

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ
И ПОВЕРХНОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

УДК 66.081:546.30;562.74:661.365.5:546.821

СОРБЦИОННО-ДЕСОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ФОСФАТА ТИТАНА
К КАТИОНАМ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

© 2025 г. М. В. Маслова^{а, *}, П. Е. Евстропова^а, Н. В. Мудрук^{а, **}, Ю. П. Семушина^а

^аИнститут химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ИХТРЭМС КНЦ РАН), Апатиты, Мурманская обл., Россия

* e-mail: m.maslova@ksc.ru

** e-mail: n.mudruk@ksc.ru

Поступила в редакцию 27.04.2024 г.

После доработки 03.06.2024 г.

Принята к публикации 07.06.2024 г.

Исследовано сорбционно/десорбционное поведение двухвалентных ионов (Cu^{2+} , Mn^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+}) на аморфном фосфате титана. Показано, что сорбционно/десорбционное равновесие во многом определяется сольватированным состоянием катионов тяжелых металлов, построены ряды селективности. Независимо от степени насыщения сорбента катионами исследуемых металлов степень десорбции во всех случаях превышает 99.9%. Установлено, что при многоциклическом применении сорбента происходит снижение эффективности процессов сорбции/десорбции в результате его дегидратации вследствие гидролиза сорбента, которая составляет $2.6 \times 10^{-3} \text{ мг г}^{-1} \text{ ч}^{-1}$. Показана эффективность сорбции/десорбции исследованных ионов из мультикомпонентных растворов.

Ключевые слова: сорбенты, фосфат титана, сорбция, десорбция, катионы тяжелых металлов, равновесия

DOI: 10.31857/S0044453725050098, **EDN:** HFBDQI

Тяжелые металлы относятся к приоритетным загрязняющим веществам. Основными загрязнителями водных систем тяжелыми металлами являются предприятия горнодобывающей промышленности, черной и цветной металлургии, химические, текстильные и лакокрасочные производства. Немаловажную роль в категорировании тяжелых металлов играют следующие условия: их высокая токсичность для живых организмов в относительно низких концентрациях, а также способность к биоаккумуляции [1, 2]. Токсичность многих цветных металлов определяет их строгие стандарты ПДК на сброс в окружающую среду. Для удаления этих веществ из сточных вод в настоящее время наиболее распространен реagentный методы очистки, сущность которого заключается в переводе растворимых в воде веществ в нерастворимые при добавлении различных reagentов с последующим отделением их в виде осадков. Данный способ является простым по технологическому решению, но он чувствителен к концентрациям металлов в растворе, температуре, наличию примесей, препятствующих осаждению токсикантов и создает вторичные загрязнения в виде объемных осадков, требующих

утилизации. Более того, токсичные металлы имеют очень низкие концентрации ПДК и добиться требуемых показателей очистки reagentными методами достаточно сложно [3, 4].

В последнее время для очистки природных и сточных вод все более широкое применение находят сорбционные методы. Сорбционный метод является хорошо управляемым процессом. Он позволяет эффективно удалять из растворов микроконцентрации тяжелых металлов, не образуя вторичных загрязнений в виде осадков. Возможность регенерации значительно продлевает срок службы сорбента и снижает экономические затраты на очистку. Среди разнообразия сорбционных материалов можно выделить три основные группы: природные минеральные сорбенты, биосорбенты и синтетические сорбенты. Первые две группы материалов, несмотря на доступность и низкую стоимость обладают невысокой сорбционной емкостью и как правило, не регенерируются. Это создает определенные трудности при их последующей утилизации, а низкая сорбционная емкость ведет к росту объема отработанного материала и не-

возможности возврата сорбированных металлов в производственный цикл.

С этой точки зрения, синтетические сорбенты, которые создаются под решение конкретных экологических задач, более привлекательны. Такие материалы, как правило, имеют высокую сорбционную емкость, хорошую селективность, и долгий срок службы. При этом их коммерческая стоимость намного выше природных материалов. Поэтому возможность регенерации сорбентов для их многократного использования играет немаловажную роль в экономике предприятия.

Несмотря на интенсивные исследования в области сорбции тяжелых металлов на различных сорбентах, вопросам изучения десорбции уделяется значительно меньше внимания. Оценка адсорбционно/десорбционной способности материала является важным фактором при создании технологий очистки сточных вод различных производств.

