

УДК 661.183

## ИССЛЕДОВАНИЕ АДСОРБЦИИ ФОСФАТ-ИОНОВ ИЗ АЛЮМИНАТНЫХ РАСТВОРОВ НАНОКОМПОЗИТОМ Fe-AУ

©2023 г. А.А. Гейдаров, П.Г. Бабаева, А.А. Гулиева, Г.И. Алышанлы, З.А. Джаббарова

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

*Поступила в редакцию 20 декабря 2022 г.*

*После доработки 28 февраля 2023 г. принята к публикации 23 марта 2023 г.*

Изучена адсорбция фосфат-ионов из модельных растворов нанокompозитом на основе трехвалентного оксида-гидроксида железа и активированного угля (Fe-AУ). Исследованы факторы, влияющие на адсорбцию фосфат-ионов: pH раствора; количество адсорбента; начальная концентрация фосфат-ионов в растворе; длительность контакта. Эффективность извлечения фосфат-ионов возрастала с увеличением дозировки адсорбента (от 2,5 до 10 г/л) при исходной концентрации фосфат-ионов 0,1 г/л. Адсорбция хорошо описана изотермами Ленгмюра и Френдлиха. Результаты работы показали, что нанокompозит Fe-AУ обладает хорошим потенциалом адсорбции фосфат-ионов из алюминатных растворов, что подтверждено анализом СЭМ/ЭДС.

*Ключевые слова: адсорбция; фосфат-ионы; нанокompозит на основе оксида-гидроксида железа и активированного угля.*

Важная задача современного глиноземного производства — увеличение комплексного использования глиноземного сырья для расширения ассортимента выпускаемой продукции путем извлечения элементов-примесей (V, P, F и др.) [1].

Содержание пентоксида фосфора в сырье (бокситы, нефелины, алуниты) и промежуточных продуктах производства глинозема находится в пределах от одной десятой доли до одного процента. Так, в стандартном образце алунита пентоксид фосфора содержится в пределах 0,17—0,2%.

По принципиальной схеме комплексной переработки алунита щелочным способом в раствор переходят: алюминий в виде алюмината, калий и натрий в виде сульфатов, а также соединения кремния, галлия, ванадия и фосфора. Ввиду относительной близости химических свойств водных растворов пятивалентных ванадия и фосфора ванадий частично соосаждается с фосфором и выводится из ванадийсодержащего раствора в составе образовавшегося осадка фосфата, что приводит к значительным потерям ванадия. При наличии в оборотных растворах малых количеств примеси фосфора отмечается укрупнение гидрата алюминия, а большие ко-

личества примеси фосфора способствуют его измельчению [2].

При циркуляции алюминатных растворов и выпарке раствора, идущего на выщелачивание последующей порции алунитовой руды, концентрации ванадия и фосфата в растворе возрастают.

По достижении определенной концентрации ванадий совместно с фосфором выпадает в осадок в виде ванадиевого концентрата. Содержание массовых долей в твердой фазе ванадиевого концентрата составляет:  $V_2O_5$  4,9;  $P_2O_5$  12,2; F 2,1 [3]. Концентрацию примесей в промводе фосфорсодержащего осадка следующая, г/л:  $P_2O_5$  0,1;  $V_2O_5$  8,0.

Известно несколько методов извлечения малых содержаний фосфат-ионов из сложно-солевых технологических растворов. Из них наиболее приемлем сорбционный способ [1, 4]. В работе [4] рассмотрено использование активированного угля в качестве адсорбента при удалении фосфат-ионов из синтетических растворов дистиллированной водой. При этом отмечено, что эффективность удаления фосфат-ионов повышается с увеличением дозировки адсорбента от 0,1 до 4 г/л при исходной концентрации фосфат-ионов 5 мг/л. Максимальное удаление фосфат-ионов

