

НОВЫЙ СУЛЬФОКАТИОНИТ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА И ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ УМЯГЧЕНИЯ ВОДЫ

© М. Г. Мухамедиев¹, Д. Ж. Бекчанов¹, М. М. Жураев^{1,2}, П. Лиеберзейт³, Д. А. Гафурова¹

¹ Национальный университет Узбекистана им. Мирзо Улугбека,
100174, Республика Узбекистан, г. Ташкент, ул. Университетская, д. 4

² Чирчикский государственный педагогический институт Ташкентской области,
111700, Республика Узбекистан, Ташкентская обл., г. Чирчик, ул. Амира Темура, д. 104

³ University of Vienna,
Department of Physical Chemistry, Währinger Straße 42, 1090 Wien, Room 2H31
E-mail: mmuxamediev@mail.ru

Поступила в Редакцию 10 февраля 2021 г.

После доработки 2 декабря 2021 г.

Принята к публикации 2 декабря 2021 г.

Взаимодействием гранулированного поливинилхлорида с серой получен серосодержащий полимер, окисление которого азотной кислотой привело к образованию сульфокатионита. Наличие сульфогруппы в ионите доказано методом ИК-спектроскопии, а катионообменных свойств — определением его статической обменной емкости. Методом сканирующей электронной микроскопии изучена морфология полученного катионита. Определено, что ионит термически устойчив при 423 К, устойчивость по отношению к действию сильных окислителей, таких как хлорная и азотная кислоты, сильных оснований составляет 80–95%. В статических условиях изучена кинетика и рассчитаны константы равновесия сорбции ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} синтезированным катионитом из водных растворов. Установлено, что после проведения 5 циклов сорбции–десорбции емкость синтезированного катионита по ионам Ca^{2+} и Mg^{2+} осталась неизменной. Показано, что синтезированный сульфокатионит можно использовать для уменьшения жесткости воды.

Ключевые слова: поливинилхлорид; сера; окисление; сульфокатионит; сорбция; ионы металлов; умягчение воды

DOI: 10.31857/S004446182112001X

Для умягчения воды используются несколько видов ионитов (КУ-2, DOWEX-HCR-S/S, Lewatit-C249, Purolite-C100E), получаемых сульфированием серной кислотой сополимера стирола и дивинилбензола и содержащих сильноокислотные сульфогруппы. Недостатком метода их получения является многостадийность: сначала синтезируют гранулированный полимер суспензионной сополимеризацией стирола с дивинилбензолом, затем этот сополимер сульфуруют

концентрированной серной кислотой в гетерофазных условиях [1].

Сорбенты, используемые в различных отраслях промышленности, должны отвечать ряду требований, включая высокую сорбционную способность по отношению к различным ионам, нерастворимость в воде, устойчивость к биодegradации, химическую и термическую стабильность, возможность повторного использования, а процесс их получения должен

соответствовать экологическим требованиям. Одним из способов получения ионообменных материалов являются полимераналогичные превращения в цепях промышленных многотоннажных полимеров, выпускаемых в виде волокон или гранул [2], например, модификация поливинилхлорида полиэтиленполиамином [3] с дальнейшим получением полиамфолита на его основе [4]. Эти ионообменные материалы обладали способностью сорбировать цветные металлы из водных растворов [5].

Цель работы — получение сульфокатионита путем химической модификации гранульного поливинилхлорида серой и изучение возможности его применения для уменьшения жесткости природных вод.

Экспериментальная часть

Сульфокатионит получали путем модификации гранульного поливинилхлорида серой с дальнейшим окислением продукта осернения азотной кислотой. Взаимодействие серы с гранульным поливинилхлоридом проводили по модифицированной методике [6]. 10 г гранульного поливинилхлорида, очищенного по методике [3], помещали в автоклав из нержавеющей стали и смешивали с 7 г порошкообразной серы. Автоклав плотно закрывали и нагревали при температуре 423 К в течение 5 ч. После охлаждения продукт помещали в колбу, снабженную обратным холодильником, обрабатывали 150 мл 10 М HNO_3 при температуре 363 К в течение 4 ч, промывали водой и сушили до постоянной массы. Статическая обменная емкость (СОЕ) по NaOH полученного образца составила $3.5 \text{ мг-экв} \cdot \text{г}^{-1}$, прочность сорбента — 95–98%.