В данной работе рассмотрена возможность десорбции тяжелых металлов с сорбента на основе фосфата титана (TiOP). Известно, что TiOP имеет высокую сорбционную емкость по отношению к ионам тяжелых металлов, но работы по изучению механизма его десорбции отсутствуют [5, 6]. Изучение процессов равновесия при десорбции необходимо для понимания механизма процесса и оптимизации использования сорбента.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для получения сорбента использовали титановую соль $(\text{NH}_4)_2\text{TiO}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, которую в количестве 50 г порционно загружали в нагретую до 60°C 30% фосфорную кислоту при мольном отношении $\text{TiO}_2:\text{P}_2\text{O}_5 = 1:1.5$. Суспензию выдерживали при перемешивании в течение 4 ч, а затем фильтровали. Для удаления катиона аммония, входящего в состав фосфата титана в виде аммонийзамещенных фосфатных групп осадок промывали раствором 0.1 н HCl, затем водой и сушили при 60°C . При изучении сорбционных свойств сорбент переводили в Na-форму обработкой 0.1 М раствором карбоната натрия в течение 24 ч при весовом отношении Т:Ж = 1:50. После фильтрации осадок промывали водой до значений pH 6. Согласно данным химического анализа содержание оксидов титана и фосфора в конечном продукте составляет 41.2 и 36.6% соответственно, что хорошо согласуется с теоретическими значениями для химической формулы $\text{TiO}(\text{OH})\text{N}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Детальное исследование сорбента данного состава проведено нами ранее [7].

Концентрацию тяжелых металлов в фильтрате после сорбционных/десорбционных экспериментов определяли методом атомно-адсорбционной

спектрометрии на спектрометре AAS300 Perkin-Elmer.

Экспериментальное изучение процесса сорбции/десорбции катионов марганца, меди, кобальта и никеля проводили в статических условиях с концентрациями от 1 до 15 ммоль л^{-1} при температуре 25°C . Для проведения сорбционных экспериментов 1 г сорбента помещали в 200 мл раствора заданной концентрации катиона металла и выдерживали при термостатировании до состояния равновесия при постоянном перемешивании. Количество сорбированного иона металла определяли по разности концентраций ионов металлов в растворе до и после сорбции. Величину сорбционной емкости q_e (ммоль г^{-1}) рассчитывали по формуле:

$$q_e = \frac{C_0 - C_e}{m} V, \quad (1)$$

где C_0 и C_e – исходная и равновесная концентрации металла в растворе, ммоль л^{-1} ; V – объем раствора, л; m – навеска сорбента, г.

Десорбцию тяжелых металлов с фосфата титана изучали при разной степени насыщенности сорбента. Для этого 0.5 г насыщенного сорбента обрабатывали 50 мл 0.1 н HCl в течение 2 ч в статических условиях.

Для получения количественных характеристик процесса сорбции/десорбции экспериментальные данные обрабатывали с помощью линеаризованных уравнений изотермы Ленгмюра, Фрейндлиха и Темкина [8, 9]:

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{A_{\max}} + \frac{1}{KA_{\max}} \frac{1}{C_p}, \quad (2)$$

$$\lg A = \lg K_F + \frac{1}{n} \lg C_p, \quad (3)$$

$$q_e = A \ln C_p + B, \quad (4)$$

где C_p – равновесная концентрация ммоль л^{-1} ; q_e – количество сорбированного вещества, ммоль г^{-1} ; A_{\max} – величина предельной адсорбции, ммоль г^{-1} ; K – константа сорбционного равновесия или константа Ленгмюра, характеризующая интенсивность процесса сорбции, л ммоль $^{-1}$; K_F – константа Фрейндлиха, характеризующие относительную способность адсорбента взаимодействовать с адсорбатом, мг г^{-1} ; n – коэффициент в уравнении Фрейндлиха, показывающий интенсивность сорбционного процесса и распределение активных центров; A – константа, характеризующая линейное распределение адсорбционных центров по энергии, л ммоль $^{-1}$; B – константа адсорбционно-го равновесия, отвечающая максимальной теплоте адсорбции, Дж моль $^{-1}$.

