

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НА МЕЖФАЗНЫХ ГРАНИЦАХ

УДК 544.7+628.386

СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА АКТИВИРОВАННОГО УГЛЯ БАУ-А ПО ОТНОШЕНИЮ К ИОНАМ НИКЕЛЯ

© 2022 г. О. Д. Линников¹, *, И. В. Родина¹, А. Ю. Сунцов¹

¹ФГБУН Институт химии твердого тела УрО РАН,
ул. Первомайская, 91, Екатеринбург, 620990 Россия

*e-mail: linnikov@mail.ru

Поступила в редакцию 07.09.2021 г.

После доработки 30.05.2022 г.

Принята к публикации 06.06.2022 г.

Изучены сорбционные свойства активированного угля БАУ-А по отношению к ионам никеля. Исследования проведены при комнатной температуре на модельном растворе в диапазоне рН 5–8. Показано, что изотермы адсорбции ионов никеля активированным углем БАУ-А при различных рН раствора могут быть с одинаковой точностью описаны двумя классическими уравнениями: Фрейндлиха и Ленгмюра. Обнаружено отсутствие корреляции параметров уравнения Фрейндлиха с изменением рН раствора, что указывает на эмпирический характер описания экспериментальных данных этим уравнением. Параметры уравнения Ленгмюра закономерно меняются при изменении рН раствора. При росте рН раствора адсорбционная емкость БАУ-А по отношению к ионам никеля снижается, а константа адсорбционного равновесия напротив возрастает. Оценка свободной энергии адсорбции по уравнению Дубинина–Радушкевича показала, что она не превышает 1 кДж/моль, что исключает ионообменное взаимодействие ионов никеля с БАУ-А. Сопоставление параметров уравнения Ленгмюра по сорбции ионов никеля с аналогичными данными для ионов меди(II) показывает, что адсорбционная емкость БАУ-А по ионам никеля примерно на порядок выше, чем по ионам меди(II). Это позволяет рекомендовать данный сорбент для селективного извлечения ионов никеля и меди из смешанных растворов.

Ключевые слова: сорбция, ионы никеля(II), очистка воды, активированный уголь, БАУ-А, изотермы, уравнение Ленгмюра

DOI: 10.31857/S004418562205014X

ВВЕДЕНИЕ

Активированные угли и другие углеродные сорбенты давно и широко используются для очистки газов, природных и сточных вод от органических и неорганических примесей. Наибольшее применение они нашли для очистки растворов от нефтепродуктов и других нежелательных органических соединений [1]. Также данные сорбенты используются для удаления из загрязненных вод ионов тяжелых металлов [1–3]. Однако их промышленное применение нередко носит эмпирический характер, так как свойства этих сорбентов изучены еще недостаточно, а имеющиеся сведения часто противоречивы. Все это затрудняет проведение корректных технологических расчетов при проектировании схем и оборудования для очистки загрязненных вод.

Ионы двухвалентного никеля обладают высокой токсичностью. Они способны накапливаться в организме человека и вызывать онкологические заболевания. Поэтому они имеют достаточно низкую ПДК для питьевой воды (0.1 мг/л), а так-

же для вод рыбохозяйственного назначения (0.01 мг/л). Их глубокое осаждение из водных растворов в виде гидроксида возможно только при рН > 8–9. Однако вода с такой высокой щелочностью не может быть использована в коммунальном хозяйстве или сброшена в природные водоемы. Одним из способов решения данной проблемы может быть сорбционная очистка загрязненных никелем вод. В связи с этим поиск эффективных сорбентов для ионов двухвалентного никеля является важной научно-технической задачей.