Используемые реагенты для синтеза катионита на основе поливинилхлоридного пластиката и в процессе сорбции металлов на катионите: сера молотая (ч., ООО Sur Energy), HNO_3 (конц., х.ч.), HClO_4 (конц., х.ч.), NaOH (гранулы, х.ч.), CaCl_2 обезвоженный (х.ч.); $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (ч.), этилендиаминтетрауксусная кислота (ч.), NaCl (ч.) (все вышеуказанные реактивы производства ООО «АО РЕАХИМ»), пластикат поливинилхлорид марки И40-13А, рец. 8/2 в виде сферических гранул размером 2–3 мм (АО «Джакопо Индастриз групп»); этилацетат (ч., АО «Навоизот») — очищали перегонкой, температура кипения 350 К, n_D^{20} 1.3720. Катионит КУ-2-8 (ООО «СМОЛЫ»).

Подготовку синтезированного сульфокатионита вели по методике ГОСТ 10896–78 «Иониты. Подготовка к испытанию». Физико-химические характеристики синтезированного ионита и катионита КУ-2-8 определяли, используя методи-

ки, приведенные в следующих стандартах: ГОСТ 10898.1–84 «Иониты. Метод определения влаги»; ГОСТ 10898.4–84 «Иониты. Методы определения удельного объема»; ГОСТ 20255.1–89 «Иониты. Методы определения статической обменной емкости»; ГОСТ 20255.2–89 «Иониты. Методы определения динамической обменной емкости»; ГОСТ 16188–70 «Метод определения прочности при истирании».

ИК-спектры порошков образцов (порошок получали растиранием образцов в ступе с пестиком из прочного минерала) регистрировали с помощью ИК-Фурье-спектрометра IRTracer-100 (Shimadzu) в комплекте с приставкой однократного нарушенного полного внутреннего отражения с призмой алмаз/ ZnSe MIRacle 10, предназначенной для анализа твердых, жидких, пастообразных, гелеобразных и труднообрабатываемых веществ в диапазоне сканирования $4600\text{--}600 \text{ см}^{-1}$.

Морфологию поверхностей материалов изучали с использованием метода сканирующей электронной микроскопии на приборе EVO MA-10 (Carl Zeiss), оборудованном микроаналитической системой для энергодисперсионного рентгеновского (EDX) микроанализа (Oxford Instruments).

Термогравиметрический и дифференциально-термический анализ катионита проводили на термогравиметрическом анализаторе TG 209 F1. Химическая стабильность была изучена в отношении сильных кислот, обладающих окислительными свойствами, таких как HNO_3 и HClO_4 , и в отношении сильного основания — NaOH при высоких температурах. Для выявления химической стойкости исследуемые иониты оставляли в агрессивных реагентах (1 и 5% HNO_3 и HClO_4 , 5% NaOH) на 10–48 ч, после чего иониты отфильтровывали, промывали до нейтральной реакции и высушивали до постоянной массы. Химическая стабильность ионитов оценивалась по изменению значения СОЕ. Изменение массы при воздействии сильных кислот и оснований определяли гравиметрическим методом. Для этого навеску сухого образца ионита массой 1.0 г помещали в коническую колбу с плотно притертой пробкой и заливали 100 мл исследуемого раствора и выдерживали при необходимой температуре и времени. Сорбент отфильтровывали, высушивали и определяли остаточную массу.

Сорбцию ионов металлов из водных растворов на сульфокатионит изучали при исходной концентрации Ca^{2+} и Mg^{2+} 0.025, 0.05, 0.075, 0.1 моль $\cdot \text{л}^{-1}$ при температурах 293, 303 и 313 К. Для этой цели навески по 0.2 г сухого ионита со статической обменной емкостью $3.5 \text{ мг-экв} \cdot \text{г}^{-1}$ помещали в конические колбы емкостью 250 мл и заливали 100 мл раствора изучаемой

соли определенной концентрации, сорбцию проводили в течение 24 ч при постоянном перемешивании на магнитной мешалке со скоростью 80 об·мин⁻¹. Для поддержания постоянной температуры колбу с мешалкой помещали в воздушный термостат. Кинетику сорбции изучали аналогичным образом, реакцию вели в нескольких колбах с различной концентрацией соли и при различных температурах. Из реакционных колб за определенный промежуток времени отбирали пробу и определяли концентрацию ионов металлов. Концентрацию Ca²⁺ и Mg²⁺ до и после адсорбции определяли методом комплексонометрии с использованием этилендиаминтетрауксусной кислоты. Для определения динамической обменной емкости полученный гранулированный сульфокатионит с СОЕ 3.50 мг-экв·г⁻¹ в натриевой форме помещали в колонку и пропускали растворы, содержащие различные концентрации Ca²⁺ и Mg²⁺, до тех пор, пока не наблюдался проскок ионов в растворе при выходе из колонки. Десорбцию проводили 10%-ным водным раствором NaCl.