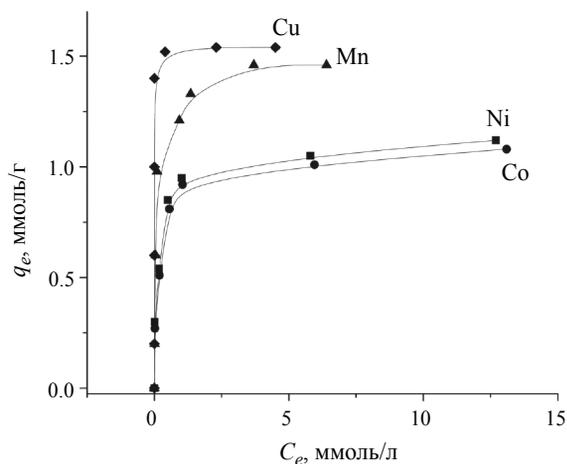


Рис. 1. Изотермы сорбции катионов тяжелых металлов на фосфате титана.

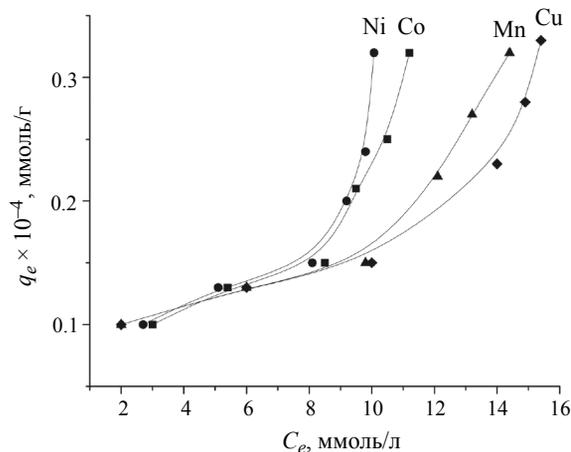


Рис. 2. Изотермы десорбции катионов тяжелых металлов на фосфате титана.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сорбционную способность TiOP оценивали, анализируя полученные изотермы сорбции. Как видно из представленных результатов (рис. 1), TiOP обладает хорошей сорбционной способностью по отношению к анализируемым катионам. Изотермы сорбции относятся к изотермам Н-типа по классификации Джайлса [10] и называются изотермами высокого сродства, когда на начальном этапе сорбции изотерма практически вертикальная. Экспериментальные данные показывают, что возможно полное удаление катионов из растворов при исходной концентрации марганца, никеля и кобальта до 3 ммоль л⁻¹, а меди до 6 ммоль л⁻¹. Далее количество поглощенных катионов закономерно увеличивается по мере возрастания его содержания в исходном растворе до 7–12 ммоль л⁻¹, а затем остается неизменным. Статическая ионообменная емкость при комнатной температуре составляет ммоль г⁻¹: Co²⁺ – 1.12, Ni²⁺ – 1.08, Mn – 1.46, Cu – 1.54. Такое различие в сорбируемости может быть связано со стерическими затруднениями, обусловленными размером эффективного радиуса гидратированных ионов, принимающих участие в процессе сорбции. Поскольку величина кристаллохимического радиуса катионов металлов увеличивается в ряду: Mn²⁺ < Cu²⁺ < Co²⁺ < Ni²⁺, следует ожидать, что размер гидратной оболочки ионов этих металлов будет меняться в обратном порядке, т.е. гидратированные ионы Co²⁺ и Ni²⁺ будут иметь больший радиус, чем катионы Cu²⁺ и Mn²⁺.

Полученные экспериментальные данные сорбции (рис. 1) обрабатывались линейризацией моделей в координатах $1/q_e - 1/C_e$, для модели Ленгмюра; $\ln q_e - \ln C_e$ для модели Фрейндлиха и $q_e - \ln C_e$ для модели Темкина. В табл. 1 приведены коли-

чественные характеристики процесса сорбции на фосфате титана в соответствии с выбранными моделями сорбции.

Согласно полученным значениям константы Ленгмюра ряд селективности сорбента к выбранным катионам можно представить в виде Cu²⁺ > Mn²⁺ > Co²⁺ > Ni²⁺.

Для получения количественных характеристик процесса десорбции строили изотермы десорбции как зависимость количества металла, оставшегося в сорбенте после десорбции к соответствующему количеству металла, перешедшего в раствор (рис. 2).

