



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 544

doi: 10.17308/sorpchrom.2023.23/11870

Равновесные и кинетические исследования сорбции ионов Fe(III) на сорбенте R-модифицированном ССМА

Эсмירה Джалил Эюбова[✉], Халил Джамал Нагиев, Фамиль Муса Чырагов

Бакинский Государственный Университет, Баку, Азербайджан, esmira024@yahoo.com[✉]

Аннотация. На основе сополимера стирола с малеиновым ангидридом и 2-нитро-4-сульфоанилином (S) с последующим модифицированием реактивом 4,4'-(этан-1,2-диилбис(азанилиден))бис(пентан-2-он) (S₁) получен новый сорбент. В работе изучена сорбция на полученном сорбционном материале ионов Fe(III). В ходе работы было исследовано влияние различных факторов на адсорбцию: pH, время контакта, ионная сила, начальная концентрация иона металла. Результаты исследований охарактеризованы с помощью различных моделей изотерм адсорбции и кинетических моделей. Результаты исследований показали, что сорбция лучше всего описывается с помощью модели Ленгмюра и кинетической модели псевдо-второго порядка. Максимальная сорбционная емкость равна 348 мг/г для образца S и 479.2 мг/г для образца S₁.

Для адсорбционных исследований в работе использовали раствор Fe(III) с концентрацией 5·10⁻³ моль/дм³. Статические сорбционные исследования проводили при комнатной температуре. Для проведения десорбционных исследований использовали кислоты различной концентрации, в частности, 0.5 моль/дм³ растворы HNO₃, HCl, H₂SO₄ и HClO₄. Проведенные исследования показали, что модификация адсорбента реагентом 4,4'-(этан-1,2-диилбис(азанилиден))бис(пентан-2-он) приводит к увеличению сорбционной емкости, а значит, повышается и эффективность извлечения ионов Fe(III) соответствующим продуктом. Сравнение максимальных адсорбционных способностей q_{max} различных адсорбентов по удалению ионов Fe(III) показывает, что использованные в настоящей работе адсорбенты обладают более высокими сорбционными способностями. Полученные продукты были использованы для сорбционно-фотометрического определения Fe(III) в абрикосе и дали положительные результаты. Эти факторы позволяют говорить о том, что синтезированные продукты можно рассматривать как эффективные материалы для извлечения ионов Fe(III).

Ключевые слова: Fe (III), сорбция, изотермы сорбции, кинетика.

Для цитирования: Эюбова Э.Дж., Нагиев Х.Дж., Чырагов Ф.М. Равновесные и кинетические исследования сорбции ионов Fe(III) на сорбенте R-модифицированном ССМА // Сорбционные и хроматографические процессы. 2023. Т. 23, № 6. С. 1094-1102. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11870>

Original article

Equilibrium and kinetic studies of sorption of Fe(III) ions on R-modified sorbent with CSMA

Esmira J. Eyubova[✉], Khalil J. Nagiev, Famil M. Chiragov

Baku State University, Baku, Azerbaijan, esmira024@yahoo.com[✉]

Abstract. The sorbent was obtained based on a copolymer of styrene with maleic anhydride and 2-nitro-4-sulphoaniline (S) and subsequently modified with the reagent 4,4'-(ethane-1,2-diylbis(azanilidene))bis(pentan-2-one) (S₁). The sorption of the resulting product with respect to Fe(III) ions was studied. During the study, the influence of various factors on adsorption was studied, such as: pH, contact time, ionic strength, initial concentration of the metal ion, etc. The results were characterized using various adsorption isotherm and kinetic models. The results of the research showed that sorption is best described by the Langmuir model and the



pseudo-second order kinetic model. The maximum sorption capacity was 348 mg/g for S and 479.2 mg/g for S₁. For the adsorption studies, solutions of $5 \cdot 10^{-3}$ mol/dm³ Fe(III) were used. Static sorption studies were carried out at room temperature. For the desorption studies, acids of various concentrations were used, in particular solutions of 0.5 mol/dm³ HNO₃, HCl, H₂SO₄ and HClO₄.