Обсуждение результатов

Повышение температуры реакционной среды до 423 К при осернении поливинилхлорида приводит к возрастанию СОЕ катионита, однако при температурах выше 423 К происходит снижение сорбционной способности. При температуре 453 К также наблюдается уменьшение массы модифицируемого серой полимера (табл. 1), причиной чего может являться деструкция макромолекул поливинилхлорида.

Максимальная статическая обменная емкость ионита, полученного осернением поливинилхлорида, достигается за 5 ч ($T = 423$ К), дальнейшее увеличение продолжительности процесса не приводит к

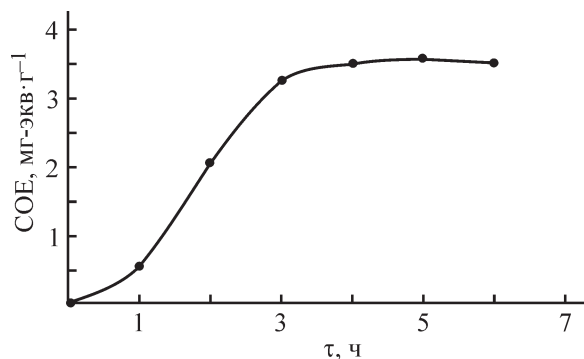
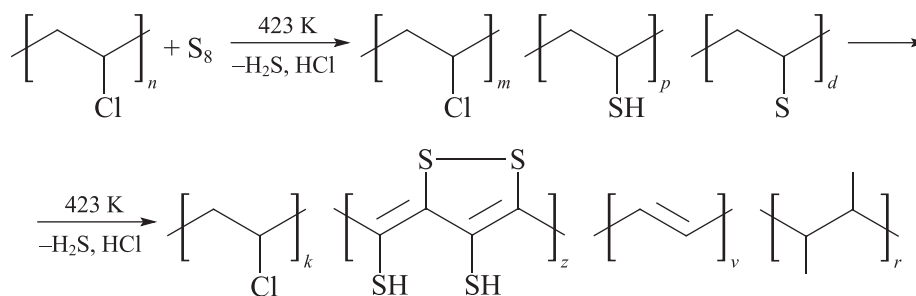


Рис. 1. Зависимость статической обменной емкости сульфокатионита на основе поливинилхлорида от продолжительности реакции осернения полимера ($T = 423$ К).

образованию новых ионогенных групп в модифицированном полимере (рис. 1).

В ИК-спектре полимера, модифицированного серой (рис. 2, б), в области 1630–1680 см⁻¹ присутствуют полосы поглощения валентных колебаний >C=C< связи [7]. Появление этих полос связано с дегидрохлорированием винилхлоридной цепи. Полоса поглощения в области 1100 см⁻¹ принадлежит тионовой группе >C=S, а при 2550 см⁻¹ наблюдается полоса поглощения, соответствующая валентным колебаниям —S—H сульфидной группы. В ИК-спектрах всех изучаемых образцов (рис. 2) в области 693 и 635 см⁻¹ наблюдается полоса поглощения валентных колебаний остаточных групп >C—Cl и при 1250, 1480–1440 и 1425 см⁻¹ полосы поглощения, соответствующие деформационным колебаниям групп C—C, C—H и CH₂ полимерной цепи* [7]. На основе анализа ИК-спектров схему реакции взаимодействия поливинилхлорида и серы можно представить в следующем виде:



В процессе реакции некоторые атомы хлора замещаются атомами серы, к образовавшимся в результате реакции дегидрохлорирования двойным связям присоединяется сульфид водорода, и в структуре полимера появляются гидросульфидные группы.

Для формирования сульфогрупп в структуре полимера была проведена реакция окисления осер-

* Кутцов А. Х., Жижин Г. Н. Фурье-КР и Фурье-ИК спектры полимеров. М.: Техносфера, 2013. С. 31–35.

Таблица 1

Характеристики сульфокатионита, полученного взаимодействием поливинилхлорида с серой при различных температурах*

Температура, К	393	403	413	423	433	443	453
Статическая обменная емкость, мг-экв·г ⁻¹	1.8	2.3	3.2	3.5	3.3	3.1	2.9
Масса поливинилхлорида до реакции, г	2	2	2	2	2	2	2
Масса продукта после реакции, г	2.12	2.18	2.22	2.26	2.11	2.01	1.95
Прирост массы, %	5.75	8.70	10.82	12.86	5.30	0.35	-2.75

* Мольное соотношение поливинилхлорид:S = 1:1.5, продолжительность реакции 5 ч.

