



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 544.723

doi: 10.17308/sorpchrom.2025.25/13284

Использование капролактама для повышения адсорбции ионов железа углеродным сорбентом на основе антрацита

Наталья Вячеславовна Гора[✉],

Оксана Владимировна Беляева, Даниил Андреевич Чернышёв

Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия, goranataliya@yandex.ru[✉]

Аннотация. В работе изучена возможность повышения адсорбционной емкости недорогого отечественного углеродного сорбента по отношению к ионам железа (II). В качестве сорбента был использован углеродный материал на основе антрацита Пуrolat-Стандарт и его образцы, модифицированные растворами капролактама. Изучено влияние модифицирования на пористую структуру и состояние поверхности исследуемого материала. Любой из использованных вариантов модифицирования сорбента (серной кислотой и/или капролактамом) не приводит к заметному изменению пористой структуры. Сравнение микрофотографий углеродного материала до и после адсорбции железа (II) позволило предположить, что закрепление ионов железа при его адсорбции из водных растворов может происходить на сколах и дефектах углеродной поверхности. Проведенные спектроскопические исследования показали, что процесс модифицирования образцов сорбента приводит к изменению качественного и количественного состава поверхностных групп. Изучена адсорбция ионов железа на исходном и модифицированных образцах углеродного сорбента в статических условиях. Для интерпретации полученных результатов и изучения взаимодействия ионов железа с исследуемыми углеродными материалами использованы описывающие равновесие адсорбции модели Ленгмюра и Дубинина–Радушкевича. Рассчитаны основные адсорбционные характеристики. Полученные результаты позволяют предположить, что ионы железа могут закрепляться на поверхности сорбента как за счет ионного обмена, так и за счет образования комплексов с группами на углеродной поверхности. Показано, что наиболее перспективным сорбентом для извлечения железа (II) из природных вод является модифицированный капролактамом углеродный материал.

Ключевые слова: адсорбция, ионы железа (II), модифицированные углеродные материалы

Благодарности: исследования проводились в рамках Конкурса РНФ «Проведение инициативных исследований молодыми учеными» Президентской программы исследовательских проектов, реализуемых ведущими учеными, в том числе молодыми учеными. Название проекта: "Физико-химические и прикладные основы инновационной адсорбционной технологии обезжелезивания природных вод", проект № 23-73-01036.

Для цитирования: Гора Н.В., Беляева О.В., Чернышёв Д.А. Использование капролактама для повышения адсорбции ионов железа углеродным сорбентом на основе антрацита // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2025. Т. 25, № 4. С. 567-575. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13284>

Original article

Use of Caprolactam to Enhance Iron Ion Adsorption by an Anthracite-Based Carbon Sorbent

Natalya V. Gora[✉], Oxana V. Belyaeva, Daniil A. Chernyshyov

Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation, goranataliya@yandex.ru[✉]

Abstract. This study investigates the potential to improve the adsorption capacity of a cost-effective domestic carbon sorbent toward iron (II) ions. The sorbent used was a carbon material based on anthracite, Purolat-Standard, along with its samples modified with caprolactam solutions. The impact of modification on the porous structure and surface properties of the material was examined. None of the applied modification methods

(using sulfuric acid and/or caprolactam) caused significant changes in the porous structure. A comparison of micrographs of the carbon material before and after iron (II) adsorption suggests that iron ions may become fixed on surface fractures and defects during adsorption from aqueous solutions. Spectroscopic studies revealed that the modification process alters both the qualitative and quantitative composition of surface functional groups. Adsorption of iron ions onto the original and modified carbon sorbent samples was studied under static conditions. The Langmuir and Dubinin–Radushkevich isotherm models were employed to interpret the results and analyze the interactions between iron ions and the carbon materials. Key adsorption parameters were calculated. The findings suggest that iron ions can bind to the sorbent surface through both ion exchange and complexation with functional groups on the carbon surface. It was shown that the most promising sorbent for iron (II) removal from natural waters is the carbon material modified with caprolactam.

Keywords: adsorption, iron (II) ions, modified carbon materials

Acknowledgments: the research was conducted within the framework of the Russian Science Foundation's "Conducting Initiative Research by Young Scientists" Competition, a presidential program of research projects implemented by leading scientists, including young scientists. Project name: "Physico-chemical and applied fundamentals of innovative adsorption technology of natural water de-icing", project No. 23-73-01036.