Изучение процесса десорбции показало, что независимо от степени насыщения сорбента катионами исследуемых металлов степень десорбции во всех случаях превышает 99.9%. Известно [8], что чем выше концентрация металла в сорбенте, тем сложнее десорбция. При сорбции на TiOP степень заполнения сорбента составляет 23–32% от теоретической обменной емкости (9.35 мг-экв/г), вычисленной на основании химической формулы соединения. Поэтому для понимания механизма десорбции полученные данные были обработаны согласно выбранным моделям. Для модели Ленгмюра взаимодействие между соседними сорбированными ионами не учитывается, для моделей Фрейндлиха и Темкина предполагается неоднородность распределения сорбированных ионов и сорбционные центры с высокой энергией связи оккупируются первыми.

Расчитанные параметры десорбции катионов для выбранных моделей сведены в табл. 2.

Согласно полученным результатам, процесс десорбции адекватно описывается изотермой Ленгмюра. Исходя из значений константы

Таблица 1. Параметры изотермы сорбции в соответствии с моделями Ленгмюра, Фрейндлиха и Темкина: q_e – ммоль $г^{-1}$; K_L – л ммоль $^{-1}$; K_F – л $^{1/n}$ ммоль $^{(1-1/n)}$ $г^{-1}$; A_T – л ммоль $^{-1}$; b_T – Дж ммоль $^{-1}$ (ммоль $кг^{-1}$) $^{-1}$

Me	Ленгмюр			Фрейндлих			Темкин		
	q_e	K_L	R^2	K_F	n	R^2	$A_T \times 10^3$	b_T	R^2
Cu	1.55	111.0	0.994	1.81	6.14	0.934	13.15	0.11	0.952
Mn	1.46	38.46	0.966	1.25	5.64	0.948	1.53	0.12	0.956
Ni	1.10	4.59	0.992	0.73	4.66	0.949	1.12	0.23	0.925
Co	1.12	5.55	0.995	0.79	5.32	0.907	0.56	0.22	0.947

Таблица 2. Параметры десорбции катионов тяжелых металлов с сорбента на основе фосфата титана в соответствии с моделями Ленгмюра, Фрейндлиха и Темкина

Me	Ленгмюр			Фрейндлих			Темкин		
	$q_{max} \times 10^{-4}$	K_L	R^2	$K_F 10^5$	n	R^2	A_T	$b_T \times 10^3$	R^2
Cu	0.12	29325	0.975	1.02	0.56	0.834	22.35	0.17	0.945
Mn	2.04	224	0.922	14.6	0.45	0.906	24.28	1.63	0.986
Ni	0.26	952	0.996	2.8	0.43	0.849	3.42	6.94	0.443
Co	0.38	750	0.987	26.2	0.41	0.858	3.56	7.24	0.452

Ленгмюра лучше всего десорбируются катионы меди и хуже – катионы марганца. Такое различие в десорбции может быть связано с размерами эффективного радиуса сорбированного иона.

Проводя анализ десорбции в зависимости от природы катионов металлов и сопоставление их кристаллохимических ионных радиусов, можно полагать, что высокие значения константы десорбции катионов кобальта и никеля могут быть обусловлены большими гидратными оболочками, что ограничивает доступность ионов ко всем сорбционным центрам.

По величине удельной поверхности и предельной сорбции катионов металла оценивали посадочную площадку (S) и радиус (r) сорбированного катиона:

$$S = \frac{S_{уд}}{\Gamma N_A}, \quad (5)$$

где $S_{уд}$ – удельная поверхность сорбента, $м^2 г^{-1}$, Γ – максимальная сорбционная емкость по катиону металла, ммоль $г^{-1}$, N_A – число Авогадро, ммоль $^{-1}$.

При оценке радиуса сорбированного катиона (r_s) исходили из следующих предположений:

$$S_{sq} = (2r_s)^2 = 4r_s^2, \quad (6)$$

отсюда

$$r_s = \frac{1}{2} S^{1/2}, \quad (7)$$

Таблица 3. Размер ионного и сорбированного радиуса ионов металла при 298 К

Me ион	$r_{cr}, \text{Å}$	$r_s, \text{Å}$	r_s/r_{cr}
Co^{2+}	0.78	2.17	2.78
Ni^{2+}	0.74	2.21	2.98
Cu^{2+}	0.80	1.86	2.32
Mn^{2+}	0.91	1.91	2.09

Обозначения: r_{cr} – ионный радиус, r_s – радиус сорбированного иона.

Для расчета радиуса катионов в фазе сорбента рассчитаны посадочные площадки катионов, исходя из данных удельной поверхности сорбента $127.9 м^2 г^{-1}$ и предельного значения сорбционной способности фосфата титана по данному катиону. Полученные значения сведены в табл. 3.