Активированный уголь БАУ-А давно используется для очистки загрязненных вод от нежелательных примесей, в том числе и от ионов никеля [1–5]. Однако детальных исследований закономерностей сорбции ионов никеля БАУ-А в широком диапазоне рН очищаемого раствора практически не было проведено. Данной работой мы пытаемся заполнить этот пробел. Ранее было установлено, что сорбция ионов меди(II) активированным углем БАУ-А хорошо описывается уравнением Ленгмюра для простой мономолеку-

лярной адсорбции [6]. Были определены параметры этого уравнения в зависимости от pH очищаемого раствора. Можно предположить, что сорбция ионов никеля БАУ-А будет протекать по такому же механизму.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для исследований был взят технический активированный уголь БАУ-А (ГОСТ 6217-74). Все эксперименты проводили при комнатной температуре ($25 \pm 2^\circ\text{C}$) на модельном растворе, имитирующем природные и сточные воды, который готовили путем растворения в дистиллированной воде сульфатов натрия и никеля (Na_2SO_4 и NiSO_4). Концентрация сульфата натрия в модельном растворе составляла 400 мг/л, а ионов никеля меняли от 10 до 80 мг/л. Использованный для приготовления растворов Na_2SO_4 имел квалификацию “ч.”, а NiSO_4 – “ч. д. а.”.

Сорбцию ионов никеля активированным углем БАУ-А изучали при разных значениях pH модельного раствора. В этих экспериментах в модельный раствор при непрерывном его перемешивании на магнитной мешалке добавляли разное количество сорбента, а затем с помощью 0.1 N растворов серной кислоты (квалификация – “ОС. Ч.”) и NaOH (квалификация – “Х. Ч.”) проводили корректировку его pH до требуемого значения, которое контролировали в течение всего опыта с помощью pH-метра АНИОН 4100. При этом электроды pH-метра были постоянно погружены в модельный раствор с сорбентом. Длительность сорбционных экспериментов составляла 60 мин. Как показали предварительные опыты, этого времени было достаточно для установления сорбционного равновесия в растворе.

Величина сорбции рассчитывалась по формулам:

$$q = \frac{v(C_{\text{in}} - C)}{m}, \quad (1)$$

$$q = \frac{v(C_{\text{in}} - C)}{mS_s}, \quad (2)$$

где q – величина сорбции, мг/г (расчет по формуле (1)) или мг/м² (вычисление по формуле (2)); v – объем раствора, л; m – масса сорбента, г; C_{in} – начальная (до сорбции) концентрация ионов никеля в растворе, мг/л; C – остаточная (после сорбции) концентрация ионов никеля в растворе, мг/л; S_s – удельная поверхность сорбента, м²/г.

Значение водородного показателя (pH_{ZPC}), при котором поверхность БАУ-А имеет нулевой заряд (pH точки нулевого заряда) определяли потенциометрическим методом. Для этого одна проба раствора Na_2SO_4 (400 мг/л), объемом 50 мл, была оттитрована 0.0105 N раствором H_2SO_4 , а другая, такая же, – 0.01017 N раствором NaOH.

Затем аналогичное титрование провели для двух проб суспензии 0.5 г/л БАУ-А в таком же растворе сульфата натрия. Точка пересечения этих кривых титрования дает значение pH_{ZPC} данного сорбента. Отметим, ранее было обнаружено, что исследуемый образец активированного угля БАУ-А содержит небольшое количество примесей (CaCO_3 , MgCO_3 и т.п.), повышающих pH его суспензии [6]. Поэтому перед определением pH_{ZPC} сорбент был тщательно отмыт дистиллированной водой от этих примесей, до постоянного значения pH его суспензии.

В конце всех экспериментов при определении концентрации ионов никеля в растворе, чтобы исключить возможное искажение результатов анализа из-за сорбции части ионов никеля на бумажном фильтре при фильтровании, первые порции отфильтрованных растворов объемом 100 мл отбрасывали и для анализа брали оставшиеся объемы фильтратов. Процесс фильтрации занимал 20–30 мин. Таким образом, общее время контакта раствора с сорбентом составляло 80–90 мин.

Определение концентрации ионов никеля в растворе проводили фотоколориметрическим методом с диметилглиоксимом [7].

Морфологию и структуру частиц сорбента изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM JEOL 6390LA.

Удельная поверхность БАУ-А была определена методом БЭТ по низкотемпературной адсорбции азота на установке Gemini VII 2390 V1.03.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Физико-химические свойства БАУ-А

Микрофотография поверхности БАУ-А приведена на рис. 1. Видно, что БАУ-А имеет ярко выраженную пористую структуру. Измерение удельной поверхности БАУ-А показало, что она составляет 984.9 м²/г. При этом поверхность пор равна 674.6 м²/г. Таким образом, доля поверхности пор составляет около 69% от общей удельной поверхности угля. Это подтверждает литературные данные о том, что активированные угли обладают большой удельной поверхностью именно благодаря наличию у них пор.