ненного полимера раствором HNO₃. Максимальная СОЕ достигалась в 10 М растворе HNO₃ за 4 ч при температурах выше 363 К (табл. 2).

В ИК-спектре синтезированного сульфокатионита (рис. 2, в) в области 1723 и 1210 см⁻¹ наблюдаются интенсивные полосы поглощения одновалентной

—SO₃H-группы, в области 1220–1080 см⁻¹ — валентные колебания связи S=O, полосы поглощения —ОН-групп в области 3400 см⁻¹. Реакцию окисления азотной кислотой серы в составе модифицированного поливинилхлорида можно представить следующей схемой:

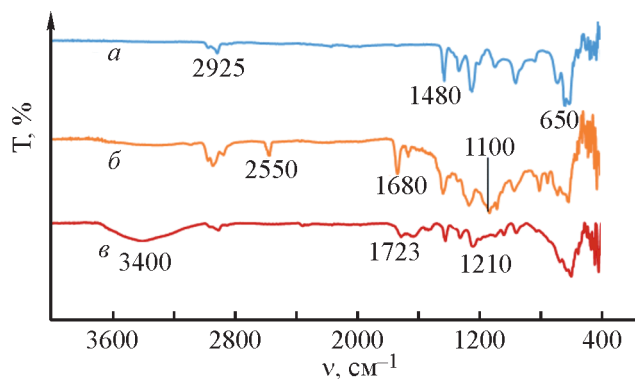
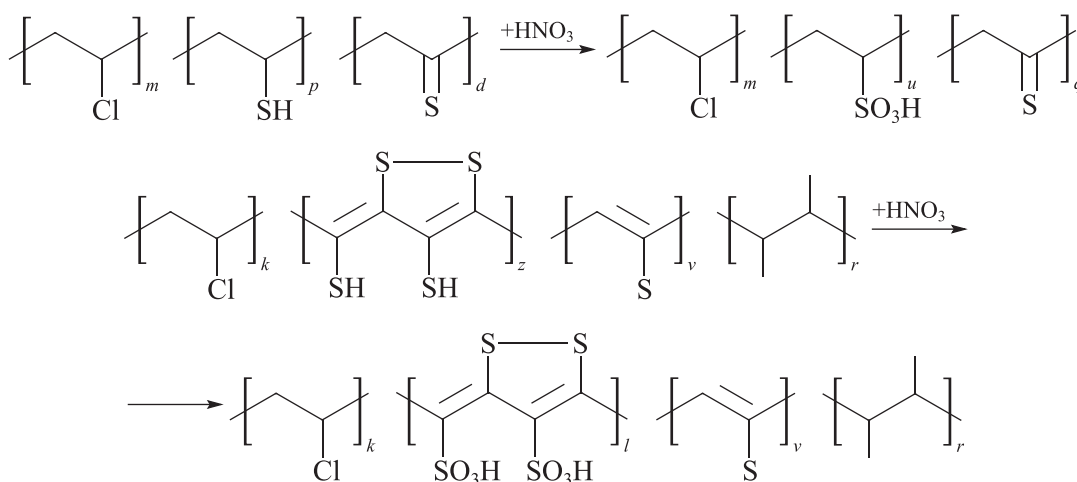


Рис. 2. ИК-спектры поливинилхлорида и продуктов его модификации.

а — поливинилхлорид; б — поливинилхлорид, модифицированный серой; в — сульфокатионит на основе поливинилхлорида.

Поверхность исходного поливинилхлорида является однородной и не имеет пор (рис. 3, а), после удаления пластификаторов путем экстракции и модификации поливинилхлорида серой фиксируются (рис. 3, б) элементы надмолекулярной структуры полимера (сера присутствует в форме кристаллов октаэдрической формы). Изображение сульфокатионита на основе поливинилхлорида (рис. 3, в) иллюстрирует участки поверхности сорбента, имеющие пористую структуру, облегчающую адсорбцию ионов металлов на поверхности сорбента.