For citation: Gora N.V., Belyaeva O.V., Chernyshyov D.A. Use of Caprolactam to Enhance Iron Ion Adsorption by an Anthracite-Based Carbon Sorbent. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2025. 25(4): 567-575. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13284>

Введение

Подземные и поверхностные воды играют ключевую роль в поддержании динамической стабильности природных комплексов. В настоящее время в условиях активного техногенного воздействия их качество значительно ухудшается. При этом загрязнение природных вод тяжёлыми металлами представляет одну из наиболее важных экологических проблем. Тяжёлые металлы обладают высокой токсичностью, биологической устойчивостью и способностью к биоаккумуляции в живых организмах. Поступление тяжелых металлов в водные системы происходит как в результате природных процессов (размывание горных пород), так и вследствие антропогенной деятельности.

Химический состав природных вод имеет ряд региональных особенностей, так для водных источников Кузбасса характерно повышенное содержание железа. Железо может вступать в сложные химические реакции, образуя труднораствораемые соединения, которые накапливаются в донных отложениях. Превышение предельно допустимых концентраций этого тяжелого металла представляет опасность для здоровья человека.

Существуют различные методы очистки природных вод от ионов железа.

Среди них особую популярность получили методы сорбции, коагуляции, осаждения, ионного обмена, мембранной фильтрации и биологической очистки. Использование сорбентов, таких как активные угли, цеолиты, а также современные наноматериалы, позволяет эффективно удалять железо из водных объектов. Импортные материалы обладают высокой стоимостью, не всегда имеются в наличии и не в полной мере соответствуют решениям поставленных задач [1]. В связи с этим особое внимание уделяется недорогим отечественным материалам, в том числе углеродным, применение которых позволит снизить стоимость и повысить эффективность процесса очистки. Пуrolат-Стандарт – углеродный материал (УМ) на основе антрацита, обладающий сравнительно низкой стоимостью. Проведенные ранее исследования показывают, что данный фильтрующий материал может быть использован для очистки водных растворов от ионов железа. Однако его эффективность ниже, чем у гранулированных активных углей традиционно применяемых при очистке вод [2]. Одним из вариантов повышения сорбционной емкости углеродных материалов является их модифицирование полифункциональными органическими соединениями. В работах [3-5] для модифицирования углеродного сорбента были

использованы соединения, содержащие амидные/оксимные группы. Так, например, исследования Т.В. Астраковой [4] показали, что предварительное закрепление капролактама на углеродной поверхности способствует повышению адсорбции ионов меди. Поскольку железо (II) также склонно к образованию внутрикомплексных соединений, нами была исследована возможность повышения адсорбционной емкости антрацита модифицированием растворами капролактама.

По литературным данным обработка кислотой может привести к образованию дополнительных поверхностных центров способствующих адсорбции органических соединений [6]. Поэтому нами было опробовано модифицирование капролактамом исходного и обработанного кислотой сорбента для повышения адсорбционной емкости антрацита Пуrolат-Стандарт по железу (II).

Целью работы является изучение возможности увеличения адсорбционной емкости антрацита Пуrolат-Стандарт по отношению к ионам железа (II) путем реагентного модифицирования лактамом.

Экспериментальная часть

Антрацит Пуrolат-Стандарт (ООО «АНТР-АКТИВ», Россия) был предварительно отмыт от пылевых фракций и высушен до воздушно-сухого состояния. Затем часть подготовленных образцов обработали раствором серной кислоты с концентрацией ионов водорода 4.0 моль/дм^3 , после чего сорбент отмывался дистиллированной водой до отрицательной реакции на ионы водорода с отделением взвеси и высушивался при комнатной температуре.

На втором этапе проводилось модифицирование раствором лактама, как исходного УМ, так и предварительно обработанного серной кислотой. Образцы заливались раствором капролактама (КЛ) при определенном соотношении и выдерживались в течение суток. После модифици-

рования сорбент промывался дистиллированной водой и высушивался. Затем все обработанные образцы углеродного материала были прогреты в сушильном шкафу при предварительно подобранной температуре в течение двух часов.