На рис. 2 показаны кривые потенциометрического титрования раствора сульфата натрия (400 мг/л) и суспензии БАУ-А в нем. Точка нулевого заряда поверхности активированного угля БАУ-А соответствует pH 7.3 ($\text{pH}_{\text{ZPC}} = 7.3$, рис. 2).

Из рис. 2 следует, что БАУ-А хорошо адсорбирует на своей поверхности гидроксид-ионы (OH^-). На это указывает значительное различие между кривыми титрования 1 и 2 при $V(\text{NaOH}) > 0$. Кроме того, при добавлении щелочи в чистый раствор сульфата натрия pH последнего резко увели-

чивается, в то время как при подщелачивании суспензии БАУ-А рост рН идет не так сильно.

При подкислении наблюдается аналогичная картина: введение серной кислоты в чистый раствор сульфата натрия приводит к резкому падению его рН, а при подкислении суспензии БАУ-А сдвиг рН происходит в меньшей степени. Это свидетельствует о том, что ионы водорода H^+ также хорошо адсорбируются на поверхности сорбента. Однако с учетом того, что при введении БАУ-А в чистый раствор сульфата натрия наблюдается сдвиг рН последнего в щелочную область от $pH \approx 5.5$ до $pH \approx 7$ (см. рис. 2), можно сделать вывод, что ионы OH^- адсорбируются на поверхности сорбента в меньших количествах по сравнению с ионами H^+ .

КР-спектр активированного угля, снятый нами ранее в [6], приведен на рис. 3. Съемка производилась в диапазоне волновых чисел $50-4000\text{ см}^{-1}$ при комнатной температуре на спектрофотометре RENISHAW-1000 ($\lambda = 532\text{ нм}$, $P = 25\text{ мВт}$) [6].

Как видно, в КР-спектре присутствуют всего две линии, которые характерны для аморфного углерода (рис. 3). Это *D*-линия при $\sim 1332\text{ см}^{-1}$ и *G*-линия при 1593 см^{-1} . Линия *G* отвечает колебаниям атомов с sp^2 -типом гибридизации, находящихся в хорошо упорядоченных графитовых плоскостях. Линия *D* при 1332 см^{-1} обусловлена связями $C-C$ с sp^3 -типом гибридизации [6]. Эта линия также характеризует структурное разупорядочение и служит характеристикой степени дефектности фазы углерода, ее значительное уширение и высокая интенсивность свидетельствуют об аморфном состоянии углерода в БАУ-А. Малые по интенсивности линии около $2600-3000\text{ см}^{-1}$ являются обертонами линий *D* и *G* [6]. Отношение общих интенсивностей линий *G* и *D* (т.е. G/D), как известно, является показателем степени кристалличности. Вычисление по данным рис. 3 дает $G/D = 0.70$.

Сорбционные свойства по отношению к ионам никеля

Пример изотермы сорбции ионов никеля активированным углем БАУ-А при рН 8 представлен на рис. 4. Остальные зависимости для другой кислотности модельного раствора имели аналогичный вид.

Форма изотермы на рис. 4 свидетельствует о том, что она относится к *L*-типу. Такой вид изотерм чаще всего описывается эмпирическим уравнением Фрейндлиха:

$$q = K_f C^n \quad (3)$$

или классическим уравнением Ленгмюра для мономолекулярной адсорбции:

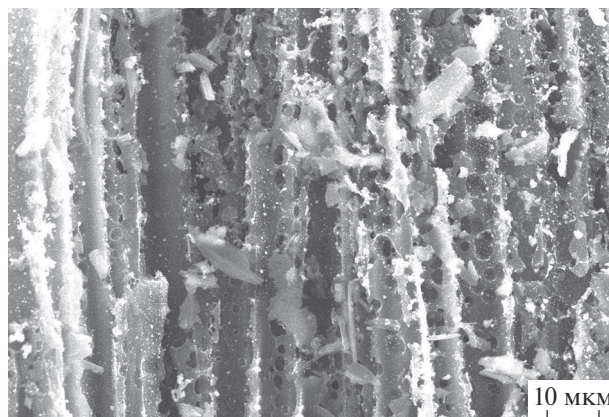


Рис. 1. СЭМ изображение поверхности активированного угля БАУ-А.