При нагревании масса образца изменяется в 2 этапа (рис. 4): при 403–433 К регистрируется потеря массы 6.07%, при нагревании выше 527 К происходит разложение образца, приводящее к потере до 32% массы от первоначальной. На кривых дифференциальной сканирующей калориметрии регистрируется эндотермический пик при T_{max} = 427.8 К с поглоще-

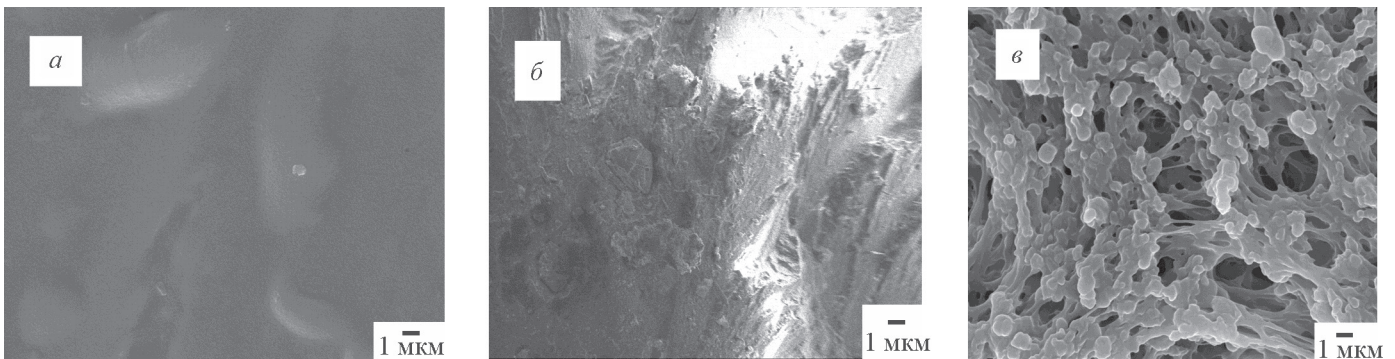


Рис. 3. Изображения, полученные методом сканирующей электронной микроскопии, образцов поливинилхлорида (а), поливинилхлорида, модифицированного серой (б), сульфокатионита на основе поливинилхлорида (в).

Таблица 2

Влияние температуры на статическую обменную емкость образовавшегося сульфокатионита при окислении поливинилхлорида, модифицированного серой*

Температура, К	323	333	343	353	363	373	383
Статическая обменная емкость, мг-экв·г ⁻¹	1.2	1.4	2.9	3.3	3.5	3.5	3.5

* Время реакции 4 ч, окислитель HNO₃(конц.).

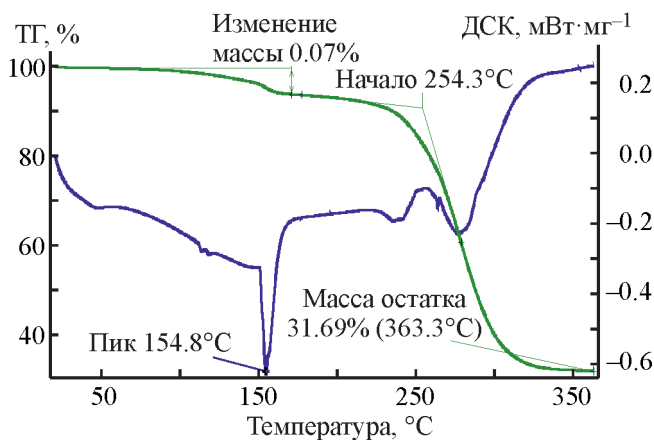


Рис. 4. Дериватограмма сульфокатионита на основе поливинилхлорида (ТГ — термогравиметрия, ДСК — дифференциальная сканирующая калориметрия).

нием энергии 28.13 Дж·г⁻¹ и при $T_{\max} = 554$ К — потерей энергии 130 Дж·г⁻¹. Полученные результаты показывают, что термостабильность сульфокатионита на основе поливинилхлорида соответствует аналогичным характеристикам промышленного катионита КУ-2 [8].

Устойчивость сульфокатионита на основе поливинилхлорида к сильным основаниям и кислотам позволяет его использовать в агрессивных средах (табл. 3). Физико-химические параметры сульфокатионита, полученного на основе поливинилхлорида (табл. 4), практически близки к аналогичным показателям катионита КУ-2-8, используемого в промышленности, и соответствуют ГОСТ 20298–74 «Смолы ионообменные».

