

УДК 544.723. 054.8

КИНЕТИЧЕСКИЕ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УДАЛЕНИЯ ИОНОВ ЖЕЛЕЗА (III) ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ СМОЛОЙ Dowex G-26(H)

©2023 г. А.А. Гейдаров^{1*}, Н.И. Аббасова^{1*}, З.А. Джаббарова^{1*},
А.А. Ибрагимов^{2*}, Г.И. Алышанлы^{1*}

^{1*}Институт катализа и неорганической химии им. М. Нагиева НАН Азербайджана, Баку
E-mail: arif.heyderov.54@mail.ru

^{2*}Азербайджанский технический университет, Баку

Поступила в редакцию 22 мая 2023 г.

После доработки 2 августа 2023 г. принята к публикации 21 августа 2023 г.

Исследованы факторы, влияющие на адсорбцию железа (III) сильнокислотной катионообменной смолой Dowex G-26(H). В их числе доза адсорбента, pH раствора, длительность контакта, начальная концентрация Fe(III) в растворе и температура. По результатам экспериментов построены изотермы адсорбции Ленгмюра и Фрейндлиха. Обе изотермы вполне удовлетворительно описывают адсорбцию Fe(III) адсорбентом Dowex G-26(H). Об этом свидетельствуют высокие значения (близки к единице) коэффициента детерминации (R^2). Теоретически рассчитанная емкость адсорбента при разных температурах ($T = 293—313$ К) составляет 166,6—196,1 мг·г⁻¹. Определены кинетические и термодинамические параметры процесса (ΔH° , ΔS° , ΔG°). Положительные значения, полученные для стандартного изменения как энтропии (ΔS°), так и энтальпии (ΔH°), позволяют предположить, что адсорбция ионов Fe(III) на смоле — процесс эндотермический и протекает самопроизвольно.

Ключевые слова: адсорбция; смола Dowex G-26(H); адсорбционная емкость сорбента; изотермы адсорбции; кинетика; термодинамика.

Железо — важный микроэлемент для жизнедеятельности человека, но в больших дозах этот элемент может представлять опасность для здоровья и даже стать ядом. Сточные воды и технологические растворы при добыче руды помимо цветных металлов содержат высокие концентрации Fe(III) — в пределах 50—95 000 мг/дм³. Всемирная организация здравоохранения рекомендует ПДК (предельная допустимая концентрация) по Fe(III) в питьевой воде ниже 0,3 мг/л [1].

Методы очистки промышленных сточных вод, содержащих тяжелые металлы, часто рассчитаны лишь на снижение токсичности. Физико-химические процессы очистки, такие как адсорбция, ионный обмен, мембранная фильтрация, электродиализ, обратный осмос, ультрафильтрация, часто используются при очистке сточных вод [2].

Одним из перспективных способов, позволяющих селективно извлекать ионы Fe(III), является сорбция. Представленные в статье методы основаны на изучении кинетических

свойств и получении изотерм адсорбции, являющихся одной из важнейших характеристик механизма адсорбции. Параметры изотермы оценены по результатам экспериментов по сорбции катионов Fe(III).

Сорбционный способ очистки промышленных растворов в ряде случаев оказывается наиболее технологически и экономически предпочтительным, в частности при их значительных объемах и низких содержаниях целевых компонентов [3]. Всевозможные адсорбенты, такие как активированный уголь [4, 5], нанобиосорбенты [6], цеолиты [7], материалы для электрокоагуляции [8], золи [9], модифицированный клиноптилолит [10], использовались в исследованиях для удаления из сточных вод загрязняющих веществ, особенно железа.

Изучению удаления ионов железа путем сорбции посвящены многие работы, авторы которых анализируют данные равновесной адсорбции с использованием моделей Ленгмюра и Фрейндлиха [2, 10—14].

Развитие синтеза новых ионообменных материалов, отличающихся высокой обменной емкостью и селективностью, делает целесообразным более широкое применение сорбции при переработке растворов медно-цинковой технологии. В связи с этим в настоящей работе исследована возможность извлечения Fe(III) из технологических растворов с использованием смолы Dowex G-26(H) компании Sigma and Aldrich Co (USA).

Изучением адсорбционной способности смолы Dowex G-26 из технологических растворов в работах [15—17] показано, что этот адсорбент проявляет более высокую адсорбционную способность по ионам Ca^{2+} , Na^+ , Al^{3+} , Zr^{4+} , Cu^{2+} . В работе [16] для удаления ионов Ca^{2+} и Na^+ из раствора карбоната лития использовали смолу Dowex G-26. Найдено, что эти ионы могут быть эффективно удалены из раствора карбоната лития за 4 мин при pH 7. При этом чистота карбоната лития составила 99,9%, а степень извлечения — ~87,6%.