Studies have shown that the modification of the adsorbent with a reagent led to an increase in sorption capacity, which means that the efficiency of extraction of Fe(III) ions by the corresponding product also increased. Thus, we can continue research in this area and modify the adsorbent with other reagents. A comparison of maximum adsorption capacities q_{\max} of various adsorbents for the removal of Fe(III) ions showed that the adsorbents used in this study have higher sorption abilities. The resulting products were used for the sorption-photometric determination of Fe(III) in apricot and provided positive results. These factors suggest that the synthesized products can be considered as being effective materials for the extraction of Fe(III) ions.

Keywords: Fe (III), sorption, sorption isotherms, kinetics.

For citation: Eyubova E.J., Nagiev H.J., Chiragov F.M. Equilibrium and kinetic studies of sorption of Fe(III) ions on R-modified sorbent with CSMA. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2023. 23(6): 1094-1102. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11870>

Введение

Извлечение ионов тяжелых металлов и загрязненных вод является важной задачей как для здоровья, так и для экологии. Токсичность, неспособность к биодegradации и проникновение через пищевую цепь в человеческий организм делают важным жесткий контроль над этими металлами. Многочисленные методы используются для извлечения ионов металлов из различных объектов. Среди них сорбционный метод является одним из самых простых, эффективных и экономически выгодных.

Различные неорганические вещества использовались в качестве эффективных адсорбентов для извлечения ионов тяжелых металлов [1-3]. Ввиду высокой поверхностной активности, микропористой структуры, высокой адсорбционной емкости и высокой реакционной способности активированный уголь используется в качестве адсорбирующего материала. Помимо этого, присутствие различных функциональных групп на поверхности активированного угля, в частности кислородсодержащих групп, таких как карбоксильная, карбонильная и фенольная группы, позволяет использовать его для сорбции ионов тяжелых металлов. Тем не менее, многие из этих методов имеют ряд ограничений при извлечении ионов тяжелых металлов из объектов природного и промышленного происхождения. По-

этому возникла необходимость в разработке новых, более дешевых и безопасных методов [4-7].

В последние годы значительный успех был достигнут при использовании различных органических и полимерных адсорбентов для селективного извлечения ионов металлов [8-10]. С этой точки зрения высокую эффективность показали полимерные хелатообразующие адсорбенты [11-14]. Особого внимания среди них заслуживают адсорбенты, полученные в результате модификации сополимера стирола с малеиновым ангидридом различными аминами [15-18].

В предыдущих работах авторы исследовали адсорбцию различных ионов металлов с использованием подобных адсорбентов [19-21]. Настоящая работа посвящена изучению адсорбции ионов железа адсорбентом, полученным модификацией сополимера стирола с малеиновым ангидридом и 2-нитро-4-сульфоанилином (образец S) с последующей модификацией его 4,4'-(этан-1,2-диилбис(азанилиден))бис(пентан-2-оном) (образец S₁), и концентрированию ионов железа данным адсорбентом.

Экспериментальная часть

Приготовление растворов. Для адсорбционных исследований в работе использовали растворы Fe (III) с концентрацией $5 \cdot 10^{-3}$ моль/дм³. Равновесные концентрации ионов железа (III) в растворе определяли с помощью реактива 2,2'-([1,1'-дифенил]-4,4'-диилбис(диазин-2,1-

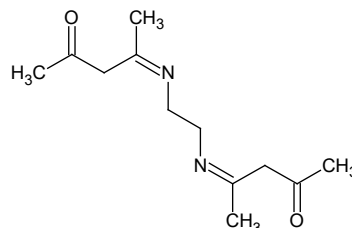
диил)бис(бензол-1,3,5-триол) $C_{18}H_{18}O_6N_4$ (R) с концентрацией $5.0 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³. Измерения проводили с помощью абсорбционной спектрофотометрии при $\lambda_{\max}=490$ нм, pH 5.0 [22], диапазон определяемых концентраций составлял – 0.056-1.12 мкг/дм³. Для изучения влияния pH на сорбцию ионов железа использовались буферные растворы [23]. Для изучения влияния ионной силы использовали 2 М раствор KCl.

Синтез адсорбента. Синтез сорбента проводили по известной методике [24]. Для этого взвешивали 3 г сополимера стирола с малеиновым ангидридом, переносили в круглодонную колбу и добавляли соответствующее количество предварительно рассчитанного и взвешенного амина 2-нитро-4-сульфоанилина, растворенного в этаноле. Реакцию проводили при температуре 333.15-343.15 К в присутствии формалина в течение 30-40 минут. Формалин играет роль сшивающего агента.