достигнуто при рН2, а эффективность адсорбции с увеличением рН в диапазоне от 2 до 10 снижается. По данным [5] при использовании активированного угля Coir-pith в качестве адсорбента для удаления фосфат-ионов адсорбция достигла своего максимума при начальном значении рН в диапазоне от 6 до 10. Высокая стоимость активированного угля в качестве сорбента ограничивает его широкое применение. Авторы многих работ как альтернативный сорбент использовали биоуголь. Широко исследовано удаление фосфат-ионов из сточных вод. Большое внимание уделяется промышленным отходам в качестве адсорбента для извлечения фосфат-ионов. Le Zeng и его коллеги [6] при исследовании сорбции фосфат-иона из сточных вод как адсорбент использовали отходы производства оксида железа. Показано, что благодаря своей низкой стоимости и высокой производительности эти отходы потенциально могут быть использованы для экономичного удаления фосфат-ионов из сточных вод. Отмечается тенденция к снижению адсорбции фосфат-ионов от 8,6 до 4,6 мг/г при увеличении рН от 3,2 до 9,5.

В работе [7] исследовано удаление фосфат-ионов из водного раствора с использованием красного шлама как побочного продукта в производстве при переработке алюминиевого сырья. Установлено, что максимальное удаление фосфат-ионов достигается в диапазоне рН 6—10. В работе [8] показано, что применение красного шлама (отходы глиноземного производства), обработанного смесью хлорида натрия и соляной кислоты, оказывает существенное влияние на сорбционную способность шлама по отношению к фосфат-анионам. Предельная сорбция фосфат-ионов на модифицированном красном шламе достигает 390 мг/г, что позволяет предложить его в качестве эффективного сорбента для очистки промышленных стоков от фосфат-ионов.

Теме сорбции фосфат-ионов адсорбентами, синтезированными на основе гидроксидов разных металлов, посвящено много публикаций [9—12]. В настоящее время для воды и очистки сточных вод применение нашли нанотехнологии и к наиболее важным структурам в нанотехнологии относятся наночастицы. Их основным свойством является повышенная реакционная способность благодаря высокому значению отноше-

ния их поверхности к объему. В частности для наночастиц железа характерны суперпарамагнитные свойства, высокая реакционная способность и нетоксичность [13]. Активированный уголь, модифицированный наночастицами трехвалентного железа, дает хорошие результаты при адсорбции неорганических ионов, таких как нитраты, арсенаты и ванадаты [14—17]. Результаты этих исследований послужили основой для тестирования этой методологии на растворах переработки алунита для адсорбции фосфат-ионов в нашей работе.

Цель настоящего исследования — оценка потенциала нанокompозита на основе трехвалентного оксида-гидроксида железа и активированного угля (Fe-AУ) для удаления фосфат-ионов из алюминатного раствора.

**Материалы и методы эксперимента.** Свойства исходного сырья и продуктов переработки исследовали следующими методами: идентификацию фаз — методом рентгенофазового анализа (РФА) с помощью дифрактометра AXS (Bruker, Германия); содержание фосфат-ионов в растворе — фотоколориметрическим методом (фотоколориметр КФК-2) по молибденодиванадиевому способу [13]; морфологию образцов (до и после адсорбции) — методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, ЭДС, Hitachi-4800, Германия).