В работе [17] для отделения ванадия от алюминия и циркония из алюминатного раствора также использовали сильноокислотную катионообменную смолу Dowex G-26. Отмечена наибольшая эффективность адсорбции циркония из раствора при pH 13 (90—94%), а алюминий максимально адсорбируется при pH 12,5.

Результаты исследований подтвердили потенциальную возможность использования смолы Dowex G-26(H) в качестве эффективного адсорбента для извлечения ионов Fe(III) из жидкой фазы как при малых, так и высоких его концентрациях. В то же время остался невыясненным вопрос о кинетических и термодинамических характеристиках процесса адсорбции Fe(III) на этой смоле.

Данная работа выполнена с целью исследования адсорбции ионов Fe(III) на смоле Dowex G-26(H) для расчета термодинамических и кинетических параметров этого процесса, необходимых для проектирования и эксплуатации сорбционных установок.

Материалы и методики эксперимента. Для сорбционных исследований подготовили монокомпонентные растворы на основе сульфата Fe(III) с концентрацией в пределах 5—200 мг·л⁻¹. Такие концентрации соответствуют концентрации металла в техногенных растворах.

Использованы химически чистые реагенты, такие как $\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, серная и соляная кислоты, гидроксид натрия и др., а также катионообменная смола Dowex G-26(H) без дополнительной очистки.

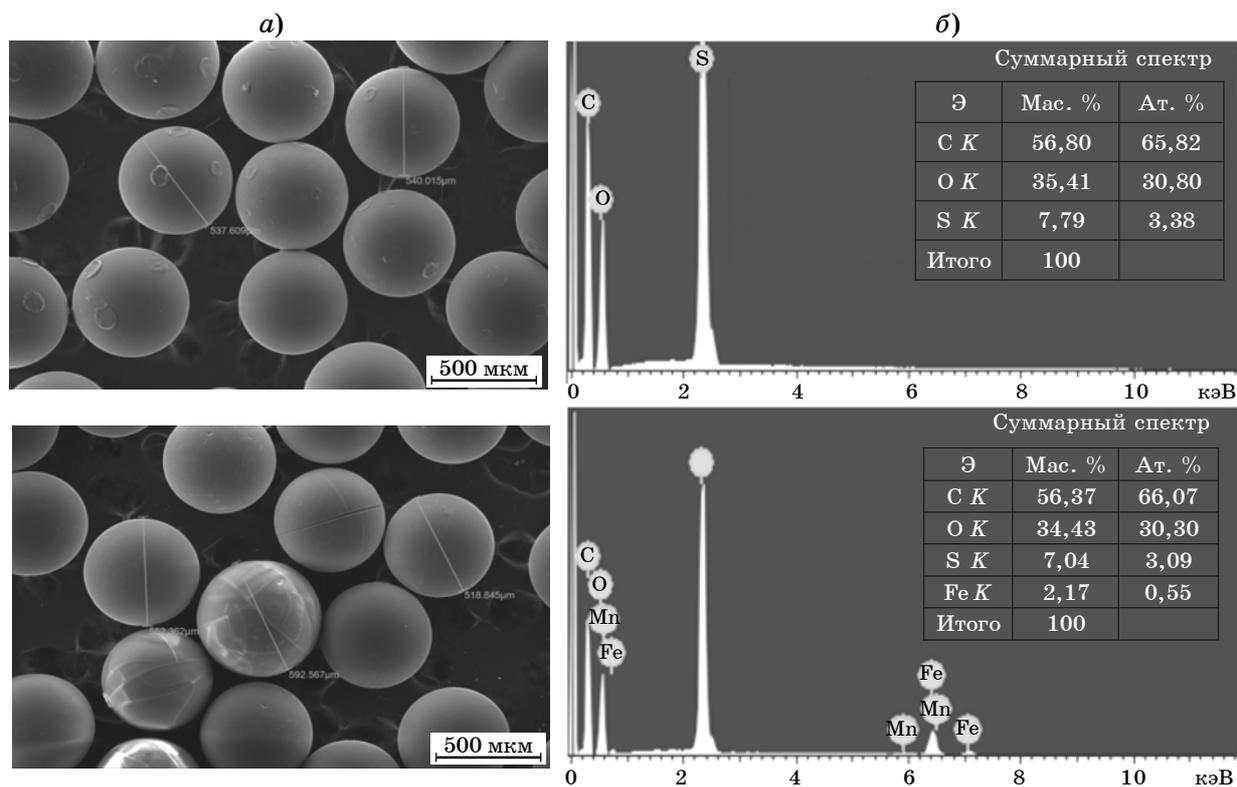
Смола Dowex G-26(H) относится к монофункциональным сильноокислотным катионитам полимеризационного типа, получена сульфохлорированием гранулированного сополимера стирола и дивинил бензола. Для ее активации компания-поставщик Sigma and Aldrich Co (США) применяла соляную кислоту. Основные показатели смолы Dowex G-26(H) приведены ниже:

Средний диаметр зерна, мм	0,6—0,7
Диапазон pH	0—14
Максимальная рабочая температура, °C	130
Содержание воды, %	45—52
Плотность частиц, г·мл ⁻¹	1,22
Ионная конверсия, %	99,7
Регенерант H_2SO_4 , %	1—10
Средний размер частиц, мкм	650±50

Характеристики исходной смолы Dowex G-26(H) и смолы, насыщенной катионом Fe^{3+} , получены по данным сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) (фиг. 1). После адсорбции наблюдается наличие полимерных нитей адсорбированных катионов Fe(III). По данным ЭДС анализа твердая фаза содержит, мас. %: С 56,37; О 34,43; S 7,04 и Fe 2,17.

Процесс адсорбции Fe(III) из растворов проводили в статических условиях на встряхивателе в течение времени, требуемого для установления адсорбционного равновесия. При этом определяли концентрацию Fe(III) до и после сорбции.

Данные для построения изотерм адсорбции Fe(III) при температурах, отличных от комнатной (30—40 °C), снимали в термостатированной установке, снабженной мешалкой. Навеску адсорбента массой от 0,05 до 0,5 г помещали в колбу Эрленмейера с 50 или 100 мл раствора Fe(III) известных концентрации и pH. Растворы перемешивали со скоростью 100 мин⁻¹ до установления адсорбционного равновесия; pH раствора регулировали 0,1 М серной кислотой или 0,1 М гидроксидом натрия. По окончании процесса сорбции растворы фильтровались и концентрация ионов Fe(III) в растворах контролировалась стандартными методами количествен-



Фиг. 1. Результаты анализов (а — СЭМ; б — ЭДС) исходной смолы Dowex G-26(Н) до (верх) и после (низ) сорбции катионов Fe(III)

ного анализа. Погрешность измерения составляла 0,02 мг/л [18].

Статическую адсорбционную емкость сорбента ($Q_{\text{равн}}$, мг·л⁻¹) вычисляли по формуле:

$$Q_{\text{равн}} = (C_0 - C_{\text{равн}})V/m, \quad (1)$$

где C_0 , $C_{\text{равн}}$ — исходная и равновесная концентрации Fe(III) в растворе, мг·л⁻¹; V — объем раствора, л; m — навеска адсорбента, г.

Степень извлечения ω оценивали долей адсорбированного вещества, мас.%, относительно исходного

$$\omega = \frac{(C_0 - C_{\text{равн}})}{C_0} 100. \quad (2)$$

Для изучения адсорбционной способности сорбента по отношению к ионам Fe(III) строили изотермы и кинетические кривые адсорбции.

Для определения термодинамических параметров адсорбции ионов Fe(III) изотермы адсорбции получены при pH 3,5 и температурах 20 (комнатная), 30 и 40 °C (293, 303 и 313 К). Для каждой изотермы измеряли наклон кривой в точке с нулевой концент-

рацией сорбата по уравнению аппроксимации (изотерма Ленгмюра). Далее по температурной зависимости этого наклона рассчитывали энтропию и энтальпию адсорбции.

Для определения наиболее подходящей модели адсорбционного процесса использовались следующие линеаризованные уравнения изотерм сорбции, описывающие адсорбционное равновесие: изотерма Ленгмюра:

$$\frac{C_{\text{равн}}}{Q_{\text{равн}}} = \frac{1}{K_L Q_{\text{max}}} + \frac{C_{\text{равн}}}{Q_{\text{max}}}; \quad (3)$$

изотерма Фрейндлиха:

$$\lg Q_{\text{равн}} = \lg K_F + \frac{1}{n} \lg C_{\text{равн}}, \quad (4)$$

где Q_{max} — максимальная адсорбционная емкость, мг·л⁻¹; K_L — константа равновесия Ленгмюра, связанная со свободной энергией адсорбции, л·мг⁻¹; $C_{\text{равн}}$ — равновесная концентрация адсорбата (иона Fe(III)) в растворе, мг·л⁻¹; $Q_{\text{равн}}$ — количество ионов Fe(III), адсорбированных единицей массы адсорбента, мг·л⁻¹; K_F — константа равновесия Фрейндлиха; n — эмпирическая константа.