Реакция проводится при постоянном перемешивании реакционной смеси и нагреве на песчаной бане. Ввиду того, что реакция проводится в водной среде, ангидридные группы сополимера подвергаются гидролизу. В результате взаимного влияния формальдегида и амина образуется неустойчивый карбониламин, которых взаимодействует с карбоксильными группами макромолекулы и аминный фрагмент входит в состав макромолекулы.

Для удаления остатков продукта реакции сорбент несколько раз промывали дистиллированной водой. Затем образец высушивали в вакуумном эксикаторе при температуре 323 К, измельчали и пропускали через сито с диаметром пор 0.14 мм.

Модификация сорбента реагентом. Сорбент (S) был модифицирован 4,4'-(этан-1,2-диилбис(азанилиден))би(пентан-2-он) (R), структура которого показана ниже:



Для этого компоненты S и R берут в различных стехиометрических соотношения 5:1, 10:1, 15:1 и 20:1. Реагент растворяют в этаноле и добавляют к предварительно высушенному в муфельной печи сорбенту. Полученную смесь перемешивают в течение 6 часов и оставляют высушиваться. Полученный продукт был использован для изучения сорбционных характеристик по отношению к ионам Fe(III). Исследования показали, что максимальная сорбционная емкость наблюдается при соотношении S:R=20:1 и составляет 479.2 мг/г.

Сорбционные исследования. Исследования сорбции ионов железа на образце сорбента проводили в статических условиях при комнатной температуре. Для этого в конические колбы емкостью 50 см³ добавляли 50 мг сорбента, 2 см³ раствора иона металла с концентрацией $5 \cdot 10^{-3}$ моль/дм³ и 18 см³ буферных растворов с pH от 1 до 5. pH растворов контролировали с помощью pH метра Ionomer I-130. Время контакта сорбента с раствором составляло 24 ч. По истечении суток содержимое колбы пропускали через фильтровальную бумагу, отделяя жидкую фазу от твердой. После этого из каждой колбы отбирали по 1 см³ раствора и анализировали на содержание железа на спектрофотометре при $\lambda_{\max}=490$ нм.

Степень извлечения ионов металла R, % из раствора и значение сорбционных емкостей q_e определяли по формулам:

$$R, \% = \frac{C_0 - C_e}{C_e} \cdot 100, \quad (1)$$

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m}, \quad (2)$$

где C_0 – начальная концентрация иона металла, моль/дм³; C_e – равновесная концентрация иона металла, моль/дм³; V – объем раствора, дм³; m – масса адсорбента, мг.



Для проведения десорбционных исследований использовали кислоты различной концентрации, в частности, 0.5 моль/дм³ растворы HNO₃, HCl, H₂SO₄ и HClO₄. Для исследования возможности десорбции взвешивали 50 мг модифицированного сорбента и переносили в конические колбы. В каждую колбу добавляли 2 см³ иона металла и 18 см³ буферного раствора, растворы оставляли на 24 ч. После этого содержимое колб фильтровали и высушивали твердую фазу. К полученной твердой фазе добавляли по 20 см³ соответствующих кислот. Содержимое колбы оставляли на сутки. По истечении суток измеряли оптические плотности растворов.

Кинетика сорбции. Для проведения кинетических исследований для каждого эксперимента взвешивали 50 мг сорбента. Все эксперименты проводили при концентрации иона металла $5 \cdot 10^{-3}$ моль/см³, при 300 К и оптимальном рН равном 5.0. Влияние времени контакта изучали измерением оптической плотности в различных промежутках времени: 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 и 240 минут.

Применение сорбента для определения Fe(III) в абрикосе. Для этого взвешивали 250 г абрикоса и сушили в сушильном шкафу при температуре 250-300°C, а затем прокаливали в муфельной печи в течение 2.5 часов при температуре 600-700°C. Полученную массу растворяли в 15 см³ концентрированной соляной кислоте и 5.0 см³ концентрированной азотной кислоте при нагревании и трижды обрабатывали 5.0 см³ раствором концентрированной соляной кислоты до полного удаления оксидов азота. Затем полученную смесь выпаривали до 4-5 см³ и разбавляли дистиллированной водой. Нерасстворившуюся часть отделяли, пропуская через фильтровальную бумагу. Затем фильтрат переносили в мерную колбу вместимостью 100 см³ и разбавляли до метки дистиллированной водой. Полученный раствор пропускали через микроколонку, заполненную адсорбентом, со