Исследование пористой структуры исходного и модифицированных образцов антрацита проводилось на анализаторе удельной поверхности дисперсных и пористых материалов СОРБОМЕТР-М (ООО «КАТАКОН», Россия). В качестве адсорбата использовался азот, расчеты удельной поверхности по методу БЭТ, объем микропор и суммарный объем мезо- и макропор по методу STSA проводился при использовании программного обеспечения прибора.

Анализ текстуры исследуемых образцов проводили на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6390 LV («JEOL», Япония) с энергодисперсионной приставкой JED 2300. Микрофотографии образцов до и после адсорбции ионов железа получали в режиме вторичных электронов (режим SEI).

ИК-спектры сорбента в виде таблетки с KBr (при соотношении УМ: KBr, равном 1:125) регистрировали в области $4000\text{--}550 \text{ см}^{-1}$ на ИК-фурье спектрометре ИнфраЛЮМ ФТ-08 («Люмэкс», Россия) с приставкой НПВО, число сканов 25.

Оценка гидролитической адсорбции на исходном и модифицированных образцах проводилась по ГОСТ - 33578.2015.

Оценка распределения функциональных центров в зависимости от pH на поверхности сорбентов проводилась на спектрофотометре П 5300В («Промэко-лаб», Россия) с использованием индикаторов Гаммета [7].

Адсорбция ионов железа на исследуемых образцах изучалась с использованием модельных растворов сульфата железа (II) в широком диапазоне концентраций. Навеска сорбента ($1.0000 \pm 0.0010 \text{ г}$) заливалась раствором (100.0 см^3), колбы герметично закрывались и выдерживались при постоянном перемешивании на

универсальном лабораторном встряхивателе WU-4 («PREMED», Польша) не менее суток. Для отделения твердой фазы и взвеси использовалась центрифуга MPW-310 («MPW Med. Instruments», Польша). Все опыты проводили при температуре $20.0 \pm 2.0^\circ\text{C}$.

Равновесная концентрация железа определялась по реакции образования окрашенного соединения с сульфосалициловой кислотой в щелочной среде (ПНД Ф 14:2:4.50-96) с использованием метода абсолютной калибровки на спектрофотометре П 5300В («Промэколаб», Россия).

Величина адсорбции (q , мг/г) рассчитывалась по уравнению:

$$q = \frac{(c_0 - c) \cdot V}{m}, \quad (1)$$

где c_0 и c – концентрация ионов железа в растворе до и после контакта с сорбентом, соответственно, мг/дм³; V – объем раствора, дм³; m – масса сорбента, г.

Для расчетов основных параметров равновесия адсорбции использовались модели Ленмюра (2) и модифицированной для случая адсорбции ионов уравнения Дубинина-Радушкевича (3) [8], линеаризованные формы которых представлены ниже:

$$\frac{c_e}{q} = \frac{c_e}{q_{\max}} + \frac{1}{q_{\max} k_L}, \quad (2)$$

где c_e – равновесная концентрация, моль/дм³; q_e – величина адсорбции при равновесной концентрации c_e , моль/г; q_{\max} – величина предельной адсорбционной емкости монослоя, моль/г; k_L – константа адсорбционного равновесия, дм³/моль.

Константа уравнения Ленгмюра (k_L) позволяет оценить величину мольной свободной энергии Гиббса адсорбции ($-\Delta G^0$):

$$-\Delta G^0 = RT \cdot \ln(wk_L), \quad (3)$$

где w – молярная концентрация воды, моль/дм³.

$$\ln q = \ln q_0 - k_{DR} \left(RT \ln \left(1 + \frac{1}{c_e} \right) \right)^2, \quad (4)$$

где q_0 – предельная избыточная адсорбция Гиббса, моль/г; c_e – равновесная концентрация, моль/дм³; k_{DR} – константа, связанная со средней свободной энергией адсорбции.

Константу уравнения Дубинина-Радушкевича (k_{DR}) использовали для оценки свободной энергии адсорбции (E), позволяющей установить тип взаимодействия сорбент – сорбат [7]:

$$E = \frac{1}{\sqrt{2k_{DR}}}. \quad (5)$$

Обсуждение результатов

Изотермы низкотемпературной адсорбции азота на исходном и модифицированных сорбентах (рис. 1) можно отнести ко II типу по классификации БДДТ, который характерен для случая полимолекулярной адсорбции на непористых и макропористых адсорбентах [9]. Слабо выраженные формы петли гистерезиса (рис. 1 б, в) предполагают наличие щелевидных и клиновидных пор (типы С и D по классификации де Бура).

