



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 544.773.432

doi: 10.17308/sorpchrom.2024.24/12404

Сорбция нитрит-ионов из водных растворов акрилатными гидрогелями

Наталья Владимировна Маслова¹, Алексей Алексеевич Кушнир¹,

Павел Тихонович Суханов^{1✉}, Алексей Сергеевич Сатуров²

¹Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия,

pavel.suhanov@mail.ru ✉

²Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия

Аннотация. Перспективными материалами, применяемыми для сорбции загрязнителей, являются акрилатные гидрогели – высокогидратированные сетчатые структуры. Они способны эффективно поглощать воду, характеризуются высокой механической прочностью и химической стабильностью. Гидрогели на основе сополимеров акриламида с акрилатом калия/натрия (коммерческие образцы «Агрикола», Китай, «Счастливый дачник», РФ) и графт-сополимеры хитозана, акриловой кислоты и акриламида применены для сорбции нитрит-ионов из водных растворов. Концентрацию нитрит-ионов устанавливали фотометрически по реакции с реактивом Грисса. Установлены условия сорбции нитрит-ионов: pH 4 (степень извлечения зависит от заряда поверхности сорбента и сорбата), время контакта фаз – 160 мин, при которых в зависимости от природы сорбента предельная сорбция составляет 19.2–114.9 мг/г. Зависимость скорости сорбции нитрит-ионов от времени контакта фаз аппроксимирована моделью псевдо-первого и псевдо-второго порядков. Модель псевдо-второго порядка наиболее адекватно ($r^2 = 0.981-0.993$) описывает кинетику сорбции, позволяет предположить, что процесс имеет хемосорбционный механизм (ионный обмен). Изотермы сорбции аппроксимировали моделями Ленгмюра, Фрейндлиха и Дубинина-Радускевича и по классификации ИЮПАК принадлежат к первому типу. На основании анализа изотерм Ленгмюра ($r^2 = 0.978-0.995$) сделан вывод о распределении нитрит-ионов в системе водный раствор – гидрогель вследствие сорбции на независимых активных центрах сополимеров. Значения предельной сорбции нитрит-ионов может зависеть от особенностей строения объемного полимерного каркаса сорбентов, связанного со способом его получения и природой полярных групп.

Ключевые слова: гидрогели, акриламид, акрилат натрия, акрилат калия, сорбция, нитрит-ионы.

Для цитирования: Маслова Н.В., Кушнир А.А., Суханов П.Т., Сатуров А.С. Сорбция нитрит-ионов из водных растворов акрилатными гидрогелями // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2024. Т. 24, № 4. С. 470-480. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12404>

Original article

Sorption of nitrite ions from aqueous solutions by acrylate hydrogels

Natalya V. Maslova¹, Aleksei A. Kushnir¹, Pavel T. Sukhanov^{1✉}, Aleksei S. Saturov²

¹Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russian Federation,

pavel.suhanov@mail.ru ✉

²Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russian Federation

Abstract. Acrylate hydrogels, highly hydrated net structures, are promising materials used for the sorption of pollutants. They can effectively absorb water, and are characterised by high mechanical strength and chemical stability. Hydrogels based on copolymers of acrylamide and sodium/potassium acrylate (commercial samples Agrikola (China) and Schastlivyi Dachnik (Russian Federation)) and graft copolymers of chitosan, acrylic acid, and acrylamide were used for the sorption of nitrite ions from aqueous solutions. The concentration of nitrite ions was determined photometrically using the Griess test. The following conditions for the sorption of nitrite

ions were determined: pH 4 (the recovery rate depends on the surface charge of the adsorbent and sorbate), and the phase contact time was 160 minutes, during which the maximum adsorption capacity was 19.2-114.9 mg/g depending on the nature of the sorbent. The dependence of the sorption rate of nitrite ions on the phase contact time was approximated by pseudo-first and pseudo-second order models. The pseudo-second-order model better describes the sorption kinetics ($r^2 = 0.981-0.993$) and allowed us to assume that the process has a chemisorption mechanism (ion exchange). Sorption isotherms were approximated using the Langmuir, Freundlich, and Dubinin-Radushkevich models. According to IUPAC, they belong to the first type. Based on the analysis of Langmuir isotherms ($r^2 = 0.978-0.995$) we came to the conclusion that nitrite ions are distributed in the system aqueous solution/hydrogel due to the sorption on independent active centres of copolymers. The limiting adsorption of nitrite ions can depend on the structure of the polymer framework of sorbents, which in turn is determined by the synthesis method and the nature of polar groups.