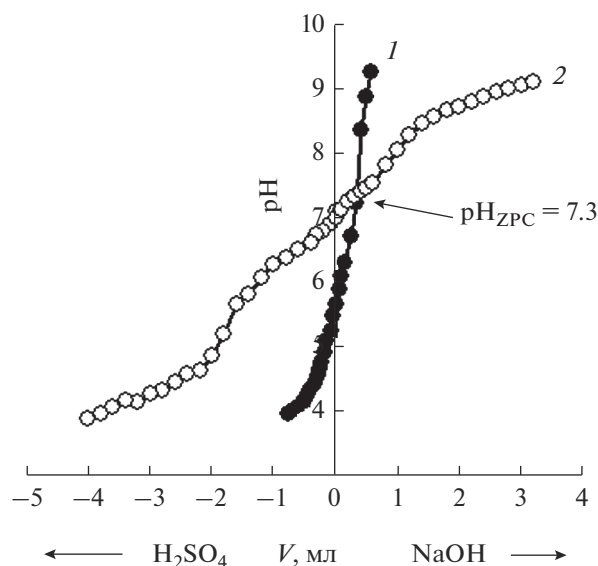


Рис. 2. Кривые потенциметрического титрования: 1 – титрование раствора Na_2SO_4 ; 2 – титрование суспензии БАУ-А в растворе Na_2SO_4 (V – объем титранта).

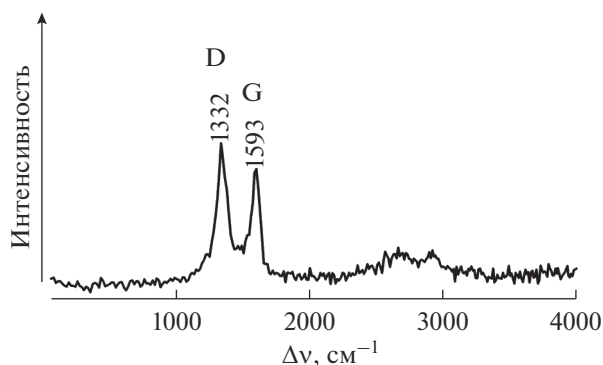


Рис. 3. КР-спектр активированного угля БАУ-А [6].

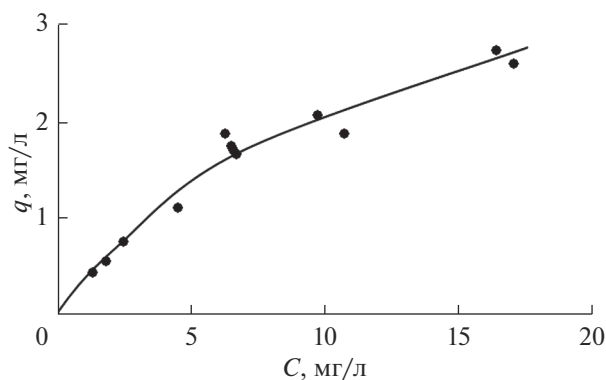


Рис. 4. Изотерма сорбции ионов никеля активированным углем БАУ-А при рН 8.

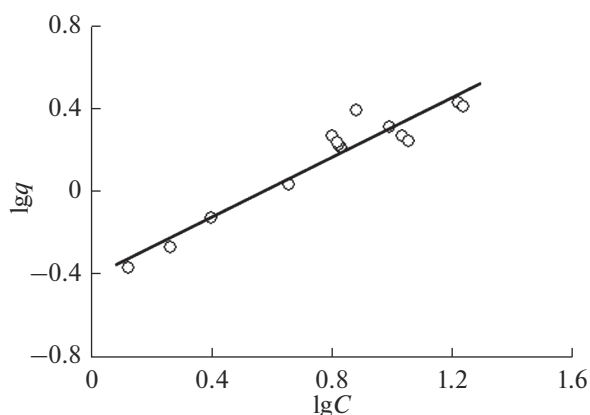


Рис. 5. Экспериментальные данные по сорбции ионов никеля активированным углем БАУ-А при рН 8 в координатах уравнения (5).