Для всех образцов характерна низкая удельная поверхность ($S_{уд}$), незначительно изменяющаяся при модифицировании (табл. 1). При обработке углеродного материала кислотой (образец ПН) увеличивается суммарный объем пор (V_{Σ}), тогда как закрепление на поверхности УМ капролактама (образец ПС) привело к снижению данной характеристики. Рассчитанная средняя величина щелевидных пор (d_p) [10] для всех образцов превышает 50 нм, что предполагает отсутствие мезопор. Согласно полученным данным, исходный углеродный материал и его модифицированные образцы относятся к непористым материалам (суммарный объем пор не более $1.10 \text{ см}^3/\text{г}$) с малой удельной поверхностью. Большие рассчитанные размеры пор сорбента предполагают их формирование зонами

Таблица 1. Характеристики пористой структуры и состояния поверхности сорбентов
Table 1. Characteristics of the porous structure and surface condition of sorbents

Образец	Модификатор	$S_{уд}$, м ² /г	V_{Σ} , см ³ /г	d_p , нм	$pH_{вв}$
П	—	1.62	0.21	518	3.72
ПН	H ₂ SO ₄	7.68	1.07	557	3.25
ПС	капролактам	1.59	0.13	327	3.89
ПНС	H ₂ SO ₄ , капролактам	1.97	0.21	426	3.58

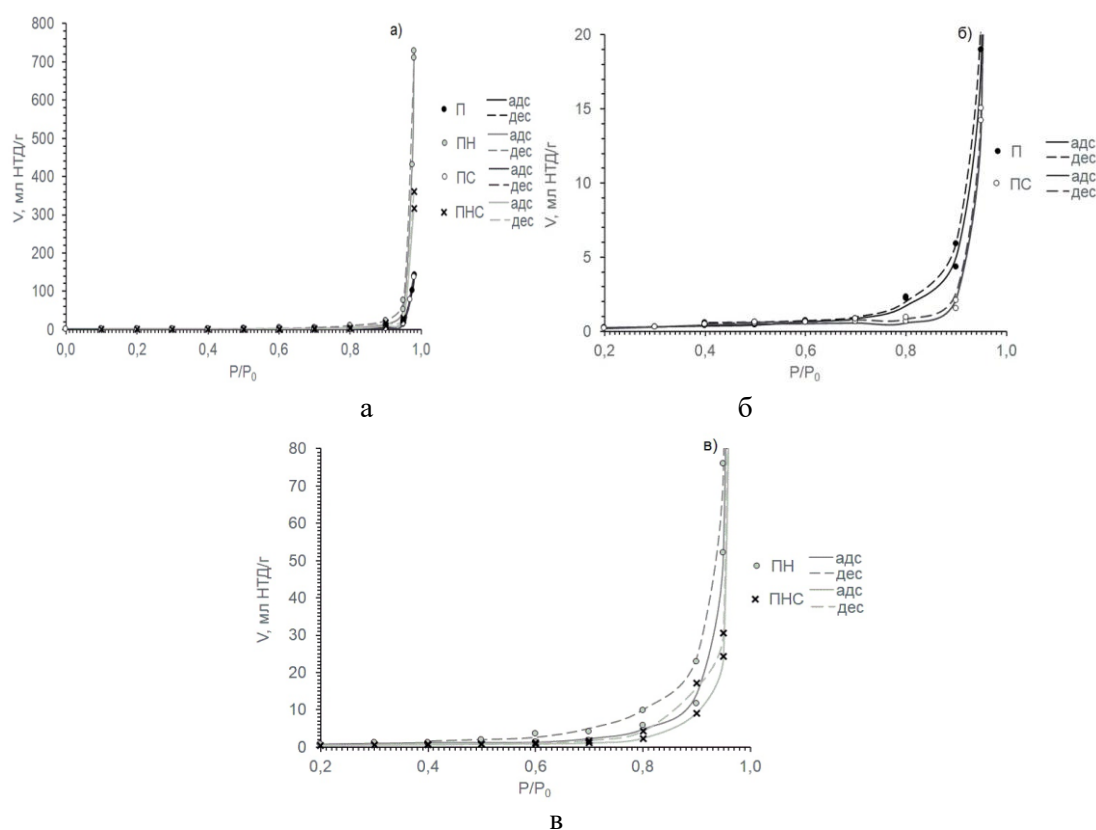


Рис. 1. Изотермы низкотемпературной адсорбции азота образцами углеродного материала: а – полная; б, в – область гистерезиса