скоростью 1.0 см³/мин. Ионы Fe(III), поглощенные адсорбентом в микроколонке, десорбировали 1.5 М раствором HNO₃. Затем элюент переносили в колбу на 25 см³. В колбу добавили 2.5 см³ компонента R и разбавили до метки рН 5. Оптические плотности полученных растворов измеряли при $\lambda=490$ нм на КФК-2, $l=1$ см на фоне компонента R. Количество Fe(III) ионов в абрикосе рассчитывали на основании предварительно построенного градуировочного графика.

Обсуждение результатов

В работе установлено, что степень извлечения ионов металла сильно зависит от величины рН. Результаты исследования показали, что максимальная сорбционная емкость наблюдается при рН 5.0. По мере увеличения рН сорбция ионов железа (III) увеличивается. При низких значениях рН сорбция уменьшается ввиду того, что некоторые аминные группы протонируются в NH₃⁺-форму, что уменьшает число связывающих центров, доступных для адсорбции. При рН выше 6, ионы железа подвергаются гидролизу, поэтому оптимальным считается рН=5. Сорбционное равновесие устанавливается в течении 150 минут.

В настоящей работе оценено влияние начальной концентрации иона металла на процесс сорбции. Для этого концентрации ионов железа (III) меняли в интервале от $0.2 \cdot 10^{-3}$ - $10 \cdot 10^{-3}$ моль/дм³. Результаты исследования показали, что максимальная сорбционная емкость наблюдается при концентрации иона металла равном $8.0 \cdot 10^{-3}$ моль/дм³. Значение сорбционной емкости постепенно увеличивается и достигает максимального значения (рис. 1).

Как видно, в случае образца сорбента S₁ по сравнению с образцом S (348 мг/г) значение сорбционной емкости увеличивается и достигает 479.2 мг/г при той же исходной концентрации. Такое увеличение сорбционной емкости в случае S₁

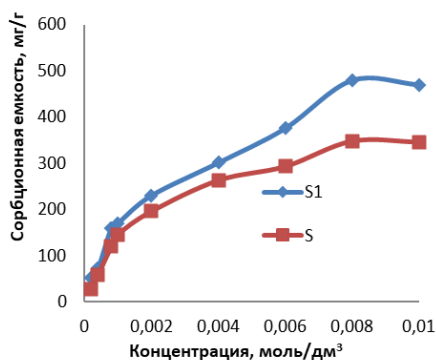


Рис. 1. Влияние начальной концентрации ионов металла на адсорбционную емкость
 $m_{\text{сорб.}}=30 \text{ мг}$, $V_{\text{общ.}}=20 \text{ см}^3$, $C_{\text{Me}}=5 \cdot 10^{-3} \text{ моль/дм}^3$

Fig. 1. Influence of the initial concentration of metal ions on the adsorption capacity

можно объяснить исходя из того, что после модификации сорбента S реагентом R увеличивается число функционально-активных групп способных к сорбции.

В данной работе исследована десорбция ионов Fe(III) ионов из образцов S и S₁. Результаты исследования показали, что наилучшей десорбирующей способностью по отношению к ионам железа (III) как для S, так и для S₁ обладает 0.5 моль/дм³ раствор HNO₃.

Для описания изотермы сорбции были использованы различные модели сорбции: Ленгмюра, Фрейндлиха и Дубинина-Радушкевича [23]. Исследование разных моделей проводили с целью установления наиболее благоприятно описывающей модели для изучения процесса сорбции. Модель Ленгмюра является простейшей моделью мономолекулярной сорбции. Согласно модели Ленгмюра сорбция происходит на определенных фиксированных участках сорбента. Данная модель описывается следующим уравнением [25]:

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e}, \quad (3)$$

где C_e – равновесная концентрация иона металла, ммоль/см³, q_e – равновесная сорбционная емкость, ммоль·см³/г, K_L – константа изотермы Ленгмюра, см³/ммоль. В работе изотермы сорбции ионов железа исследуемыми образцами сорбентов построены в координатах $1/q_e$ от $1/C_e$, значения q_{max} и K_L рассчитаны графически.