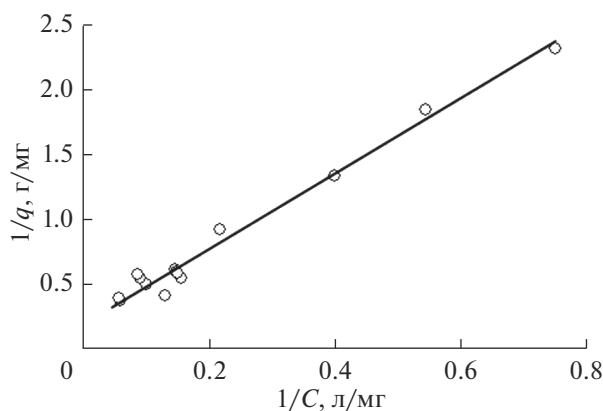


Рис. 6. Экспериментальные данные по сорбции ионов никеля активированным углем БАУ-А при рН 8 в координатах уравнения (6).

$$q = q_{\infty} \frac{K_L C}{1 + K_L C}, \quad (4)$$

где K_F – коэффициент пропорциональности; n – показатель степени ($n > 1$); q_{∞} – емкость адсорбционного монослоя сорбента, мг/г или мг/м²; K_L – константа адсорбционного равновесия, л/мг.

Линейные формы уравнений (3) и (4) имеют, соответственно, следующий вид:

$$\lg q = \lg K_F + \frac{1}{n} \lg C, \quad (5)$$

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_{\infty}} + \frac{1}{q_{\infty} K_L} \frac{1}{C}. \quad (6)$$

Типичные результаты обработки экспериментальных данных в координатах уравнений (5) и (6) показаны на рис. 5 и 6.

Как видно, оба уравнения, и Фрейндлиха и Ленгмюра, с удовлетворительной точностью описывают полученные экспериментальные данные (рис. 5 и 6), что, в частности, подтверждает высокие коэффициенты корреляции (табл. 1).

Принято считать, что уравнение Фрейндлиха для $n > 1$ соответствует адсорбции на неоднородной поверхности. При $n = 1$ оно переходит в классическую изотерму Генри. Однако найденные значения параметров уравнения (3) не обнаруживают никакой корреляции с изменением рН модельного раствора. Поэтому в данном случае можно сделать вывод об эмпирическом описании опытных данных этой изотермой.

В отличие от уравнения Фрейндлиха, при описании результатов эксперимента изотермой Ленгмюра обнаруживается четкая взаимосвязь между рН раствора и значениями параметров этого уравнения. Так, с увеличением рН раствора адсорбционная емкость монослоя (q_{∞}) БАУ-А по отношению к ионам никеля снижается, а константа адсорбционного равновесия (K_L) напротив возрастает (табл. 1). Можно выделить две области изменения адсорбционной емкости монослоя БАУ-А. При $5 \leq \text{pH} \leq 6$ наблюдается ее небольшое уменьшение, а при приближении к точке нулевого заряда поверхности БАУ-А ($\text{pH}_{\text{ZPC}} = 7.3$), т.е. при $\text{pH} > 6$, имеет место резкое падение. Для константы адсорбционного равновесия наблюдается обратная зависимость: при приближении к точке нулевого заряда поверхности сорбента происходит ее экспоненциальный рост.