Fig. 1. Isotherms of low-temperature nitrogen adsorption by carbon samples:
а – complete; б, в – hysteresis region

контакта крупных частиц исследованных материалов.

Анализ микрофотографий образцов П и ПС (рис. 2) подтвердил отсутствие у сорбента пор. Закрепление ионов железа при его адсорбции из водных растворов может происходить на сколах и дефектах углеродной поверхности (рис. 2. в).

Оценка гидролитической адсорбции исследуемых сорбентов показала незначительное изменение рН водной вытяжки (табл. 1). Так для ПНС $\Delta pH = -0.14$, а для ПС – 0.17. Наибольшее изменение рН

водной вытяжки характерно для обработанного кислотой образца (ΔpH (ПН)=0.47).

Закрепление на УМ модификатора привело к изменению поверхности сорбента. При обработке исходного сорбента капролактамом (ПС) на ИК-спектре (рис. 3) возрастает интенсивность пика при 3450 см⁻¹ и проявляется плечо пика при 3150 см⁻¹, которые можно отнести к валентным колебаниям свободной и ассоциированной –NH– групп лактамов [11]. Появившуюся при 1650 см⁻¹ полосу можно отнести к валентным колебаниям

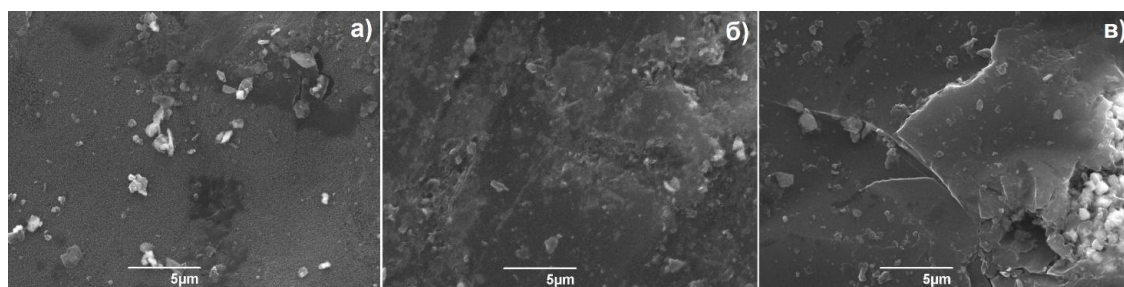


Рис. 2. Микрофотографии образцов углеродного материала: а – исходного; б – после модифицирования капролактамом; в- после модифицирования капролактамом и адсорбции ионов железа

Fig. 2. Micrographs of carbon material samples: a – initial; b – after modification with caprolactam; c- after modification with caprolactam and adsorption of iron ions

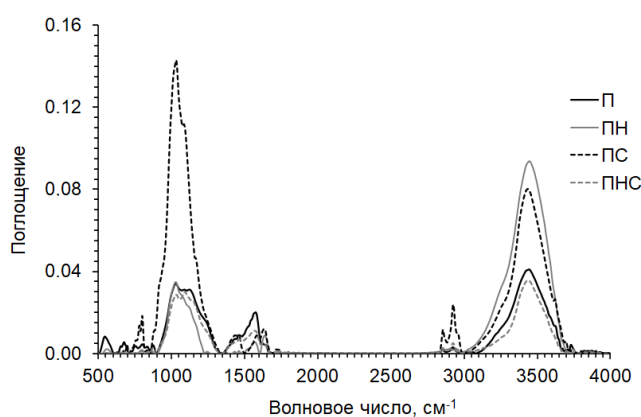


Рис. 3. ИК-спектры образцов углеродного материала

Fig. 3. IR spectra of carbon samples

$>C=O$ группы лактамов с большими циклами. Для циклических лактамов также характерна новая широкая полоса при $700-830\text{ см}^{-1}$, которую можно соотнести с внеплоскостными веерными колебаниями $-NH-$ группы [11]. Группа полос при 2850 и 2925 см^{-1} относится к валентным колебаниям $-CH_2-$ группы. Полоса при 1025 см^{-1} может относиться не только к деформационным колебаниям $-C-O-$, но и $-C-N-$. Полученные данные позволяют предположить, что капролактамы на углеродной поверхности закрепляются в молекулярной форме.