Важным параметром изотермы Ленгмюра является постоянная R_L , которая определяется по следующей формуле [25]:

$$R_L = \frac{1}{1 + b C_0}, \quad (4)$$

где C_0 – начальная концентрация адсорбата, ммоль/см³.

Значение R_L указывает на тип сорбции. Значение от 0-1 указывает на благоприятный сорбционный процесс. В нашем случае значение R_L в обоих случаях попадает в интервал 0-1, что означает, что сорбция является благоприятной по модели Ленгмюра при выбранных условиях. Значения коэффициентов регрессии $R^2=0.769$ для S и $R^2=0.905$ для S₁ также указывает на то, что модель изотермы хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Согласно модели Фрейндлиха, сорбция происходит на гетерогенных участках с различной энергией. Уравнение, описывающее модель Фрейндлиха следующее [26]:

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e, \quad (5)$$

где q_e – равновесная сорбционная емкость, ммоль/г; K_F – константа Фрейндлиха; $1/n$ – фактор гетерогенности.

В работе изотермы сорбции ионов железа исследуемыми образцами сорбентов построены в координатах $\ln q_e$ от $\ln C_e$, значения K_F и $1/n$ рассчитаны графически. K_F указывает на сорбционную емкость (мг/г), n показывает интенсивность

Таблица 1. Параметры изотерм Ленгмюра, Фрейндлиха и Дубинина-Радушкевича для сорбции иона Fe(III) адсорбентами S и S₁.

Table 1. Parameters of Langmuir, Freundlich and Dubinin-Radushkevich isotherms for the sorption of Fe(III) ion by S and S₁ adsorbents.

Сор-бент	Ленгмюр				Фрейндих			Дубинин-Радушкевич			
	(q _{max} , мг/г)	(K _L , л/мг)	(R _L)	(R ²)	(K _F , мг/г)	(1/n)	(R ²)	(q _s , мг/г)	(E, кДж/моль)	(k _{D-R} , моль ² /кДж ²)	(R ²)
S	12.28	0.36	0.99	0.769	1.85	0.535	0.812	7.42	5.1	0.2x10 ⁻⁷	0.886
S ₁	58.2	0.47	0.99	0.905	1.86	0.593	0.902	8.47	7.142	0.3x10 ⁻⁷	0.931

сорбции. Сорбция считается благоприятной, если 1/n находится в интервале 0-1. Результаты показывают, что значения n равны 1.86 для S и 1.68 для S₁, что означает, что процесс сорбции невозможно описать по модели Фрейндлиха.

Для описания пористости сорбента и установления механизма сорбции была исследована модель Дубинина-Радушкевича. Модель описывается следующим уравнением [27]:

$$\ln q_e = \ln q_s - k_{D-R} \varepsilon^2, \quad (6)$$

где q_s – емкость насыщения, ммоль/г; k_{D-R} – константа Дубинина-Радушкевича, связанная с свободной энергией сорбции, ε потенциал Поляни, связанный с концентрацией по уравнению [27]:

$$\varepsilon = RT \ln \left(1 + \frac{1}{c_e} \right), \quad (7)$$

где R – газовая постоянная и T (300 K) абсолютная температура.

Энергия сорбции рассчитывается по следующему уравнению [27]:

$$E = \frac{1}{\sqrt{2k_{D-R}}}. \quad (8)$$

Построена линейная зависимость ln q_e от ε². Значения q_s и k_{D-R} определены по пересечению и наклону кривой зависимости ln q_e от ε².

Значения R² равны 0.886 для S и 0.931 для S₁. E равен 5.1 кДж/моль для S и 7.142 кДж/моль для S₁. Если значение E лежит между 8-16 кДж/моль, то это указывает на процесс химической сорбции. Если же значение E ниже 8 кДж/моль, то это указывает на физическую сорбцию. В нашем случае наблюдается физическая сорбция.

Результаты линеаризации изотерм сорбции показаны в таблице 1.

Кинетические модели используют для описания механизма сорбции. В данной работе исследованы различные кинетические модели, такие как модель псевдо-первого и псевдо-второго порядков.

Модель псевдо-первого порядка позволяет оценивать степень сорбции по величине сорбционной емкости. Данная модель описывается следующим уравнением [3]:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t, \quad (9)$$

где q_e and q_t – значения сорбционных емкостей в момент равновесия и в момент времени t (мин), константа скорости реакции k₁ (мин⁻¹).