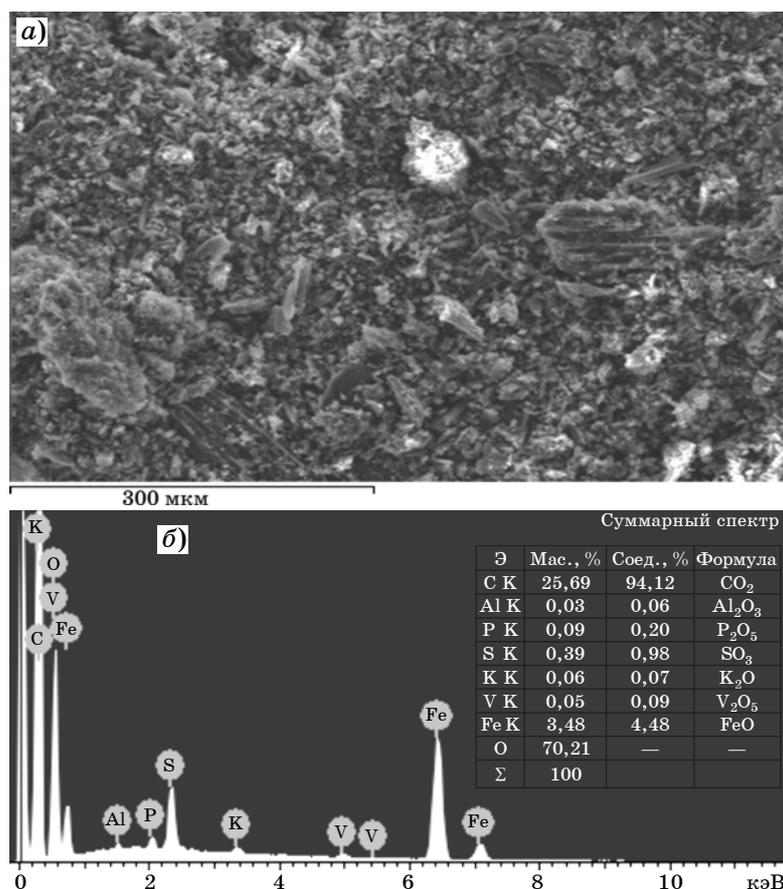
Степень удаления (сорбции)  $\varepsilon$ , %, фосфат-ионов из алюминатного раствора рассчитывали с использованием уравнения:

$$\varepsilon = 100(C_0 - C_p)/C_0, \quad (1)$$

где  $C_0$ ,  $C_p$  — концентрации фосфат-ионов в растворе соответственно до и после эксперимента.

Для получения нанокompозита Fe-AУ использовали уголь производства LOBA Chame PVT Ltd. и реагенты фирмы «Вектон»:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HCl}$  и  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

Синтез сорбента проводили по методике [13]. Для этого к 10 г активированного угля добавляли 200 мл 0,6 М  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ . Модификация проводилась в течение 24 ч при постоянном перемешивании и поддержании температуры 50 °С. Затем раствор был отфильтрован, а модифицированный образец промыт дистиллированной водой и высушен при температуре 60 °С в течение 24 ч. Схема



Фиг. 1. Результаты анализа СЭМ/ЭДС (соответственно а, б) после адсорбции фосфат-ионов наноккомпозитом Fe-AУ из алюминатного раствора

реакции синтеза следующая:  $\text{FeSO}_4 + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 = \text{FeOHSO}_4 + \text{FeOОН}$ .

**Методика определения адсорбционной емкости. Проведение кинетического исследования.** Сорбцию изучали при температуре 25 °С. Навески адсорбента 0,5—1 г помещали в коническую колбу, добавляли заданное количество  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ , общий объем суспензии до 50 мл доводили дистиллированной водой. Для установления заданного значения рН раствора добавляли азотную кислоту (0,5 М). Равновесие в системе достигалось после перемешивания полученной суспензии в течение 1 ч. Для описания процесса сорбции использовали формулу:

$$q_e = (C_0 - C_p)V/m, \quad (2)$$

где  $q_e$  — адсорбционная емкость, мг/г;  $C_0$  — начальная концентрация ионов  $\text{PO}_4^{3-}$ , мг/л;  $C_p$  — концентрация ионов  $\text{PO}_4^{3-}$  после установления равновесия, мг/л;  $V$  — суммарный объем раствора, л;  $m$  — масса адсорбента, г.

В качестве объекта исследования взяты растворы гидрофосфата натрия разной кон-

центрации, а полученные результаты проверены на технологических растворах, содержащих анионы  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{AsO}_4^{3-}$ ,  $\text{SiO}_4^{2-}$ .

Сорбцию фосфат-ионов из алюминатных растворов проводили в установленных оптимальных условиях. Анализы СЭМ/ЭДС подтвердили, что фосфор(V) полностью адсорбируется на синтезированном наноккомпозите Fe-AУ (фиг. 1), наноккомпозит Fe-AУ кроме фосфора содержит также большое количество калия, ванадия, серы, углерода, железа и алюминия.