Для предварительно обработанного кислотой УМ (ПН) можно отметить рост интенсивности колебаний 3450 и 1025 см^{-1} , предположительно связанный с гидролизом поверхностных эфирных групп.

После закрепления на модифицированном кислотой образце капролактама

(ПНС) снижается интенсивность колебаний полос при 3450 и 1025 см^{-1} . Рост интенсивности широкой плохо разрешенной полосы при $1350-1620\text{ см}^{-1}$ можно связать с колебаниями ионизированных карбоксильной группы и аминокислот. Еще одна широкая полоса при $1075-1300\text{ см}^{-1}$ может быть отнесена к суммарным колебаниям $-C-O-$ сложных эфиров, $-N-O-$ оксимов и $-C-N-$ аминов. Можно предположить, что в данном случае при модифицировании капролактамом происходит раскрытие его цикла и закрепление на углеродной поверхности молекулы получившейся аминокaproновой кислоты (АКК) за счет ионной и амидной связи.

По данным анализа рК- спектров на поверхности сорбентов присутствуют функциональные группы в широком диапазоне кислотности (рис. 4). При модифицировании капролактамом (образец

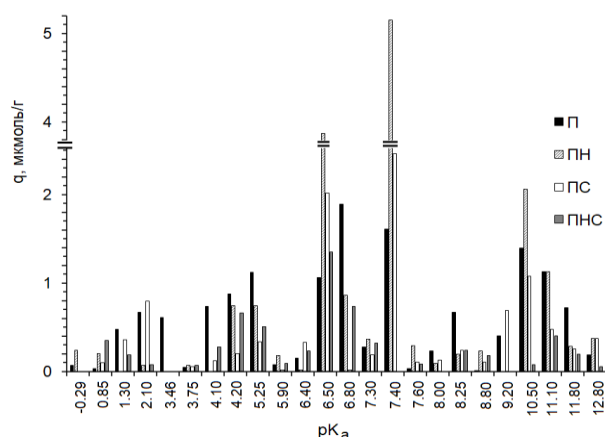


Рис. 4. рК-спектры распределения поверхностных кислотных групп образцов углеродного материала

Fig. 4. pK-distribution spectra of surface acid groups of carbon material samples

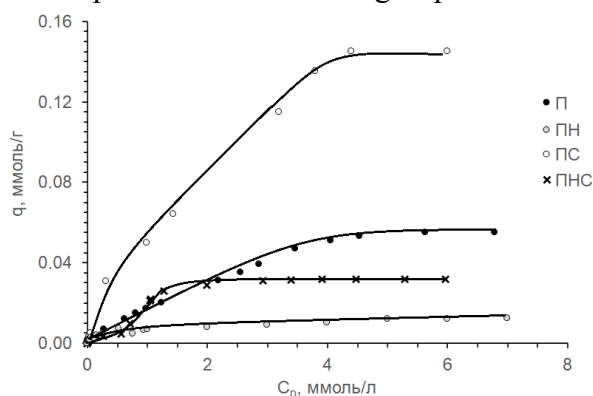


Рис. 5. Изотермы адсорбции ионов железа (II) образцами углеродного сорбента

Fig. 5. Isotherms of adsorption of iron (II) ions by carbon fiber samples

ПС) возрастает количество групп с рК 2.1, 9.2, 12.8 и в области 6.4-7.6. При этом доля групп с рК – 0.29, 3.5 и в области 10.5-11.8 снижается. Закрепление КЛ на поверхности, возможно приводит к перегруппировке или частичному блокированию активных центров сорбента. При действии кислоты на образец УМ увеличивается содержание сильнокислотных групп (с рК – 0.29, 0.85), а также групп с рК 6.50, 7.40 и 10.50. Можно предположить, что рост групп с рК<1.0 связан с адсорбцией ионов водорода на поверхности сорбента, а увеличение доли слабокислотных групп подтверждает предположение о гидролизе сложноэфирных поверхностных групп. При последовательной обработке УМ кислотой и КЛ резко возрастает количество групп с рК ~ 1.0, 6.6 и 8.8. Доля групп с рК 2.0 – 3.6 и 9.2 – 12.8

снижается. Полученные результаты подтверждают формирование связи аминокислотной группы с углеродной поверхностью.