Очевидно, что катионы Co^{2+} и Ni^{2+} сорбируются в более гидратированном состоянии, при этом более короткодействующее ион-дипольное взаимодействие иона и молекул гидратной оболочки деполаризует сорбируемый катион и действующие на большие расстояния ион-ионные взаимодействия становятся более слабыми. Это объясняет высокую эффективность данных ионов к десорбции. Катионы марганца, имеющие самое низкое значение r_s/r_{cr} , а, следовательно, самую прочную связь с функциональными группами, наименее эффективны к десорбции.

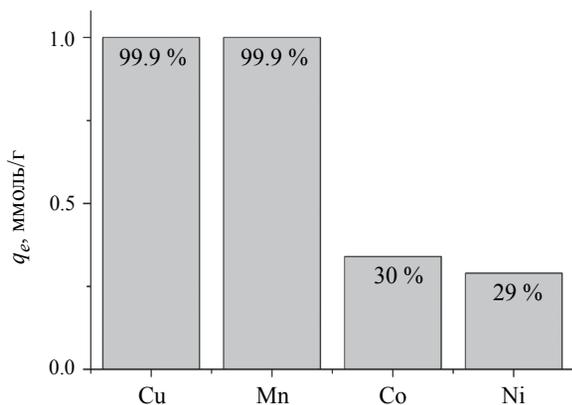


Рис. 3. Сорбция катионов тяжелых металлов из мультикомпонентного раствора.

Высокая эффективность катионов меди к десорбции может быть связана с константой связывания металла с фосфатными группами. Согласно имеющимся литературным данным константы связывания исследуемых ионов располагаются в ряд CuP (1.4×10^{-37}) < MnP (7.9×10^{-35}) < CoP (2.1×10^{-35}) < NiP (4.74×10^{-32}) [11]. Следовательно, для катионов меди характерно наименьшее сродство с фосфатными группами. Полученные результаты по десорбции ионов металлов на фосфате титана позволяют сделать заключение, что важными факторами, влияющими на гетерогенное равновесие десорбции, являются как размер сольватированного иона металла, так и характер его взаимодействия с ионогенными группами.

Размер гидратной оболочки сорбируемых катионов может быть причиной различной подчиненности процесса десорбции моделям Ленгмюра, Фрейндлиха и Темкина. Вероятно, более гидратированные катионы Co^{2+} и Ni^{2+} занимают энергетически выгодные поверхностные сорбционные центры, образуя мономолекулярный слой что соответствует модели Ленгмюра. В моделях Фрейндлиха и Темкина учитывается взаимодействие адсорбированных частиц (взаимное отталкивание), в результате которого каждой новой частице приходится затрачивать на адсорбцию больше энергии, чем предыдущим. Катионы Cu^{2+} и Mn^{2+} в силу малой гидратной оболочки способны проникать в меньшие по размерам поры и взаимодействовать с ионогенными группами, имеющими иное энергетическое состояние, нежели функциональные группы, расположенные на поверхности сорбента. При этом модель Темкина адекватно описывает сорбционно/десорбционное равновесие области средней степени заполнения сорбента, что согласуется с экспериментальными результатами.

Константы десорбции и по моделям Ленгмюра и Фрейндлиха на 2 порядка выше, чем расчи-

танные константы сорбции, что свидетельствует о возможности эффективной десорбции тяжелых металлов на фосфате титана. Обратимость процессов сорбции/десорбции на фосфате титана подтверждается и при сравнении параметра n по модели Фрейндлиха [8], который характеризует интенсивность протекания процессов. Отношение $n_{\text{дес}}/n_{\text{сор}}$ 0.08–0.09 для всех изучаемых катионов и свидетельствует об отсутствии химического взаимодействия с образованием прочных комплексов металлов с функциональными группами сорбента.

В рамках данных исследований также проверена возможность сорбции/десорбции исследованных ионов из мультикомпонентных растворов. Для этих целей были приготовлены четырехкомпонентные растворы, в которых концентрация каждого металла составляла 5 ммоль л^{-1} . Отношение Т:Ж было выбрано 1:200, процесс проводили в статических условиях при 25°C в течение 24 ч для сорбционных экспериментов и 2 ч для десорбции.