**Результаты исследований и их обсуждение. Зависимость адсорбции фосфат-ионов от рН среды.** Известно, что рН раствора — один из основных факторов, влияющих на адсорбцию фосфат-иона. В зависимости от рН системы фосфор в растворах присутствует в следующем виде:  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$  и  $\text{PO}_4^{3-}$  [5].

При рН2 фосфор находится преимущественно в виде  $\text{H}_3\text{PO}_4$ . Нейтральные молекулы слабо прикрепляются к участкам адсорбента. Как видно из фиг. 2, адсорбция фосфат-иона происходит именно в интерва-

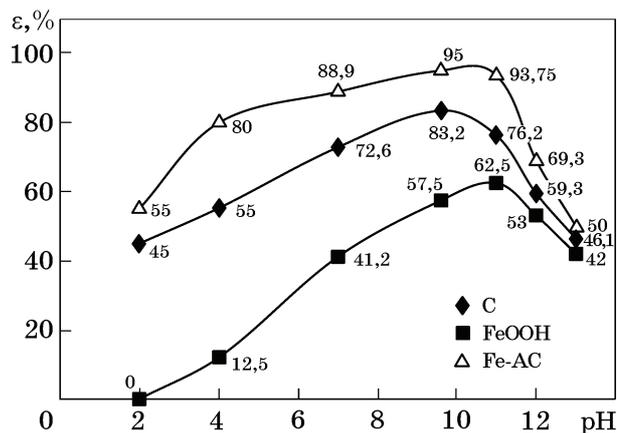
ле рН4—10 и составляет 80—95%. В этой области анионная форма фосфора следующая:  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$  и  $\text{PO}_4^{3-}$ . С повышением рН до 11—13 сорбционная способность ионов уменьшается, что может быть связано с преобладанием ионов  $\text{OH}^-$ , которые конкурируют с фосфат-ионами. Из-за сил отталкивания между ионами фосфора и положительно заряженной поверхностью адсорбента при рН2 адсорбция фосфат-ионов слабая. На фиг. 2 приведены полученные с использованием формулы (1) сравнительные данные по адсорбции фосфат-ионов активированным углем (С), синтезированным гётитом ( $\text{FeOH}$ ) и наноккомпозитом ( $\text{Fe-AU}$ ) соответственно.

**Влияние дозировки адсорбента Fe-AU на адсорбцию фосфат-ионов.** На фиг. 3 приведены данные о влиянии дозы адсорбента на удаление фосфат-ионов при исходной их концентрации 4,98 мг/л и количестве адсорбента от 0,2 до 1,2 г (от 2 до 24 г/л). Видно, что степень удаления фосфат-ионов увеличивается только до определенного предела, а затем остается почти постоянной. Это означает, что увеличение частиц адсорбента обеспечивает достаточное количество мест для адсорбции фосфат-ионов.

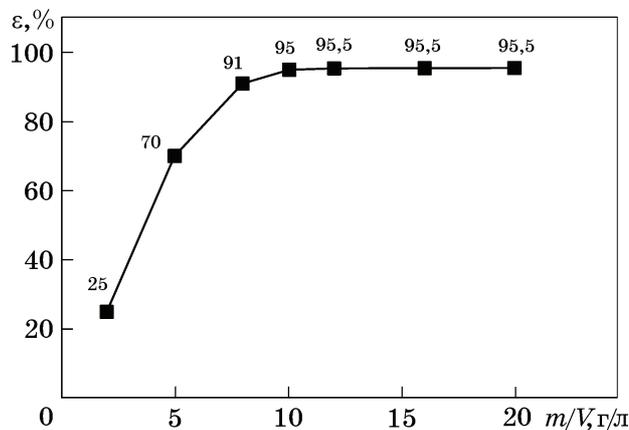
Немаловажным фактором, влияющим на сорбцию фосфат-ионов на адсорбенте Fe-AU, является длительность контакта (фиг. 4).