Построен график зависимости ln(q_e – q_t) от t (рис. 2). Значения k₁ и q_e были рассчитаны по наклону и пересечению кривой зависимости ln(q_e – q_t) от t. Значительная разница между экспериментальным и расчетным значением q_e и q_{e(расч)} показывает, что процесс сорбции плохо описывается кинетической моделью псевдо-первого порядка.

Процесс сорбции можно описать также моделью псевдо-второго порядка, которая удовлетворяет следующему уравнению [3]:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t, \quad (10)$$

где k₂ константа скорости псевдо-второго порядка, г·мг⁻¹·мин⁻¹; k₂q_e² – начальная скорость сорбции, мг·г⁻¹·мин⁻¹.

Построена кривая зависимости $\frac{t}{q_t}$ от t (рис. 3). Значения k₂ и q_e найдены по

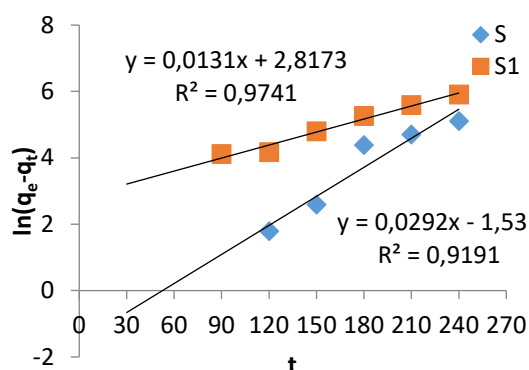


Рис. 2. Кинетическая модель псевдо-первого порядка
 Fig. 2. The kinetic model of the pseudo-first order

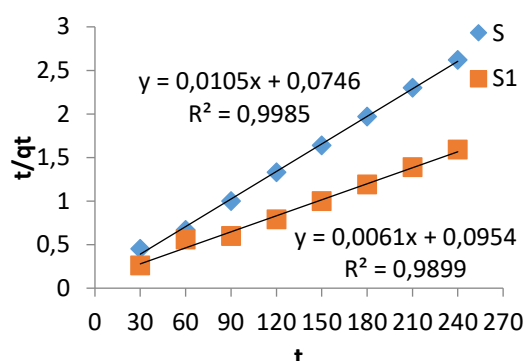


Рис. 3. Кинетическая модель псевдо-второго порядка
 Fig. 3. The kinetic model of the pseudo-second order

Таблица 2. Кинетические параметры адсорбции
 Table 2. Adsorption kinetic parameters

Сорбент	Pseudo-first-order				Pseudo-second-order		
	q_e (эксп), мг/г	k_1 (мин ⁻¹)	q_e (расч), мг/г ⁻¹	(R ²)	k_2 (г·мг ⁻¹ ·мин ⁻¹)	q_e (расч), мг·г ⁻¹	(R ²)
S	91.33	0.029	16.73	0.919	0.0013	95.23	0.998
S ₁	150.7	0.013	4.64	0.974	0.00037	166.66	0.989

Таблица 3. Определение содержания Fe(III) в абрикосе сорбентами S и S₁ (n=5, P=0.05).
 Table 3. Determination of Fe(III) content in apricot using S and S₁ adsorbents (n=5, P=0.05).

Анализируемый объект	Сорбент	Реагент	$\bar{X} \pm \frac{t_{p.f.} \cdot S}{\sqrt{n}}$, %	S _r
Абрикос	S	R	$(0.469 \pm 0.025) \cdot 10^{-3}$	0.031
		AAS	$(0.475 \pm 0.035) \cdot 10^{-3}$	0.045
	S ₁	R	$(0.569 \pm 0.019) \cdot 10^{-3}$	0.024
		AAS	$(0.575 \pm 0.028) \cdot 10^{-3}$	0.039

наклону и пересечению кривой зависимости $\frac{t}{q_t}$ от t . Результаты показывают, что в случае модели псевдо-второго порядка экспериментальное и расчетное значение q_e и $q_{e(рас)}$ отличаются незначительно. Таким образом, модель псевдо-второго порядка лучше подходит для описания процесса сорбции в данном случае. Результаты исследований даны в таблице 2.

Синтезированный адсорбент был использован для определения Fe(III) в абрикосе по указанной выше методике. Результаты сравнивались с ААС и представлены в таблице 3.