Как правило, с ростом рН раствора адсорбционная емкость большинства сорбентов по отношению к ионам тяжелых металлов возрастает. В данном случае имеет место обратная картина, которую нельзя объяснить, например, изменением форм состояния ионов никеля, так как во всем изученном диапазоне рН он находится в растворе в виде ионов Ni^{2+} [8]. Обнаруженную зависи-

Таблица 1. Параметры уравнений Фрейндлиха, Ленгмюра и Дубинина–Радускевича для сорбции ионов никеля активированным углем БАУ-А в зависимости от рН модельного раствора (R – коэффициент корреляции)

Уравнение Фрейндлиха	рН 5	рН 6	рН 7	рН 8
K_F	0.31	0.24	0.22	0.40
n	1.43	1.32	1,18	1.41
R	0.977	0.987	0.974	0.955
Уравнение Ленгмюра				
q_∞ , мг/г	13.1	12.8	9.9	5.3
q_∞ , мг/м ²	0.0133	0.0130	0.0100	0.0053
K_L , л/мг	0.012	0.013	0.020	0.066
R	0.965	0.995	0.962	0.991
Уравнение Дубинина–Радускевича				
q_∞ , мг/г	5.1	3.5	2.8	2.0
$k \times 10^6$	43.6	4.91	2.66	0.946
E , кДж/моль	0.11	0.32	0.43	0.73
R	0.976	0.920	0.803	0.919

мость можно объяснить влиянием конкурентной адсорбции гидроксид-ионов, которые при повышении рН раствора, по-видимому, вытесняют ионы никеля с поверхности БАУ-А. Это, видимо, и приводит к наблюдаемому снижению адсорбционной емкости БАУ-А по отношению к этим ионам. Другими словами, ионы OH^- занимают (или перекрывают) на поверхности сорбента те места, куда могли бы адсорбироваться ионы никеля. При этом адсорбционное взаимодействие гидроксид-ионов с поверхностью БАУ-А, по-видимому, превышает аналогичное взаимодействие ионов никеля. Поэтому последние не могут их вытеснить с поверхности сорбента. В связи с этим представляет интерес оценка свободной энергии адсорбции ионов никеля на поверхности БАУ-А, которую можно сделать с помощью изотермы Дубинина–Радускевича [8, 9]:

$$q = q_\infty \exp(-k\varepsilon^2) \quad (7)$$

или (после логарифмирования) в линейной форме:

$$\ln q = \ln q_\infty - k\varepsilon^2, \quad (8)$$

где k – константа, относящаяся к средней энергии адсорбции; ε – потенциал Поляни, равный

$$\varepsilon = RT \ln(1 + 1/C). \quad (9)$$

Свободная энергии адсорбции (E) рассчитывается по формуле:

$$E = 1/\sqrt{2k}. \quad (10)$$

Известно, что если E лежит в диапазоне 8–16 кДж/моль, то процесс адсорбции протекает путем ионного обмена. При $E < 8$ кДж/моль имеет место физическая адсорбция [8, 9].

Типичный пример обработки экспериментальных данных в координатах уравнения (8) показан на рис. 7. Видно, что изотерма Дубинина–Радускевича несколько хуже описывает сорбцию ионов никеля активированным углем БАУ-А, чем теория Ленгмюра и эмпирическая формула Фрейндлиха. На это также указывают более низкие коэффициенты корреляции (табл. 1).

Оценка адсорбционной емкости БАУ-А по ионам никеля по уравнению (7) дает значения примерно в 2 раза ниже, чем при расчете по изотерме Ленгмюра. Однако тенденция снижения q_∞ с повышением рН раствора сохраняется. При этом наблюдается некоторое возрастание величины свободной энергии адсорбции (E) с ростом рН раствора, но даже при рН 8 ее величина не превышает 1 кДж/моль (см. табл. 1), что указыва-

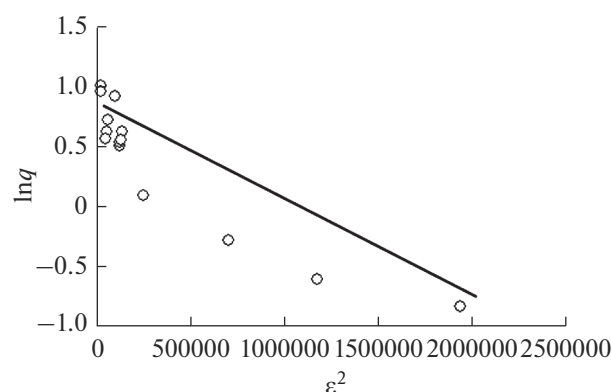
**Рис. 7.** Экспериментальные данные по сорбции ионов никеля активированным углем БАУ-А при рН 8 в координатах уравнения (8).