Из приведенных на фиг. 4 данных следует, что при рН8—9 адсорбция возрастает в первые 60 мин контакта. При этом высокая скорость сорбции сохраняется в течение 2 ч, затем сорбция ослабевает и через 180 мин достигается равновесие. Это связано с тем, что активные центры адсорбента в течение этого времени насыщаются ионами фосфата и в дальнейшем скорость адсорбции остается неизменной. Последующее увеличение длительности контакта на эффективность сорбции не влияет. Видно, что количество адсорбированных фосфат-ионов на единицу массы адсорбента (адсорбционная емкость  $q_e$ ) возрастает с увеличением исходной концентрации ионов  $C_0$  и остается постоянной при достижении равновесия.

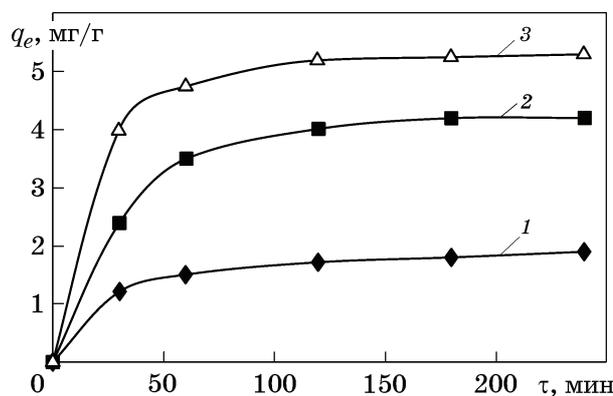
Известно, что сорбция ионов в значительной степени зависит от начальной концентрации компонентов в растворе. С этой целью проведены кинетические исследования процесса сорбции фосфат-ионов от изменения их концентрации в растворе. Концентрацию фосфат-ионов варьировали в пределах



Фиг. 2. Зависимость влияния рН среды на адсорбцию фосфат-ионов ( $\varepsilon$ , %) активированным углем (С), гётитом ( $\text{FeOH}$ ) и наноккомпозитом Fe-AU при условии  $C(\text{PO}_4^{3-}) = 0,1$  г/л,  $m = 1$  г,  $t = 25$  °С,  $\tau = 60$  мин



Фиг. 3. Зависимость сорбции фосфат-ионов наноккомпозитом Fe-AU от его количества в суспензии ( $t = 25$  °С,  $\tau = 3$  ч,  $C_0 = 0,1$  г/л, рН8—9)



Фиг. 4. Влияние длительности перемешивания и исходной концентрации фосфат-ионов ( $C_0$ , мг/л: 1 — 10; 2 — 40; 3 — 100) на емкость адсорбента  $q_e$  ( $m = 0,5$  г,  $t = 25$  °С, рН8—9)

Значения степени сорбции фосфат-ионов в зависимости от их концентрации в водных растворах ( $m = 0,5$  г;  $V = 50$  мл, pH=9,  $\tau = 60$  мин)

Параметр	Изменение параметров в зависимости от исходной концентрации фосфат-ионов $C_0$ , мг/л					
	10	20	40	60	80	100
$C_e$ , мг/л	0,8	3,0	11,2	19,2	30,4	46,0
$\lg C_e$	-0,093	0,477	1,049	1,283	1,482	1,662
$q_e$ , мг/г	0,92	1,7	2,88	4,08	4,96	5,4
$\lg q_e$	-0,036	0,230	0,447	0,610	0,695	0,732
$C_e/q_e$ , г/л	0,869	1,764	3,88	4,706	6,129	8,5185
$\varepsilon$ , %	92	85	72	68	62	54

10—100 мг/л, сохраняя при этом все параметры постоянными. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Из данных табл. 1 следует, что степень сорбции фосфат-ионов уменьшается с увеличением их начальной концентрации в растворах. При относительно низких концентрациях фосфат-ионов в растворе степень их сорбции достигает высоких значений (92%) вследствие взаимодействия находящихся в растворе ионов фосфора, которые поглощаются активными центрами сорбента. Уменьшение степени сорбции можно объяснить заполнением сорбционных центров.

*Построение изотерм адсорбции.* Адсорбционную способность фосфат-ионов рассчитывали по уравнениям Ленгмюра и Френдлиха. Изотерма адсорбции играет важную роль при расчете количества освобождаемых из раствора фосфат-ионов на единицу массы адсорбента.