Было обнаружено, что сорбция катионов меди и марганца составляет 99.9% от их исходного содержания в растворе. В присутствии посторонних ионов сорбция кобальта и никеля значительно подавляется и их поглощение уменьшается на 70% по сравнению с сорбцией из однокомпонентных растворов. В целом поглощение катионов тяжелых металлов при проведении данного эксперимента составляет 2.63 ммоль г^{-1} (рис. 3).

Для оценки возможности многократного использования сорбента в работе исследована цикличность процесса сорбции/десорбции. Сорбцию вели из растворов 5 ммоль л^{-1} по металлу, Т:Ж = 1:200, десорбцию проводили 0.1N HCl при Т:Ж = 1:50. При проведении десорбции насыщенного катионами металлов фосфата титана в течение первых 3 циклов сорбция/десорбция установлено, что десорбция всех катионов протекает практически полностью, остаточное содержание металлов в твердой фазе не превышает 0.03 ммоль г^{-1} , далее полнота извлечения металлов снижается (табл. 4).

Следует отметить, что циклируемость процесса сорбция/десорбция сопровождается постепенным гидролизом фосфата титана с переходом титана и фосфора в раствор. Для определения химической устойчивости сорбента в фильтрах после десорбции определяли содержание TiO_2 и P_2O_5 и рассчитывали α (%) - отношение содержания этих элементов в растворе и исходном продукте. За 5 циклов сорбция/десорбция степень гидролиза сорбента составляет 0.4% по P_2O_5 и 0.17% по TiO_2 (рис. 4). Для сравнения гидролитической устойчивости сорбента в различных средах лучше использовать средний показатель скорости гидролиза [12], определяемый за первые сутки выдержки по уравнению:

Таблица 4. Сорбционная активность фосфата титана в зависимости от цикличности использования

Стадия	Процесс	Cu		Mn		Co		Ni	
		$F_{\text{сорб}}$	$F_{\text{дес}}$	$F_{\text{сорб}}$	$F_{\text{дес}}$	$F_{\text{сорб}}$	$F_{\text{дес}}$	$F_{\text{сорб}}$	$F_{\text{дес}}$
1	Сорбция	99.99	—	99.99	—	99.99	—	99.99	—
	Десорбция	—	99.99	—	99.99	—	99.99	—	99.99
2	Сорбция	99.97	—	99.97	—	99.97	—	99.98	—
	Десорбция	—	99.99	—	99.99	—	99.99	—	99.99
3	Сорбция	97.89	—	95.95	—	98.92	—	97.91	—
	Десорбция	—	99.99	—	97.29	—	96.96	—	96.95
4	Сорбция	95.63	—	92.67	—	89.16	—	88.45	—
	Десорбция	—	92.16	—	87.99	—	90.75	—	89.51
5	Сорбция	90.09	—	87.91	—	82.34	—	76.59	—
	Десорбция	—	87.23	—	82.34	—	83.76	—	83.17

Обозначения: $F_{\text{сорб}}$ и $F_{\text{дес}}$ — степень сорбции и десорбции (%) соответственно.

$$v = \frac{C_p V}{m \tau}, \quad (8)$$

где C_p — концентрация фосфат-ионов в растворе в пересчете на P_2O_5 (мг л^{-1}), V — объем раствора (л), m — масса сорбента (г), τ — время контакта 24 ч.

Средняя скорость гидролиза сорбента, находящегося в контакте с водными растворами составила $2.5 \times 10^{-2} \text{ мг г}^{-1} \text{ ч}^{-1}$.

Частичное разрушение сорбента, приводящее к изоляции и потере отдельных сорбционных центров, ведет к снижению эффективности процессов сорбции/десорбции.

Таким образом, в данной работе показана возможность использования фосфата титана для извлечения из растворов катионов тяжелых металлов с последующей регенерацией сорбента. Доказано, что сорбционно/десорбционное равновесие во многом определяется сольватированным состоянием катионов металлов. Установлено, что из мультикомпонентных растворов сорбент поглощает ионы металлов в соответствии с представленным выше рядом селективности на основе рассчитанных констант Ленгмюра. Показана возможность эффективной десорбции катионов металлов 0.1 н HCl. Проведена оценка возможности многократного использования сорбента и установлено, что, начиная с 4-го цикла, происходит снижение эффективности процессов сорбции/десорбции, что обусловлено гидролизом фосфатных групп и частичным разрушением сорбента. По мере существенного снижения функциональных свойств материала он может быть утилизирован после термической обработки.