Таблица 2. Параметры уравнения Ленгмюра при сорбции ионов никеля(II) различными углеродными и угольными сорбентами

Сорбент	pH	q_{∞} , мг/г	q_{∞} , мг/м ²	K_L , л/мг	Источник
БАУ	—	2.4	0.003	—	[3]
АУВ	—	5.4	0.004	—	[3]
УНЧ	4	59.8	0.033	0.0167	[4]
АД-05-2	—	5.93	0.0108	0.0067	[5]
Сибунит	—	1.12	0.0025	0.0021	[5]
MWCNTs	5.4	3.73	0.019	0.197	[8]
DHHC	6	29.7	0.833	0.135	[10]
SWCNT	—	9.22	0.016	0.021	[16]
MWCNT	—	7.33	0.016	0.012	[16]
GAC	—	14.53	0.015	0.044	[16]
Zn formate glycolate	6	11.79	0.0073	0.0532	[17]
Zn glycerolate	6	8.388	0.0073	0.0929	[17]
МИУ-С	6	1.44	0.065	0.107	[18]

ет на физическую природу адсорбции и исключает ионообменное взаимодействие ионов никеля с БАУ-А. Этот результат хорошо согласуется с данными по ИК и КР спектроскопии сорбента [6]. Так, на ИК-спектре БАУ-А не было зафиксировано характеристических линий и полос, принадлежащих различным функциональным группам (ОН, С–Н и т.п.), а КР-спектр указывает на аморфное состояние углерода в данном сорбенте (рис. 3).

Сравнение коэффициентов корреляции уравнений (3) и (4) (табл. 1) показывает, что они примерно с одинаковой точностью описывают экспериментальные результаты по сорбции ионов никеля активированным углем БАУ-А. Ни одному из них нельзя отдать предпочтение. Это довольно типичная ситуация [8–17]. Однако в отличие от эмпирического выражения (3) уравнение (4) хорошо теоретически обосновано, и его параметры можно сопоставить с опубликованными литературными данными по сорбции ионов никеля другими углеродными и угольными сорбентами (см. табл. 2).

Сравнение данных табл. 1 и 2 показывает, что адсорбционная емкость изученного нами образца БАУ-А сопоставима с аналогичной величиной для других углеродных и угольных сорбентов.

Представляет интерес также сравнение сорбционных свойств БАУ-А по отношению к ионам никеля и меди(II), которые имеют близкие ионные радиусы и атомные массы. При этом обнаруживаются значительные отличия в протекании процесса адсорбции этих двух ионов на данном сорбенте при изменении pH раствора. Так, сорбция ионов меди(II) на БАУ-А тоже описывается уравнением Ленгмюра [6]. Однако с увеличением

pH раствора емкость адсорбционного моно слоя сорбента по отношению к ионам меди(II), в отличие от ионов никеля, не падает, а возрастает [6]. Константа же адсорбционного равновесия напротив несколько снижается. При pH 5 емкость адсорбционного моно слоя БАУ-А по ионам меди(II) составляет 0.0016 мг/м², а при pH 6 – 0.0026 мг/м² соответственно [6]. Это на порядок ниже, чем по ионам никеля (см. табл. 1). Полученный результат мы пока не можем объяснить. Можно лишь предположить, что данные различия обусловлены отличием в строение электронных оболочек ионов меди(II) и никеля. Однако в практическом плане он может быть использован для селективного извлечения этих ионов из смешанных растворов с помощью БАУ-А.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, изотермы сорбции ионов никеля активированным углем БАУ-А при различных значениях pH раствора могут быть с одинаковой точностью описаны двумя классическими уравнениями: Фрейндлиха и Ленгмюра. Отсутствие корреляции параметров уравнения Фрейндлиха с pH раствора свидетельствует об эмпирическом характере описания им полученных экспериментальных данных. Параметры же уравнения Ленгмюра закономерно меняются при изменении pH раствора. Так, при росте pH раствора адсорбционная емкость моно слоя БАУ-А по отношению к ионам никеля снижается, а константа адсорбционного равновесия напротив возрастает. Наиболее существенное снижение адсорбционной емкости моно слоя БАУ-А и рост константы адсорбционного равновесия происходит при pH > 6, с приближением к точке нулевого заряда поверхности БАУ-А