Изотерма Ленгмюра означает, что свободная энергия адсорбции не зависит от степени заполнения поверхности, и предсказывает насыщение твердой поверхности ($Q_{\max} = Q_{\text{равн}}$) при монослойном покрытии адсорбата при высоких значениях $C_{\text{равн}}$ и линейную адсорбцию при низких значениях $C_{\text{равн}}$.

Результаты исследований и их обсуждение. Изотермы адсорбции. Влияние дозы адсорбента. К важным параметрам при определении эффективности адсорбционной емкости сорбента относится доза адсорбента. При исследовании влияния количества адсорбента на удаление ионов Fe(III) использовали разные его дозы $m_{\text{адс}}$ в диапазоне 0,05—0,5 г и pH 3,5 при исходной концентрации металла 100 мг·л⁻¹. Результаты проиллюстрированы на фиг. 2.

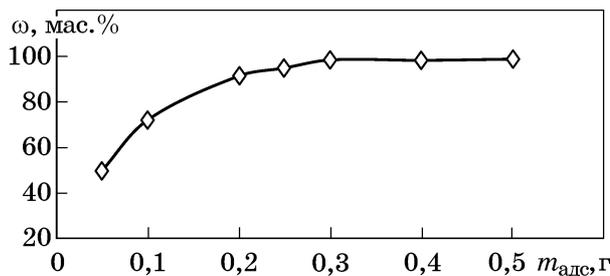
Видно, что адсорбция Fe(III), оцениваемая по степени извлечения ионов последнего, возрастает от 40 до 90% с увеличением дозы адсорбента в пределах 0,05—0,2 г. Дальнейшее ее увеличение на процесс сорбции не влияет.

Влияние длительности контакта. При исследовании этого важного параметра для оценки эффективности адсорбции ионов Fe(III) длительность контакта варьировали от 10 до 240 мин. Результаты исследования водного раствора с концентрацией металла 100 мг/л представлены на фиг. 3.

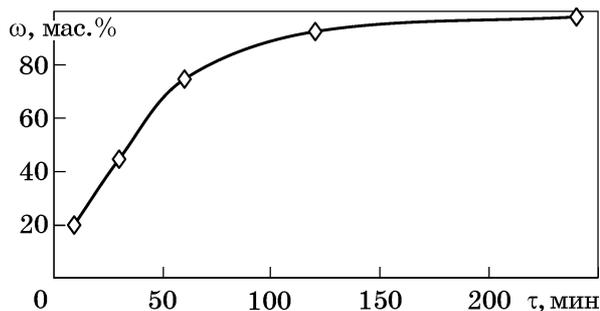
Из графика видно, что скорость адсорбции ионов Fe(III) на смоле очень высока и адсорбционное равновесие достигается в течение 2 ч. За это время сорбируется основное количество Fe(III). Достигнуто значение $\omega = 92,5\%$. При увеличении длительности контакта до 4 ч сорбировалось 98% Fe(III).

Зависимость степени адсорбции Fe(III) на смоле Dowex G-26 от pH среды. Установлено заметное влияние на сорбцию кислотности среды. Из результатов эксперимента, представленных на фиг. 4, следует, что адсорбционная способность возрастает с увеличением pH до 4,0. Максимальная адсорбция Fe(III) в статических условиях достигается при кислотности в пределах pH 2—4.

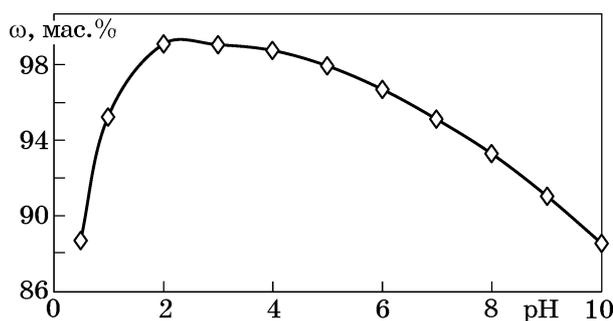
Влияние исходной концентрации Fe(III) на процесс адсорбции. Данное исследование выполняли при исходной концентрации Fe(III) в диапазоне 5—200 мг·л⁻¹ и pH 3,5. На фиг. 5 видно, что степень сорбции ионов железа уменьшается с увеличением их начальной концентрации в растворах. При относи-