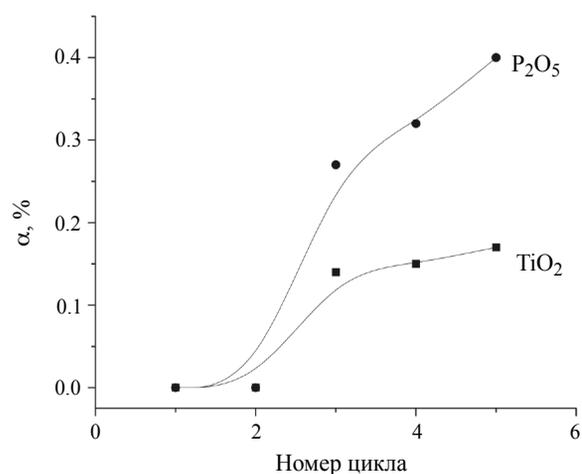


Рис. 4. Химическая устойчивость фосфата титана при его регенерации 0.1 н HCl.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ) в рамках научного проекта № 23-23-00187.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barrios-Estrada C., de Jesús Rostro-Alanis M., Muñoz-Gutiérrez B.D. et al. // Sci. Total Environ. 2018. V. 612. P. 1516. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.013>
2. Renge V.C., Khedkar S.V., Pandey Shraddha V. // Sci. Rev. Chem. Commun. 2012. V. 2. № 4. P. 580.

3. *Muya F.N., Ward M., Sunday C.E., et al.* // *Water Sci. Technol.* 2015. V. 73. № 5. P. wst2015567. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.567>
4. *Fu F., Wang Q.* // *J. Environ. Manage.* 2011. V. 92. № 3. P. 407. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>
5. *Trublet M., Maslova M.V., Rusanova D., Antzutkin O.N.* // *RSC Adv.* 2017. V. 7. № 4. P. 1989. <https://doi.org/10.1039/C6RA25410A>
6. *Maslova M., Ivanenko V., Yanicheva N., Gerasimova L.* // *J. Water Process Eng.* 2020. V. 35. P. 101233. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101233>
7. *Trublet M., Maslova M.V., Rusanova D., Antzutkin O.N.* // *Mater. Chem. Phys.* 2016. V. 183. P. 467. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2016.09.002>
8. *Aşçı Y., Nurbaş M., Sağ Açikel Y.* // *J. Environ. Manage.* 2010. V. 91. № 3. P. 724. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.09.036>
9. *Temkin M., Pyzhev V.* // *Acta Physicochim. URSS.* 1940. V. 12. P. 217.
10. *Giles C.H., MacEwan T.H., Nakhwa S.N., Smith D.* // *J. Chem. Soc.* 1960. V. 846. P. 3973.
11. *Haynes W.M.* *Handbook of Chemistry and Physics.* 97-th Edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. 2643 p.
12. *Шарыгин Л.М., Калягина М.Л., Боровков С.И.* // *Журн. прикл. химии.* 2005. Т. 78. № 2. С. 229.

SORPTION-DESORPTION PROPERTIES OF TITANIUM PHOSPHATE TOWARDS HEAVY METALS CATIONS

M. V. Maslova^{a,*}, P. E. Evstropova^a, N. V. Mudruk^a, and Yu. P. Semushina^a

^a*I. V. Tananaev Institute of Chemistry – Subdivision of the Federal Research Centre «Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences» (ICT KSC RAS), Apatity, Murmansk region, Russia*

*e-mail: m.maslova@ksc.ru

**e-mail: n.mudruk@ksc.ru

The sorption/desorption behavior of divalent ions (Cu²⁺, Mn²⁺, Co²⁺, Ni²⁺) on amorphous titanium phosphate is studied. The sorption/desorption equilibrium is shown to be largely determined by the solvated state of heavy metal cations; selectivity series are constructed. Regardless of the degree of saturation of the sorbent with cations of the metals being studied, the desorption degree exceeds 99.9% in all cases. With multi-stage use of the sorbent, the efficiency of sorption/desorption processes is established to decrease because of its dehydration due to hydrolysis of the sorbent, which is 2.6 · 10⁻³ mg g⁻¹·h⁻¹. The efficiency of sorption/desorption of the ions from multicomponent solutions is shown.

Keywords: sorbents, titanium phosphate, sorption, desorption, heavy metal cations, equilibrium