Изотермы адсорбции ионов железа (рис. 5) можно отнести к L-типу по классификации Гильса [12]. Для образца ПНС на изотерме адсорбции наблюдается две ступени, позволяющие предположить изменение типа взаимодействия сорбент – сорбат. Обработка кислотой привела к снижению адсорбции ионов железа по сравнению с исходным образцом, возможно из-за отталкивания между адсорбированными ионами H^+ и Fe^{2+} . Модифицирование КЛ способствовало росту адсорбции ионов железа. Последовательная обработка кислотой и органическим модификатором не показала ожидаемые ре-

Таблица 2. Параметры равновесной адсорбции ионов железа (II) образцами углеродного сорбента

Table 2. Parameters of equilibrium adsorption of iron (II) ions by carbon sorbent samples

образец	Уравнение Ленгмюра			Уравнение Дубинина-Радushkevича		
	q_{max} , мкмоль/г	$-ΔG$, кДж/моль	R^2	q_0 , мкмоль /г	E , кДж/моль	R^2
П	3.86 95.0	35.78 23.47	0.9541 0.9508	121.5	12.58	0.9664
ПН	0.18 10.61	47.40 28.85	0.9961 0.9709	17.07	17.49	0.9426
ПС	210	24.76	0.9592	580.6	10.99	0.9975
ПНС	4.87 35.5	33.90 28.54	0.9707 0.9965	79.25	13.00	0.9214

зультаты. Наблюдается повышение адсорбции для ПНС по сравнению с ПН, но при этом результат оказался ниже, чем для исходного сорбента. Предположительно, это связано с тем, что модификатор на поверхности частично находится в виде АКК, поскольку подобное поведение при низких равновесных концентрациях наблюдалось для образцов углеродного материала, модифицированных аминоксаноуксусной кислотой [13]. Возможно, в данном случае также происходит блокирование доступа ионам железа к активным поверхностным центрам сорбента молекулами модификатора.

Использованные для расчёта основных адсорбционных параметров уравнения Ленгмюра и Дубинина-Радushkevича корректно ($R^2 > 0.92$) описывают адсорбцию ионов железа исследуемыми сорбентами (табл. 2). Для образцов П, ПН и ПНС в координатах уравнения Ленгмюра наблюдается два линейных участка.

Рассчитанная величина энергии Гиббса адсорбции ($-ΔG$) подтверждает самопроизвольность протекания процесса адсорбции ионов железа, а близкие значения $-ΔG$ для П и ПНС – о протекании процесса адсорбции по схожему механизму. Можно предположить, что при малых равновесных концентрациях (до 0.5 ммоль/дм³) на данных сорбентах преобладает адсорбция за счёт ионного обмена с кислотными группами сильными и средней силы. Для образца ПС, возможно, преобладает адсорбция за счёт формирования донорно-акцепторной

связи кислород- и азотсодержащих поверхностных групп. Для образцов П и ПНС также не следует исключать образование комплексных соединений ионов железа с углеродной поверхностью. Образование прочной связи ион металла – углеродная поверхность подтверждается высокими значениями характеристической энергии адсорбции (E). Согласно [14] если значение E находится в интервале от 8.0 до 18.0 кДж/моль, то преобладает процесс хемосорбции, под которым может подразумеваться не только ионный обмен, но и комплексобразование.

Заклучение

Установлено, что изменение состояния поверхности и адсорбционная активность исследуемого углеродного материала зависит от типа модификатора. Предварительная обработка серной кислотой не показала ожидаемых результатов, приведя к снижению адсорбции ионов железа как в случае только кислотного модифицирования, так и при последовательной обработке исследуемого образца кислотой и капролактамом. Модифицирование сорбента Пуrolат-Стандарт только капролактамом способствует лучшему извлечению ионов железа из водных сред.