Заключение

Проведенные исследования показали, что модификация адсорбента реагентом 4,4'-(этан-1,2-диилбис(азанилиден))бис-(пентан-2-он)ом приводит к увеличению сорбционной емкости, а значит, повышается и эффективность извлечения ионов Fe(III). Таким образом, можно продолжить исследования в этой области и модифицировать адсорбент другими реагентами на основе β-дикетонов. Сравнение максимальных q_{max} различных адсор-



бентов по удалению ионов Fe(III) показывает, что использованные в настоящей работе адсорбенты обладают более высокими сорбционными способностями. Данный сорбент был использован для сорбционно-фотометрического определения Fe(III) в абрикосе. Результаты были сравнены с ААС. Повышение значения q_{\max} после модификации позволяет говорить о том, что синтезированные

продукты можно рассматривать как эффективные материалы для извлечения ионов Fe(III).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы/References

1. Chang Y.C., Qu J., Wei F., Liu W.G. Superb Adsorption Capacity and Mechanism of Flowerlike Magnesium Oxide Nanostructures for Lead and Cadmium Ions, *Applied Materials Interface*, 2012; 4(8): 4283-4287.
2. Chen G., Shah K.J., Shi L., Chiang P.C. Removal of Cd(II) and Pb(II) Ions from Aqueous Solutions by Synthetic Mineral Adsorbent: Performance and Mechanisms, *Applied Surface Science*, 2017; 409: 296-305.
3. Cheraghi E., Ameri E, Mohev A. Adsorption of Cadmium Ions from Aqueous Solutions Using Sesame as a Low-cost Biosorbent: kinetics and equilibrium Studies, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2015; 12: 2579-2592.
4. Purnaratri A.R.F.I.. Comparative Adsorption of Fe(II) and Cd(II) Ions on Glutaraldehyde Crosslinked Chitosancoated Cristobalite, *Oriental Journal of Chemistry*, 2015; 31: 2071-2076.
5. Rao R.A.Kh., Kashifuddin M. Adsorption Studies of Cd(II) on Ball Clay: Comparison with Other Natural Clays, *Arabian Journal of Chemistry*, 2016; 9: 1233-1241.
6. Rongdong D., Yuan H., Jiangang K., Zuo W. Adsorption of Fe(III) on smithsonite surfaces and implications for flotation, *Colloids and Surfaces A Physicochemical and Engineering Aspects*, 2017; 8(12): 542-555.
7. Saleh Sh., El-Zahhar A.A. Adsorption of Iron(III) from Phosphoric Acid Solution on Aminotrimethylene Phosphonic Acid Impregnated Resin, *Arab Journal of Nuclear Science and Applications*, 2015; 48(4): 1-12. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/8496798>
9. Jeton H., Altin M., Tahir A., Adelina H., Valbonë M., Kaltrina J., Berisha A. The evaluation of the dithizone performance as a complexing reagent for supercritical CO₂ extraction of heavy metals from aqueous solutions, *Rad Conference Proceedings*, 2016; 1: 114-116.
10. Oztaş N.A., Karabakan A., Topal Ö. Removal of Fe(III) ion from aqueous solution by adsorption on raw and treated clinoptilolite samples, *Microporous and Mesoporous Materials*, 2008; 111(1): 200-205.
11. Amara-Rekkab, Didi M.A. Removal of Cd(II) and Hg(II) by Chelating Resin Chelex-100, *Oriental Journal of Chemistry*, 2015, Vol.31, 205-214.
12. Azarudeen R.S., Subha R., Jeyakumar D., Burkanudeen A.R. Batch separation studies for the removal of heavy metal ions using a chelating terpolymer: synthesis, characterization and isotherm models, *Separation and Purification Technology*, 2013; 116: 366-377.
13. Jun D., Ren F.L., Tao Ch.Y. Adsorption Behavior of Fe(II) and Fe(III) Ions on Thiourea Cross-Linked Chitosan with Fe(III) as Template, *Molecules*, 2012; 17: 4388-4399.
14. Mostafa M.H.Kh., Al-Wakeel K.Z., Abd El Rehim S.S., Abd El Monem H. Adsorption of Fe(III) from Aqueous Medium onto Glycine-Modified Chitosan Resin: Equilibrium and Kinetic Studies, *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2014; 35(12): 1691-1698.