Таблица 3

Устойчивость сульфокатионита, полученного на основе полвинилхлорида, к различным агрессивным средам

Среда	Температура T , К	Время контакта, ч	Статическая обменная емкость, мг-экв·г ⁻¹		$\frac{COE_{\text{посл}}}{COE_{\text{исх}}}$, %	Изменение массы, %
			исходная $COE_{\text{исх}}$	после обработки $COE_{\text{посл}}$		
1% HNO ₃	298	48	3.43	3.12	91.1	1.0
5% HNO ₃	298	48	3.43	3.01	87.6	4.5
1% HClO ₄	298	48	3.43	2.45	71.4	13.6
5% HClO ₄	298	48	3.43	2.28	66.5	14.5
5% NaOH	373	10	3.43	2.85	83.0	11.5

Таблица 4
Характеристики сульфокатионита на основе поливинилхлорида и катионита КУ-2-8

Показатель	Катионит на основе поливинилхлорида		Катионит КУ-2-8	
	H ⁺ -форма	Na ⁺ -форма	H ⁺ -форма	Na ⁺ -форма
Внешний вид и цвет	Продолговатые светло-коричневые гранулы		Сферические светло-красно-желтые гранулы	
Размер гранул, мм	0.3–1.9		0.3–1.3	
Удельный объем влажного катионита, см ³ ·г ⁻¹ , не более	2.4	2.4	2.8	2.8
Статическая обменная емкость по 0.1 Н растворам, ммоль-экв·г ⁻¹	NaOH	Отсутствует	4.3	Отсутствует
	CaCl ₂	2.2	2.8	2.9
	MgCl ₂	2.1	2.2	2.4
Общая динамическая обменная емкость, г-экв·(м ³) ⁻¹	NaOH	Отсутствует	1600	Отсутствует
	CaCl ₂	Не определялась	1170	Не определялась
	MgCl ₂	Не определялась	1250	Не определялась
Влажность, %	28–32		48–58	
Механическая прочность, %	99		99	

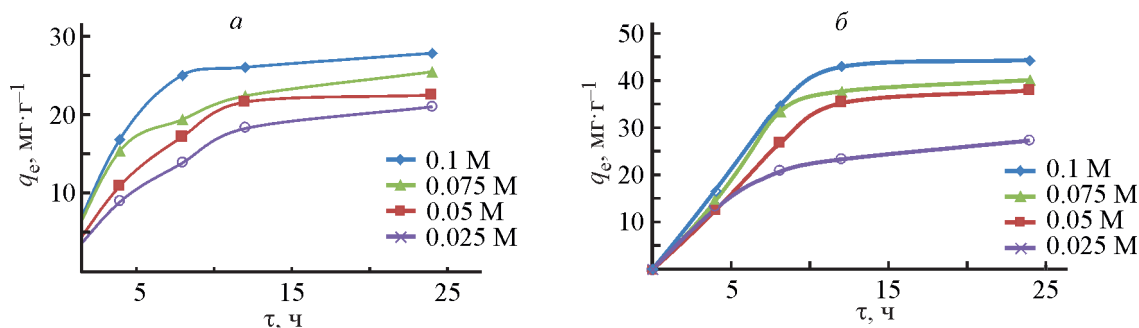


Рис. 5. Кинетика сорбции ионов Mg²⁺ (а) и Ca²⁺ (б) сульфокатионитом на основе поливинилхлорида при температуре 313 К.

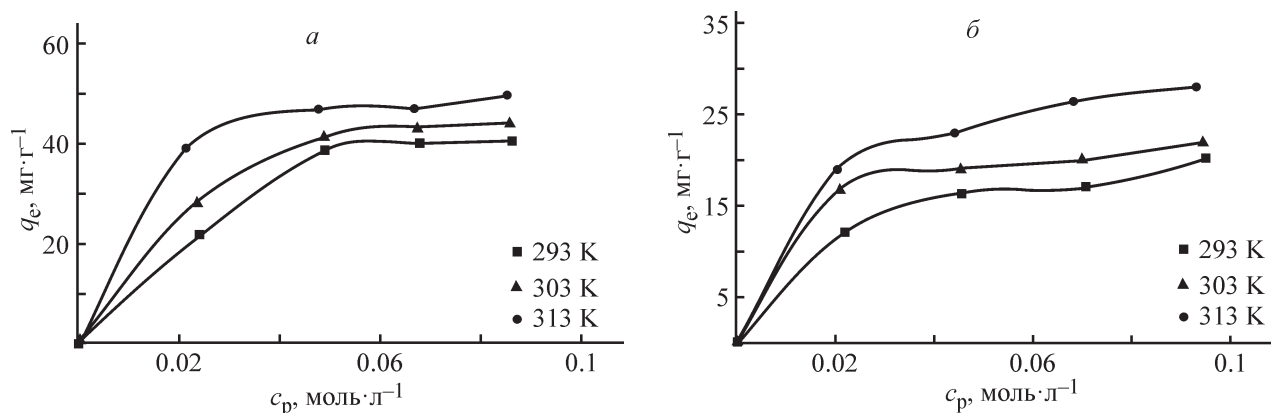


Рис. 6. Изотермы сорбции ионов Ca²⁺ (а) и Mg²⁺ (б) из водных растворов сульфокатионитом на основе поливинилхлорида при различных температурах (время контакта 24 ч).