Линейное уравнение изотермы адсорбции Ленгмюра имеет следующий вид:

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

где  $C_e$  — равновесная концентрация адсорбента (ион  $\text{PO}_4^{3-}$ ) в растворе, мг/л;  $q_e$  — равновесное адсорбированное количество на единицу адсорбента (адсорбционная емкость), мг/г;  $q_{\max}$  — максимальная (предельная) адсорбционная емкость, мг/г;  $K_L$  — адсорбционный коэффициент (постоянная Ленгмюра), л/мг.

Константы ( $q_{\max}$  и  $K_L$ ) уравнения Ленгмюра (3) рассчитывают графическим способом. Для этого строят изотерму адсорбции в

линейных координатах, тангенс угла ее наклона равен:

$$\operatorname{tg} \alpha = 1/q_{\max},$$

где  $\alpha$  — отрезок, отсекаемый прямой на оси ординат, дает возможность определить  $K_L$ .

Линейное уравнение модели Френдлиха выражается следующим образом:

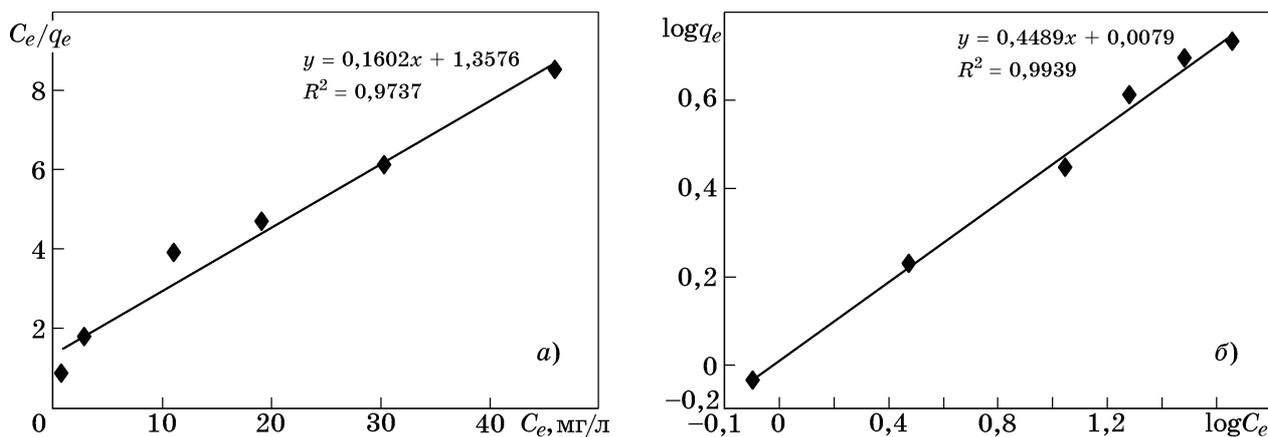
$$\lg q_e = \lg K_F + \frac{1}{n} \lg C_e, \quad (4)$$

где  $K_F$  — константа Френдлиха (показывает величину адсорбции при концентрации адсорбента 1 мг/г);  $n$  — интенсивность адсорбции. В логарифмических координатах уравнение (2) дает прямую линию, что позволяет определять значения  $K_F$  и  $n$ . Отрезок, отсекаемый прямой на оси ординат, соответствует  $\lg K_F$ , а тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс равен  $1/n$ .

Расчет сорбционных характеристик для фосфат-ионов проводили по данным табл. 1 и по уравнениям Ленгмюра (3) и Френдлиха (4). Модель Ленгмюра предполагает монослоевую адсорбцию, а модель Френдлиха — эмпирическую [18].

Полученные равновесные данные адсорбции были приведены к линейно преобразованным уравнениям (3) и (4) Ленгмюра и Френдлиха соответственно (фиг. 5, а, б).

Как следует из приведенных графиков, результаты, полученные на основе моделей Ленгмюра и Френдлиха для всех исследованных ионов металлов, соответствуют экспериментальным данным. Параметры изотерм Ленгмюра (см. фиг. 5, а) и Френдлиха (см. фиг. 5, б) обобщены в табл. 2.