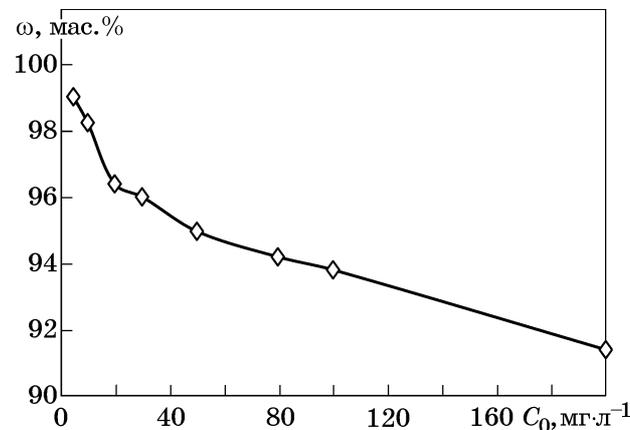
Фиг. 2. Влияние дозы адсорбента на эффективность сорбции Fe(III). Характеристика раствора: $C_0 = 100 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$, pH 3,5, длительность контакта 120 мин, $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $V = 0,05 \text{ л}$



Фиг. 3. Эффективность сорбции Fe(III) в зависимости от длительности контакта со смолой в растворе с характеристиками: $C_0 = 100 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$, pH 3,5, $m_{\text{адс}} = 0,2 \text{ г}$, $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$



Фиг. 4. Влияние pH раствора на эффективность сорбции Fe(III) адсорбентом Dowex G-26 ($C_0 = 100 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$, длительность контакта 180 мин, доза адсорбента 0,2 г, объем раствора $V = 0,05 \text{ л}$, $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$)



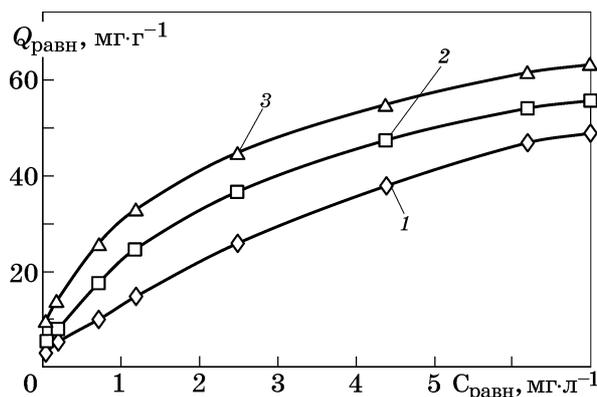
Фиг. 5. Влияние исходной концентрации ионов Fe(III) на эффективность сорбции ($m_{\text{адс}} = 0,2 \text{ г}$, $V = 100 \text{ мл}$, pH 3,5, $\tau = 1 \text{ ч}$)

тельно низких концентрациях ионов Fe(III) в растворе (5–30 мг·л⁻¹) и дозе адсорбента 2 г·л⁻¹ степень удаления Fe(III) достигает 99,02–96%.

Итак, проведенное исследование показало, что на эффективность сорбции существенное влияние оказывают pH среды, длительность контакта и начальная концентрация ионов Fe(III) в растворе.

Влияние температуры на процесс адсорбции. Влияние температуры на адсорбционный процесс сложное [19]. При ее повышении возрастает скорость диффузии молекул адсорбата как во внешний пограничный слой, так и во внутрь пор, в результате снижается вязкость раствора. Кроме того, изменение температуры влияет на равновесную емкость адсорбента для конкретного адсорбата. Влияние температуры исследовано при pH 3,5 и при трех ее значениях: 293 (комнатная), 303 и 313 К (фиг. 6). Из графиков на фиг. 6 видно, что количество сорбируемых ионов Fe(III) увеличивается с повышением температуры, т.е. адсорбционная емкость сорбента с повышением температуры возрастает.

Кинетические кривые адсорбции ионов Fe(III) на адсорбенте при разных температу-



Фиг. 6. Зависимость адсорбции ионов Fe(III) от равновесной концентрации раствора при температуре T , К: 1 — 293; 2 — 303; 3 — 313

рах позволили определить температурную зависимость константы равновесия Ленгмюра (K_L), максимальную адсорбционную емкость (Q_{\max}) и коэффициент детерминации (R^2) (табл. 1).