Таблица 5

Параметры уравнений Ленгмюра и Фрейндлиха, описывающие изотермы сорбции ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} сульфокатионитом на основе поливинилхлорида

Ион	Константы уравнения Ленгмюра		Коэффициент корреляции R^2	Константы уравнения Фрейндлиха $q_e = K_F c^{1/n}$		Коэффициент корреляции R^2
	максимальная адсорбция q_{max} , мг·г ⁻¹	константа равновесия адсорбции K_L , л·мг ⁻¹		n	K_F , мг·г ⁻¹	
Ca^{2+}	55.5	0.00085	0.997	5.68	11.72	0.982
Mg^{2+}	38.5	0.00074	0.972	2.44	1.18	0.968

Таблица 6

Термодинамические характеристики процесса сорбции ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} сульфокатионитом на основе поливинилхлорида

Ион	ΔH° , кДж·моль ⁻¹	ΔS° , Дж·моль ⁻¹ ·К ⁻¹	ΔG° , кДж·моль ⁻¹		
			293 К	303 К	313 К
Ca^{2+}	8.44	52.72	-6.99	-7.52	-8.05
Mg^{2+}	3.01	37.84	-8.06	-8.44	-8.82

Равновесие при сорбции ионов Mg^{2+} и Ca^{2+} полученным сульфокатионитом достигается в течение 12 ч, дальнейшее увеличение времени контакта катионита с растворами солей к возрастанию сорбции практически не приводит (рис. 5). Изотермы сорбции ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} катионитом свидетельствуют о его высокой сорбционной способности по отношению к ионам этих металлов (рис. 6).

Значения констант равновесия адсорбции рассчитаны из изотерм сорбции с использованием модифицированных для ионного обмена уравнений Фрейндлиха и Ленгмюра [9]. Коэффициенты корреляции R^2 при расчетах по уравнению Ленгмюра выше, чем по уравнению Фрейндлиха (табл. 5), следовательно, процесс изучаемой адсорбции ионов металлов лучше описывается уравнением Ленгмюра.

Эндотермический характер процесса и возрастание энтропии, наблюдаемые в данной работе (табл. 6), также отмечены при изучении сорбции ионов Ca^{2+} ионитом Purolite C100E ($\Delta H = 22.733$ кДж·моль⁻¹ и $\Delta S = 9.545 \cdot 10^{-3}$ кДж·моль⁻¹·К⁻¹) [10].

С целью выяснения возможности использования полученного сульфокатионита в промышленных условиях проведено исследование сорбции–десорбции ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} в динамических условиях. Установлено, что динамическая обменная емкость сульфокатионита после регенерации раствором NaCl в первых пяти циклах практически не изменялась.

Выводы

Синтезированный на основе поливинилхлорида сульфокатионит соответствует требованиям, предъявляемым к ионитам, используемым для уменьшения жесткости воды.* Изотермы сорбции синтезированным сульфокатионитом ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} описываются уравнением Ленгмюра, статическая обменная емкость синтезированного ионообменного материала по ионам Ca^{2+} выше, чем у катионита Purolite C100E. Динамическая сорбционная емкость сульфокатионита на основе поливинилхлорида по ионам Ca^{2+} и Mg^{2+} после нескольких циклов сорбции–десорбции остается практически неизменной, что свидетельствует о возможности его многократного применения для уменьшения жесткости природной воды.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках проекта ПЗ-20170925290+ПЗ-2017092965+GP-20170927395 «Получение ионитов на основе местного сырья и их использование для сорбции цветных и редких металлов из отходов производства», финансируемого Министерством инновационного развития Республики Узбекистан.

* ГОСТ 20298–74. Смолы ионообменные.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в этой статье.

Информация о вкладе авторов

М. Г. Мухамедиев предложил метод получения сульфокатионита на основе поливинилхлорида и условия его получения, проводил расчеты термодинамических параметров процесса сорбции; Д. Ж. Бекчанов осуществлял синтез осерненного поливинилхлорида, изучал кинетику и термодинамику процесса сорбции ионов металлов; Д. А. Гафурова проводила окисление осерненного поливинилхлорида и определяла статическую обменную емкость полученного сульфокатионита; М. М. Жураев проводил эксперименты по наработке образцов и изучению их динамической обменной емкости, влажности, прочности катионита; Петер Лиеберзейт проводил исследование полученных образцов методами сканирующей электронной микроскопии и ИК-спектроскопии.