Фиг. 5. Линейные изотермы Ленгмюра (а) и Френдлиха (б) для адсорбции фосфат-ионов

Таблица 2

**Сорбционные характеристики поглощения фосфат-ионов наноккомпозитом Fe-AУ по уравнениям Ленгмюра и Френдлиха**

Уравнение Ленгмюра (3)			Уравнение Френдлиха (4)		
$q_{\max}$ , мг/г	$K_L$ , л/мг	$R^2$	$K_F$	$n$	$R^2$
4,0867	0,1541	0,9737	1,3	1,191	0,993

Модели изотермической адсорбции показали, что уравнения Ленгмюра и Френдлиха подходят для описания адсорбционных характеристик. Согласно полученным результатам наноккомпозит Fe-AУ обладает хорошим адсорбционным потенциалом для фосфат-ионов и может быть использован в качестве адсорбента для их удаления из фосфатсодержащих сточных вод глиноземного производства.

По данным работы [19] фосфат-ионы могут образовывать хемосорбированные комплексы ( $-\text{Fe}-\text{O}-\text{P}(\text{OH})_2$ ,  $-\text{Fe}-\text{O}-\text{P}(\text{OH})_2^-$ ,  $-\text{Fe}-\text{O}-\text{P}(\text{O})_2^-$ ) в результате реакции лигандного обмена с гидроксидом и мостик между соединением  $\text{Fe}^{+3}$ .

**Выводы.** 1. Наноккомпозит на основе трехвалентного оксида-гидроксида железа и активированного угля (Fe-AУ) является перспективным адсорбентом для удаления фосфат-ионов при низкой их концентрации в исходном растворе. На адсорбцию фосфат-ионов влияют такие параметры, как pH, количество адсорбента, длительность контакта, концентрация фосфат-ионов.

2. Скорость адсорбции возрастает с увеличением количества адсорбента в пределах от 2,5 до 10 г/л. Максимальное удаление фос-

фат-ионов получено при pH8—9. Результаты, достигнутые на основе моделей Ленгмюра и Френдлиха для фосфат-ионов, соответствуют экспериментальным данным с коэффициентами корреляции более 0,97—0,99.

3. Адсорбция фосфат-ионов наноккомпозитом Fe-AУ подтверждена анализом СЭМ/ЭДС. Установлено, что адсорбция фосфат-ионов протекает только на поверхности адсорбента и следовательно скорость адсорбции высокая. Изотермы Ленгмюра и Френдлиха показывают, что при адсорбции фосфат-ионов наноккомпозитом Fe-AУ одновременно реализуются механизмы хемосорбции и физической адсорбции (сочетание химического взаимодействия адсорбата и адсорбента и слабых сил Ван-дер-Ваальса).

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Демьяненко, А.И. Очистка алюминатных растворов от соединений фосфора, ванадия и фтора / А.И. Демьяненко, О.С.Балак, В.Н. Балак // Цв. металлы. 1967. №1. С.61—63.
2. Романов, Л.Г. Очистка алюминатных растворов от примесей фосфора и ванадия / Л.Г. Романов, Б.Ш. Джумбаев, Л.П. Ни // Тр. ИМО АН Каз. ССР. 1970. Т.XXXVII. С.26—31.
3. Onakonak, A.K. Phosphates removal by activated carbon / A.K. Onakonak, L. Youcef // Sensor Letters. 2016. V.14. №6. P.600—605.
4. Kumar, P. Phosphate removal from aqueous solution using coir-pith activated carbon / P. Kumar, S. Sudha, S. Chanq, V.C. Srivastav // Separation Sci. Technol. 2010. V.45. P.1463—1470.
5. Le, Z. Adsorptive removal of phosphate from aqueous solutions using iron oxide tailings / Z. Le, L. Xiaomei, L. Jindun // Water Research. 2004. V.38. P.1318—1326.
6. Shivkumar, S.P. Removal of phosphate using red mud: an environmentally hazardous waste by-product of alumina industry / S.P. Shivkumar, P.A.M. Najar, Y.M. Tangde // Advances in Physical Chemistry. — Hindawi Publ. Corp. 2016. V.16. Art.9075206.