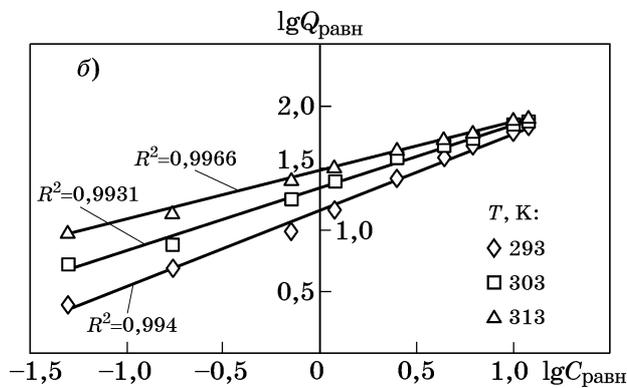
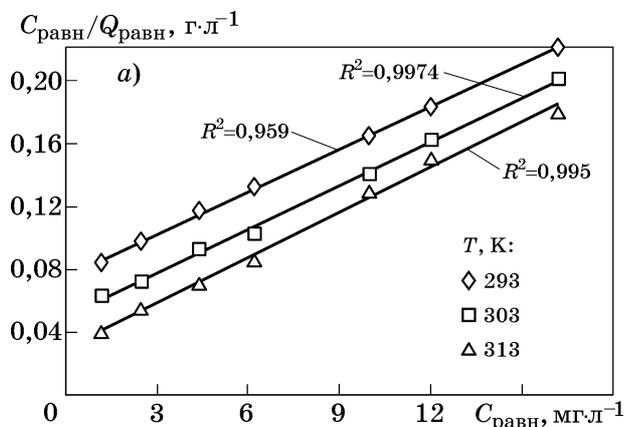
Изотермы хорошо аппроксимируются уравнением Ленгмюра. Значения Q_{\max} и K_L рассчитывались графическим способом (фиг. 7, а). В линейных координатах тангенс угла наклона прямой равен $1/Q_{\max}$, а пересечение — $1/Q_{\max}K_L$.

Высокие значения коэффициентов детерминации (R^2), близкие единице (см. табл. 1),

Таблица 1

Зависимость значений констант изотерм Ленгмюра и Фрейндлиха от температуры (адсорбент — смола Dowex G-26(H))

T , К	Константа Ленгмюра			Константа Фрейндлиха		
	Q_{\max} , мг·г ⁻¹	K_L , л·мг ⁻¹	R^2	K_F	$1/n$	R^2
293	166,6	0,08	0,959	14,49	0,6807	0,995
303	172,4	0,112	0,9974	24,6	0,5027	0,997
313	196,1	0,17	0,995	30,3	0,3995	0,959



Фиг. 7. Линейные графики изотерм адсорбции железа (III) адсорбентом Dowex G-26: а — изотермы Ленгмюра; б — изотермы Фрейндлиха

Термодинамические параметры процесса адсорбции ионов Fe(III) на катионите Dowex G-26 при разных температурах и pH3,5

T, K	$K_{\text{адс}}$	$\Delta G^\circ, \text{кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$	$\Delta S^\circ, \text{Дж}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\Delta H^\circ, \text{кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$	R^2
293	13,328	-6,308	140,7	34,955	0,9963
303	19,308	-7,458	139,9		0,9963
313	33,34	-9,125	140,8		0,9963

свидетельствуют о том, что данные по адсорбции соответствуют моделям Ленгмюра и Фрейндлиха и хорошо координируются с тремя выбранными температурами. Однако, при температуре 20 °C получено, что значение R^2 по Фрейндлиху ($R^2 = 0,995$) больше по сравнению с коэффициентом детерминации по Ленгмюру ($R^2 = 0,959$). Следует отметить, что теоретически рассчитанная емкость насыщения адсорбента составляет 166,6—196,1 мг·л⁻¹ при разных температурах и зависит только от адсорбата, от его природы, а значения K_L составляют 0,08—0,17 л·мг⁻¹ и увеличиваются с повышением температуры, т.е. адсорбент обладает наибольшей адсорбционной способностью.

Значения интенсивности адсорбции получены непосредственно по наклону прямой Фрейндлиха, а адсорбционная емкость ($Q_{\text{равн}}$) рассчитана от точки пересечения линейного графика $\lg Q_{\text{равн}} - \lg C_{\text{равн}}$ (фиг. 7, б). Более высокое дробное значение ($1/n = 0,68 - 0,399$) означает, что на систему действуют большие адсорбционные силы [20] (см. табл. 1).

Термодинамические исследования. Чтобы ответить на вопрос: процесс адсорбции — самопроизвольный процесс или нет, выполнены термодинамические исследования. Изменения энтальпии (ΔH°), свободной энергии (ΔG°) и энтропии (ΔS°) для процесса адсорбции Fe(III) адсорбентом Dowex G-26(H) рассчитаны по следующим уравнениям:

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_{\text{адс}}, \quad (5)$$

$$\Delta S^\circ = (\Delta H^\circ - \Delta G^\circ)/T. \quad (6)$$

Вначале вычисляются значения константы равновесия процесса адсорбции при разных температурах: $K_{\text{адс}} = Q_{\text{макс}}/K_L$. Например, для $T = 293$ К по данным табл. 1 получим $K_{\text{адс}} = 166,6 \cdot 0,08 = 13,328$ (табл. 2).