($pH_{ZPC} = 7.3$). Оценка свободной энергии адсорбции по уравнению Дубинина–Радускевича показала, что она не превышает 1 кДж/моль, что исключает ионообменное взаимодействие ионов никеля с БАУ-А. Сопоставление параметров уравнения Ленгмюра по сорбции ионов никеля с ранее полученными аналогичными данными для ионов меди(II) показывает, что адсорбционная емкость БАУ-А по ионам меди примерно на порядок ниже, чем по ионам никеля, что позволяет рекомендовать данный сорбент для селективного извлечения ионов никеля и меди из смешанных растворов.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием и планами НИР ИХТТ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов А.Д. Сорбционная очистка воды. Л.: Химия, 1982. 168 с.
2. Зорина Е.И. // Сборник докладов III межотраслевой конференции “Вода в промышленности-2012”. Москва. 2012. С. 122–124.
3. Гимаева А.Р., Валинурова Э.Р., Игдавлетова Д.К., Кудашева Ф.Х. // Сорбционные и хроматографические процессы. 2011. Т. 11. № 3. С. 350–356.
4. Милютин А.Д., Колесников В.А., Колесников А.В. // Успехи в химии и химической технологии. 2016. Т. 30. № 1. С. 42–43.
5. Дударева Г.Н., Петухова Г.А., Нгуен А.Т.Н., Сырых Ю.С. // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2013. Т. 49. № 4. С. 389–396. <https://doi.org/10.7868/S0044185613040025>
6. Линников О.Д., Родина И.В., Бакланова И.В., Сунцов А.Ю. // Сорбционные и хроматографические процессы. 2018. Т. 18. № 4. С. 554–562. <https://doi.org/10.17308/sorpehrom.2018.18/563>
7. Новиков Ю.В., Ласточкин К.О., Болдина З.Н. Методы исследования качества воды водоемов. Изд. 2-е, дополненное и переработанное. М.: Медицина, 1990. 400 с.
8. Yang S., Li J., Shao D., Hu J., Wang X. // J. Hazard. Mater. 2009. V. 166. P. 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.003>
9. Donat R., Akdogan A., Erdem E., Cetisli H. // J. Colloid Interface Sci. 2005. V. 286. P. 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.01.045>
10. Sivrikaya S., Albayrak S., Imamoglu M., Gundogdu A., Duran C., Yildiz H. // Desalination and water treatment. 2012. V. 50. P. 2–13. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.708234>
11. Kalkan E., Nadarogly H., Demir N. // Desalination and water treatment. 2012. V. 44. P. 180–189. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.691704>
12. Jiang Y., Pang H., Liao B. // J. Hazard. Mater. 2009. V. 164. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.107>
13. Li Y.H., Wang S., Wei J., Zhang X., Xu C., Luan Z., Wu D., Wei B. // Chem. Phys. Lett. 2002. V. 357. P. 263–266. [https://doi.org/10.1016/S0009-2614\(02\)00502-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2614(02)00502-X)
14. Basar C.A. // J. Hazard. Mater. 2006. V. B135. P. 232–241. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.11.055>
15. Di Z.C., Ding J., Peng X.J., Li Y.H., Luan Z.K., Liang J. // Chemosphere. 2006. V. 62. P. 861–865. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.06.044>
16. Lu C., Liu C. // J. Chem. Technol. Biotechnol. 2006. V. 81. P. 1932–1940. <https://doi.org/10.1002/jctb.1626>
17. Krasil'nikov V.N., Linnikov O.D., Gyrdasova O.I., Rodina I.V., Tyutyunnik A.P., Baklanova I.V., Polyakov E.V., Khlebnikov N.A., Tarakina N.V. // Solid state Sciences. 2020. V. 108. P. 106429. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2020.106429>
18. Линников О.Д., Родина И.В., Бакланова И.В., Сунцов А.Ю. // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2021. Т. 57. № 3. С. 255–261. <https://doi.org/10.31857/S0044185621030165>