Представленные способы модифицирования углеродного материала не приводят к заметному изменению пористой структуры. рК-спектры показывают рост количества слабо-кислотных групп для модифицированного кислотой

образца и уменьшение их, а также групп с рК от 9 до 11 для остальных модифицированных образцов.

Форма изотерм и рассчитанные параметры адсорбции предполагают образование внутрикомплексного соединения железа с молекулами модификатора и поверхностными группами сорбента.

Проведенные исследования позволяют рекомендовать для извлечения ионов же-

леза из природных водных объектов углеродный сорбент модифицированный капролактамом, обладающий наибольшей адсорбционной емкостью.

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. Gonchikov V.Ch., Gubaidulina T.A., Kaminskaya O.V., Apkarian A.S., *Bulletin of the tomsk polytechnic university*, 2012; 3(320): 37-40. (In Russ.)
2. Gora N.V., Belyaeva O.V., Chernyshev D.A., Golubeva N.S., *Water supply and sanitary technique*, 2024; 5: 5-9. <https://doi.org/10.35776/VST.2024.05.01> (In Russ.)
3. Chishi T.S., Sviridov A.V., Gindulin I.K., *Scientific aspect*, 2024; 4(39): 5164-5171. (In Russ.)
4. Astrakova T.V., *Catalysis in industry*, 2012; 1: 64-68. (In Russ.)
5. Solovyova Yu.V., Yustratov V.P., Gorelkin A.K., Timoshchuk I.V., Belyaeva O.V., *International research journal*, 2022; 7-2(121): 75-79. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.121.7.051> (In Russ.)
6. Krasnova T.A., Belyaeva O.V., Solovyova Yu.V., *Eurasian Union Of Scientists*, 2014; 7-1(7): 23-25. (In Russ.)
7. Specialized workshop on physico-chemical methods of analysis: electron and IR reflection spectroscopy, luminescent and X-ray fluorescence spectroscopy, refractometry, thermometry, kinetic pH-metric, indicator method – RCA. Theory and practice. Part II: educational and methodical manual, SPb.: ITMO University, 2016; 181. (In Russ.)
8. Donat R., Akdogan A., Erdem E., Cetisli H. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2005; 286: 43-52.
9. Greg S., Sing K., Adsorption, specific surface area, porosity, M.: Mir Publishers, 1984; 306. (In Russ.)
10. Gavrilova N.N., Nazarov V.V., Analysis of porous structure based on adsorption data: text-book. Manual, M.: Mendeleev Russian Technical University, 2015; 132 p. (In Russ.)
11. Prech E., Bulmann F., Affolter K., Definition of the structure of organic compounds M.: Mir Publishers, 2006; 438. (In Russ.)
12. Parfitt G., Rochester K., Adsorption from solutions on surfaces of solids, M.: Mir Publishers, 1986; 488 p. (In Russ.)
13. Gora N.V., Chernyshoyv D.A., Belyaeva O.V., *Chemistry for Sustainable Development*, 2024; 2(33): 1-10. (In Russ.)
14. Qiang ling Y., Ze X., Chuan-jin T., Liu Z., Wei-nan W., Tian Ch., Ying-ming T., *Geofluids*, 2020; 1-17. <https://doi.org/10.1155/2020/8560151>

Информация об авторах / Information about the authors

Н.В. Гора – к.т.н., доцент кафедры общей и неорганической химии Кемеровского государственного университета, Кемерово, Россия

О.В. Беляева – к.х.н., доцент кафедры общей и неорганической химии Кемеровского государственного университета, Кемерово, Россия

Д.А. Чернышёв – аспирант Кемеровского государственного университета, Кемерово, Россия

N.V. Gora – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of General and Inorganic Chemistry of the Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

O.V. Belyaeva – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of General and Inorganic Chemistry of the Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

D.A. Chernyshyov – Postgraduate student of Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

Статья поступила в редакцию 06.05.2025; одобрена после рецензирования 02.09.2025; принята к публикации 03.09.2025.

The article was submitted 06.05.2025; approved after reviewing 02.09.2025; accepted for publication 03.09.2025.