Из уравнений (5) и (6) можно получить зависимость константы равновесия адсорбции ($\ln K_{\text{адс}}$) от температуры ($1/T$):

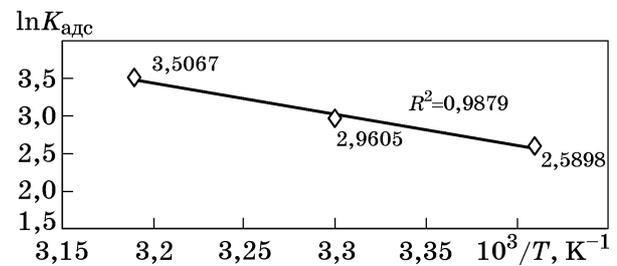
$$\ln K_{\text{адс}} = -\frac{\Delta H^\circ}{RT} + \frac{\Delta S^\circ}{R}. \quad (7)$$

Установив экспериментальную зависимость константы равновесия адсорбции ($\ln K_{\text{адс}}$) от ($1/T$), можно определить интегральную теплоту адсорбции, т.е. энтальпию ΔH° (фиг. 8). Аналитический способ расчета интегральной теплоты адсорбции основан на следующем уравнении:

$$\Delta H = \frac{RT_1 T_2 \ln(K_2/K_1)}{T_2 - T_1}. \quad (8)$$

Изменения свободной энергии (ΔG°) и энтропии (ΔS°) для процесса адсорбции ионов Fe(III) адсорбентом рассчитаны по уравнениям (5) и (6) (см. табл. 2).

Положительное значение ΔH° указывает на эндотермический характер адсорбционного процесса ($\Delta H^\circ = 34,955$ кДж·моль⁻¹) и адсорбция ионов Fe(III) на смоле обусловлена в основном физическими силами. Из литературы [21] известно, что если значение ΔH° невелико (10—40 кДж·моль⁻¹), то можно говорить о физической адсорбции ионов, обусловленной физическими силами. Положи-



Фиг. 8. Зависимость константы равновесия адсорбции Fe(III) $K_{\text{адс}}$ от температуры

тельные значения энтропии ($\Delta S^\circ = 0,14$ кДж·моль⁻¹·К⁻¹) указывают на увеличение хаотичности на границе раздела твердое вещество/раствор при адсорбции. Отрицательные значения изменения свободной энергии ΔG° (от $-6,308$ до $-9,125$ кДж·моль⁻¹) указывают на самопроизвольный характер адсорбции. С повышением температуры значения свободной энергии уменьшаются. В табл. 2 обобщены полученные значения термодинамических параметров.

Выводы. 1. В результате исследования сорбции ионов Fe(III) из модельных растворов в статических условиях при разных температурах на катионите Dowex G-26(H) получены изотермы адсорбции. Изотермы адсорбции адекватно описываются уравнениями Ленгмюра и Фрейндлиха.

2. Показано, что максимальная адсорбционная емкость сорбента по отношению к ионам Fe(III) при комнатной температуре составила 166,6 мг·г⁻¹.

3. Изучены термодинамика и кинетика процесса сорбции и определены ее термодинамические и кинетические параметры. Термодинамические параметры (ΔG° , ΔH° , ΔS°) рассчитывали с использованием констант равновесия адсорбции, полученных на основе изотермы Ленгмюра. Показано, что адсорбция ионов Fe(III) на смоле протекает самопроизвольно и является эндотермическим процессом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gordan, B.W.H.Q.* Guidelines for drinking organization water quality / B.W.H.Q. Gordan. — Geneva : Utah edition W.H.O, 2022. 614 p.
2. *el-Sberif, I.Y.* Removal of Mn(II) and Fe(II) ions from aqueous solution using precipitation and adsorption methods / I.Y. el-Sberif, N.A. Fathy, A.A. Nanna // *J. Appl. Sci. Res.* 2013. №9. P.233—239.
3. *Касимов, А.Г.* Сорбционная очистка растворов медно-никелевого производства с использованием ионитов «Pirolite» / А.Г. Касимов, Н.С. Арешина, И.Э. Мальц, Т.Р. Зинкович, М.А. Михайленко // *Краткие сообщения. Сорбционные и хроматографические процессы.* 2011. Т.11. №5. С.689—692.
4. *Pyrzynska, K.* Comparative study of heavy metal ions sorption onto activated carbon, carbon nanotubes, and carbon-encapsulated magnetic nanoparticles / K. Pyrzynska, M. Bystrejewski // *Colloids. Surt. A. Physicochem. Eng. Asp.* 2010. Is.362. P.102—109.
5. *Moreira, R.F.P.M.* Removal of iron from water using adsorbent carbon / R.F.P.M. Moreira, V.S. Madeira, H.J. Sose, E. Humeres // *Separat. Sci. Technol.* 2004. V.39. № 2. P.271—285.
6. *Mohammed, A.Z.* Removal of iron and manganese from groundwater sources using nano-biosorbents / A.Z.