15. Alieva A.F., Eyyubova E.J., Huseynov F.E., Shamilov N.T., Chiragov F.M. Adsorption study of some sorbents based on maleic anhydride styrene copolymer and sulfodimezine and triazine as linkable amines, *New materials, compounds and applications*, 2017; 1(1): 27-35.
16. El-Rehim H.A., AbdHegazy E.A., El-Hag Ali A. Selective Removal of Some Heavy Metal Ions from Aqueous Solution using Treated Polyethylene-g-styrene/maleic anhydride Membranes. *Reactive and Functional Polymers*, 2000; 43(1): 105-116.
17. Hasanzadeh R., Moghadam P.N., Samadi N. Synthesis and Application of Modified Poly(styrene-alt-maleic anhydride) Networks as a Nano Chelating Resin for Uptake of Heavy Metal Ions, *Polymers for Advanced Technologies*, 2013; 24(1): 34-41.
18. Shimshek S., Yılmaz E., Boztugh A. Amine-modified Maleic Anhydride Containing Terpolymers for the Adsorption of Uranyl ion in Aqueous Solutions, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2013; 298: 923-930.
19. Eyyubova E.J., Nagiyev Kh.J., Chiragov F.M. Adsorption study of Fe(III) ions by masc-2-amino-4-nitrophenol, *Azerbaijan Chemical Journal*, 2020; 2: 26-33.
20. Eyyubova E.J., Nagiyev Kh.J., Chiragov F.M. Adsorption of Fe (III) Ions on Maleic Anhydride Styrene Copolymer-N,N'-diphenylguanidine, *Research Journal of Chemistry and Environment*, 2019; 23(6): 41-51.
21. Alieva F.A., Huseynov F.E., Eyyubova E.J., Shamilov N.T., Chiragov F.M. Study of Ce(III) sorption by a chelating synthetic sorbent based on a copolymer of styrene with maleic anhydride and m-aminophenol, *Proceedings of Universities. Applied chemistry and Biotechnology*, 2019; 9(3): 376-384.
22. Bulatov M.I., Kalikin I.P. *Prakticheskoe rukovodstvo po fotometricheskim i spektrofotometricheskim metodam analiza*, L., Himiya, 1972, 407 p. (In Russ.)
23. Nazarenko V.A., Antonovich V.P., Nevskaya E.M. *Gidroliz ionov metallov v razbavlenykh rastvorah*, M., Atomizdat, 1979, 192 p.
24. Akperov O.N., Akperov E.N., *Praktikum po Analiticheskoy himii*, Baku, 2002. 231 p. (In Russ.)
25. Langmuir. The adsorption of Gases on Plane Surfaces of Glass, Mica and Platinum, *Journal of the American Chemical Society*, 1918; 40: 1361-1403.
26. Freundlich H.M.F. Über die Adsorption in Lösungen, *Z. Physical Chemistry*, 1906; 57(A): 385-470.
27. Dubinin M.M., Radushkevich L.V. Equation of the Characteristic Curve of Activated Charcoal, *Physical Chemistry Section*, 1947; 55: 331-333.

Информация об авторах / Information about the authors

Э.Дж. Эюбова – докторант кафедры аналитической химии химического факультета Бакинского Государственного Университета, Баку, Азербайджан

Х.Дж. Нагиев – профессор кафедры аналитической химии химического факультета Бакинского Государственного Университета, Баку, Азербайджан

Ф.М. Чырагов – профессор, заведующий кафедрой аналитической химии химического факультета Бакинского Государственного Университета, Баку, Азербайджан

E.J. Eyyubova – PhD student of the Department of Analytical Chemistry, Faculty of Chemistry, Baku State University, Baku, Azerbaijan, e-mail: esmira024@yahoo.com

Kh. Ja. Nagiyev – Professor of the Department of Analytical Chemistry, Faculty of Chemistry, Baku State University, Baku, Azerbaijan, e-mail: xalil71@rambler.ru

F.M. Chiragov – Professor, Head of the Department of Analytical Chemistry, Faculty of Chemistry, Baku State University, Baku, Azerbaijan, e-mail: ci-ragov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10.05.2023; одобрена после рецензирования 29.11.2023; принята к публикации 06.12.2023.

The article was submitted 10.05.2023; approved after reviewing 29.11.2023; accepted for publication 06.12.2023.