Информация об авторах

Мухамедиев Мухтаржан Ганиевич, д.х.н., проф.,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8065-9651>

Бекчанов Давронбек Жумазарович, д.х.н., доцент,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3233-5572>

Жураев Мурод Махмаражаб угли,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0986-4249>

Петер Лиеберзейт, проф.,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1596-0584>

Гафурова Дилфуза Анваровна, д.х.н., доцент,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8129-0705>

Список литературы

- [1] Zagrodni A. A. Ion exchange materials: properties and applications. Amsterdam; London: Elsevier Sci., 2007. P. 21–22.
<https://doi.org/10.1016/B978-008044552-6/50003-4>
- [2] Bekchanov D., Mukhamediev M., Lieberzeit P., Babojonova G., Botirov S. Polyvinylchloride-based anion exchanger for efficient removal of chromium (VI) from aqueous solutions // Polym. Adv. Technol. 2021. V. 32. N 10. P. 3995–4004.
<https://doi.org/10.1002/pat.5403>
- [3] Мухамедиев М. Г., Бекчанов Д. Ж. Новый анионит на основе поливинилхлорида и его применение в промышленной водоподготовке // ЖПХ. 2019. Т. 92. № 11. С. 1401–1407.
<https://doi.org/10.1134/S0044461819110057> [Mukhamediev M. G., Bekchanov D. Zh. New anion exchanger based on polyvinyl chloride and its application in industrial water treatment // Russ. J. Appl. Chem. 2019. V. 92. N 11. P. 1499–1505.
<https://doi.org/10.1134/S1070427219110053>].
- [4] Bekchanov D., Mukhamediev M., Kutlimuratov N., Xushvaqtoev S., Juraev M. Synthesis of a new granulated polyampholyte and its sorption properties // IJTech. 2020. V. 11. N 4. P. 794–803.
<https://doi.org/10.14716/ijtech.v11i4.4024>
- [5] Himoyat I., Shodlik K., Mukhtarjan M., Davronbek B., Sherimmat Y., Bakhtiyor Y. Sorption of Zn (II) and Cr (III) ions into ion exchangers obtained on the basis of local raw materials // Int. J. Pharm. Res. 2020. V. 12. N 3. P. 1728–1738.
<https://doi.org/10.31838/ijpr/2020.12.03.236>
- [6] Шаглаева Н. С., Баландин В. В., Султангареев Р. Г., Прозорова Г. Ф., Вакульская Т. И., Хутсисхвили С. С. Сульфуризация поливинилхлорида // ЖПХ. 2013. Т. 86. № 4. С. 655–658 [Shaglaeva N. S., Bayandin V. V., Sultangareev R. G., Prozorova G. F., Vakul'skaya T. I., Khutsishvili S. S. Sulfurization of polyvinylchloride // Russ. J. Appl. Chem. 2013. V. 86. N 4. P. 611–614.
<https://doi.org/10.1134/S1070427213040290>].
- [7] Lazar L., Bandrabur B., Tataru-Fărnuș R.-E., Drobotă M., Bulgariu L., Gutt G. FTIR analysis of ion exchange resins with application in permanent hard water softening // EEMJ. 2014. V. 13. N 9. P. 2145–2152.
<http://dx.doi.org/10.30638/eemj.2014.237>
- [8] Emel'yanov A. S., Rodin A. V., Belova E. V., Vidanov V. L. Thermal stability of KU-2*8 sulfocation exchanger in contact with nitric acid under isochoric conditions // Prot. Met. Phys. Chem. Surf. 2019. V. 55. N 12. P. 1044–1049.
<https://doi.org/10.1134/S207020511906011X>
- [9] Li C., Yu Y., Li Q., Zhong H., Wang S. Kinetics and equilibrium studies of phosphate removal from aqueous solution by calcium silicate hydrate synthesized from electrolytic manganese residue // Ads. Sci. & Tech. 2019. V. 37. N 7–8. P. 547–565.
<https://doi.org/10.1177/0263617419860620>
- [10] Bandrabur B., Tataru-Farmus R.-E., Lazar L., Gutt G. Application of a strong acid resin as ion exchanger material for water softening — equilibrium and thermodynamic analysis // SCSCC6. 2012. V. 13. N 4. P. 361–370. <https://doaj.org/article/9446dda9ee3e4bd83588193e89cd074>