7. Орлов, С.Н. Адсорбция фосфат-ионов из водных растворов на красном шламе / С.Н. Орлов, К.А. Бурков, М.Ю. Скрипкин // *Вода : Химия и экология*. 2013. №12. С.104—107.
8. Kim, J. Phosphate adsorption on the iron oxyhydroxides goethite ( $\alpha$ -FeOOH), akaganeite ( $\beta$ -FeOOH), lepidocrocite ( $\gamma$ -FeOOH) / J. Kim, W. Li, B.L. Philips, C.P. Grey // *Energy and Environmental Science*. 2011. V.4. №10. P.4298—4305.
9. Namasivayam, C. Recycling Fe(III)/Cr(III) hydroxide, an industrial solid waste for the removal of phosphate from water / C. Namasivayam, K. Prathap // *J. Hazard. Mater.* 2005. V.123. P.127—134.
10. Tanada, S. Removal of phosphate by aluminium oxide hydroxide / S. Tanada, M. Kabayama, N. Kawasaki, T. Sakiyama, T. Nakamura, M. Azaki, T. Tamura // *J. Colloid Interf. Sci.* 2003. V.257. P.135—140.
11. Wang, K. Mutual efforts of cadmium and phosphate on their adsorption and desorption by goethite / K. Wang, B. Xing // *Environ. Pollut.* 2004. V.127. P.13—20.
12. Qiaoling, X. Phosphorus removal from aqueous solution by adsorption using Wetland-based biochar: Bath experiment / X. Qiaoling, W. Li, T. Minxia, W. Xiaolei, L. Sijie, C. Hejun // *Green Processing and Synthesis*. 2022. №11. P.555—562.
13. Sharififard, H. Performance comparison of activated carbon and ferric oxide-hydroxide-activated carbon nanocomposite as vanadium (V) ion adsorbents / H. Sharififard, M. Soleimani // *Royal Soc. Chem.* 2015. V.5(98). P.80650—80660.
14. Zhu, H. Removal of arsenic from water by supported nano zero-valent iron on activated carbon / H. Zhu, Y. Jia, X. Wu, H.J. Wang // *Hazard. Mater.* 2009. V.172. №2—3. P.1591—1596.
15. Mehrabi, N. Parametr optimization for nitrate removal from water using activated carbon and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles / N. Mehrabi, M. Soleimani, M. Yeganeh, H. Sharififard // *RSC Advanc.* 2015. V.5. P.51470—51482.
16. Османова, А.Х. Исследование адсорбции ванадия (V) из алюминатных растворов наноккомпозитом Fe-АУ / А.Х. Османова, А.А. Гейдаров, З.А. Джаббарова, Г.И. Алышанлы // *Металлы*. 2022. №2. С.28—33. — (А.Х. Османова, А.А. Геидаров, З.А. Дзхбарова, Г.И. Алышанлы. «Vanadium (V) adsorption from aluminate solutions by an Fe-AC nanocomposite». *Russian Metallurgy (Metally)*. 2022. №3. P.211—216.)
17. Пат. RU2045477. МПК : С1. Способ переработки ванадиевого концентрата глиноземного производства / Равдоникас И.В., Насыров Г.З., Кравцова Е.Г. ; заявитель : АОТ «Всероссийский алюминиево-магниевый институт» ; заявл. 06.08.1992 ; опубл. 10.10.1995.
18. Boddu, V.M. Removal of hexavalent chromium from wastewater using a new composite chitosan biosorbent / V.M. Boddu, K. Abburi, I.L. Talbott, E.D. Smith // *Environment Sci. Technol.* 2003. V.37. P.4449—4456.
19. Chitrakar, R. Phosphate adsorption on synthetic goethite and akaganeite / R. Chitrakar, S. Tezuka, A. Sonada // *J. Colloid and Interface Sci.* 2006. V.298. P.602—608.