- Mohammed, D. Allahyar, A.S. Behrauz // *Chem. Biol. Technol. Agriculture.* 2022. V.9. №3. P.1—14.
7. *Ostroski, L.C.* The removal of Fe(III) ions by adsorption onto zeolite columns / L.C. Ostroski, M.A. de Barros, S.D. da Silva, J.H. Dantas, P.A. Arroyo // *Ads. Sci. Technol.* 2007. V.25. P.757—768.
8. *Vasudevan, S.* Removal of iron from drinking water by electrocoagulation : adsorption and kinetics studies / S. Vasudevan, I. Sayaraj, J. Lakshmi, G. Sozhan // *Korean J. Chem. Eng.* 2009. V.26. P.1058—1064. DOI : 10.1007/S11814-009-0176-9.
9. *Das, B.* Removal of iron from groundwater by ash / B. Das, P. Hazarika, G. Saikia, H. Kalita, D.C. Goswani, H.B. Das, R.K. Datta // *J. Hazard. Mater.* 2007. V.141. P.834—841.
10. *Salimi, A.H.* Total iron removal from aqueous solution by using modified clinoptilolite / A.H. Salimi, A. Shamshiri, E. Laberi, H. Bonakdari, A. Akhbari [et al.] // *Ain. Shams Eng. J.* 2022. V.13. Art.101495.
11. *Pandova, I.* A study of using natural sorbent to reduce iron cations from aqueous solutions / I. Pandova, M. Rimar, A. Panda, S. Vilicek, M. Kusnerova, M. Harnicarova // *Intern. J. Environmental Res. Publik Health.* 2020. May. V.17(10). P.3686.
12. *Robinson-Lora, M.A.* Efficient metal removal and neutralization of acid mine drainage by crab-shell chitin under batch and continuous-flow conditions / M.A. Robinson-Lora, R.A. Brennan // *Bioresour Technol.* 2009. V.100. P.5063—5071.
13. *Cama, J.* Disolution kinetics of synthetic zeolite NaP₁ and Hs implication to zeolite treatment of contaminated waters / J. Cama, C. Ayora, X. Querol, J. Gemor // *Env. Sci. Technol.* 2005. P.4871—4878.
14. *Milonjic, S.* Sorption of ferric and ferrous ions on silica / S. Milonjic, S.D. Cupic, L. Gerovic // *Mater. Sci. Forum.* 2006. V.518. P.67—72.
15. *Nguyen, V.N.* Copper recovery from low concentration waste solution using DOWEX G-26 resin / Nguyen V.N., Lee Ch., Sha M.K., Yoo K., Seong S. // *Hydrometallurgy.* 2009. P.97237—97242.
16. *Chen, W.* Recycle of vanadium from aluminium slag of ferrovandium / Chen W., Liu T., Leb Ch. // *IOP. Conf. Ser. : Mater. Sci. Eng.* 2020. V.720. Art.012001.
17. *Chen, W.* Purification of lithium carbonate from sulphate solutions through hydrogenation using the DOWEX G-26 resin / Chen W., Lee C., Ho H. // *Appl. Sci.* 2018. V.8. P.2252.
18. *Бахвалов, А.В.* Методика ускоренного определения содержания железа в воде / А.В. Бахвалов // *Проблемы современной науки и образования.* 2015. № 11(41). С.65—69.
19. *Khezami, L.* Removal of chromium(VI) from aqueous solution by activated carbons : kinetic and equilibrium studies / L. Khezami, R. Capart // *J. Hazard Mater.* 2005. V.31. Is.123(1—3). P.223—231
20. *Reed, B.E.* Modeling Cd adsorption in single and binary adsorbent (PAC) systems / B.E. Reed, M.R. Matsumoto // *J. Environmen. Eng.* 1993. V.119. №2. P.332—348.
21. Адсорбция на однородной твердой поверхности. Уравнение Ленгмюра : методические указания к выполнению расчетной лабораторной работы по дисциплинам «Поверхностные явления и дисперсные системы» и «Коллоидная химия» для студентов ИПР / сост. Е.В. Михеева. — Томск : Изд-во Томск. политех. ун-та. 2011. 36 с.