analysis of zinc and cadmium ion extraction from aqueous solutions using a lignin-based sulphur-containing sorbent. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2018;8(4):174-183. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2018-8-4-174-183. EDN: VQTQHU.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Асламова Вера Сергеевна,
д.т.н., профессор,
Иркутский государственный
университет путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15,
Российская Федерация,
✉ aslamovav@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3306-0651>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vera S. Aslamova,
Dr. Sci. (Engineering), Professor,
Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation,
✉ aslamovav@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3306-0651>

Головкова Елена Александровна,
к.т.н., доцент,
Ангарский государственный
технический университет,
665035, г. Ангарск, ул. Чайковского, 60,
Российская Федерация,
temnikova_ea@bk.ru
<https://orcid.org/0009-0000-3527-8916>

Шнейгельбергер Евгения Александровна,
соискатель,
ООО «Сибирский стандарт-экология»,
664005, г. Иркутск, ул. Красноказачья, 115,
Российская Федерация,
chern5218@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0005-9588-2556>

Асламов Александр Анатольевич,
к.т.н., доцент,
Ангарский государственный
технический университет,
665035, г. Ангарск, ул. Чайковского, 60,
Российская Федерация,
aaa_mx@angtu.ru
<https://orcid.org/0009-0009-6548-8848>

Elena A. Golovkova,
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor
Angarsk State Technical University,
60, Tchaikovsky St., Angarsk, 665035,
Russian Federation,
temnikova_ea@bk.ru
<https://orcid.org/0009-0000-3527-8916>

Evgenia A. Shneygelberger,
Applicant,
LLC "Siberian Standard-Ecology",
115, Krasnokazachya St., Irkutsk, 664005,
Russian Federation,
chern5218@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0005-9588-2556>

Alexander A. Aslamov,
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Angarsk State Technical University,
60, Tchaikovsky St., Angarsk, 665035,
Russian Federation,
aaa_mx@angtu.ru
<https://orcid.org/0009-0009-6548-8848>

Вклад авторов

В.С. Асламова – постановка задачи, разработка концепции исследования, обсуждение результатов, написание текста статьи.
Е.А. Головкова – разработка методологии исследований, осуществление расчетов, обработка полученных данных, обсуждение результатов.
Е.А. Шнейгельбергер – проведение экспериментов, обработка полученных данных, обсуждение результатов.
А.А. Асламов – подготовка иллюстративного материала, написание текста статьи, обсуждение результатов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Поступила в редакцию 11.10.2023.
Одобрена после рецензирования 06.03.2024.
Принята к публикации 31.05.2024.

Contribution of the authors

Vera S. Aslamova – statement of the problem, research concept development, results discussion, writing the text of the manuscript.
Elena A. Golovkova – methodology development, calculations, data obtained processing, results discussion.
Evgenia A. Shneygelberger – conducting experiments, data obtained processing, results discussing.
Alexander A. Aslamov – preparing the illustrative material, results discussion, writing the text of the manuscript.

Conflict 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.

Information about the article

The article was submitted 11.10.2023.
Approved after reviewing 06.03.2024.
Accepted for publication 31.05.2024.