Keywords: hydrogels, acrylamide, sodium acrylate, potassium acrylate, sorption, nitrite ions.

For citation: Maslova N.V., Kushnir A.A., Sukhanov P.T., Saturov A.S. Sorption of nitrite ions from aqueous solutions by acrylate hydrogels. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2024. 24(4): 470-480. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12404>

Введение

Интенсивное развитие современных технологий и промышленных процессов сопровождается высоким уровнем загрязнения окружающей среды различными химическими веществами (поллютантами). Присутствие в водных средах соединений азота (нитриты, нитраты, ионы аммония, азотсодержащие органические соединения) является экологической проблемой многих стран [1, 2].

Нитриты включены в группу 2 А классификации Международного агентства по изучению рака – International Agency for Research on Cancer [3], могут образовывать канцерогенные и мутагенные нитрозосоединения в пищевых продуктах или в пищеварительной системе человека, вызывают необратимые превращения гемоглобина в метгемоглобин (метгемоглобинемия), рак, поражение головного мозга и другие заболевания [4]. Нитриты могут поступать в водные объекты с промышленными и бытовыми отходами, продуктами жизнедеятельности животных, удобрениями, производственными и бытовыми сточными водами. При прохождении через почву растворы, содержащие соединения азота, попадают и накапливаются в подземных водах [5].

Для сорбции нитритов из водных сред применяют различные материалы (табл. 1), в том числе полученные из отходов сельскохозяйственных культур – стебли сахарного тростника и кукурузы, солома

пшеницы, стебли сои [6-8]). В качестве сорбентов эффективны также полимерные сорбенты, включающие магнитные наночастицы (НЧ) [9-10], и гидротальцит [11]. Для сорбции нитритов из питьевой воды применен полимерный сорбент, содержащий магнитные НЧ магнетита, покрытые 3-аминопропилтриэтоксисилоном и функционализированные органическими фрагментами, включающими порфириновый комплекс кобальта (III) [9]. Изучена сорбция нитратов и нитритов из модельных водных растворов углеродным материалом, полученным путем прокалывания при 400-1000°C стеблей сои, предварительно обработанных растворами CaCl_2 и HCl [8]. В табл. 1 также приведены условия сорбции нитритов, обеспечивающие их наиболее полное извлечение из водных растворов, и соответствующие значения предельной сорбции (q^{max}).

Для извлечения нитрит-ионов из водных сред целесообразно разрабатывать новые высокоэффективные и экологически безопасные способы сорбции. Перспективными материалами, применяемыми для сорбции нитрит-ионов, являются акрилатные гидрогели. Они представляют собой высокогидратированные сетчатые структуры, полученные из природных, синтетических или полусинтетических полимеров, которые физически или ковалентно сшиты. Такие гели обладают высокой способностью поглощать

воду (без разрушения собственной структуры), механической прочностью и химической стабильностью [12]. Полиакрилаты нашли применение в качестве систем локальной (адресной) доставки лекарств [12] и сорбентов для удаления поллютантов [13]; при производстве контактных линз [14], датчиков (сенсоров) [15], суперконденсаторов [16], биоматериалов (3D-культуры клеток) [17].

Полимеры на основе акриламида часто используются в качестве гидрогелей, т.к. они существенно изменяют объем при физическом и химическом воздействии на них. Однако, такие полимеры недостаточно гидrolитически стабильны. Это ограничение исключается при получении графт-сополимеров акрилатов калия или натрия с хитозаном (ХТ) [18]. Целью работы является изучение сорбции нитри-

тов и обоснование (выбор) условий их извлечения из водных сред акриловыми гидрогелями.

Экспериментальная часть

В работе исследовали гидрогели на основе сополимеров акриламида с акрилатом калия (АК) и натрия (СД) [19], а также графт-сополимеры ХТ, акриловой кислоты и акриламида, полученные в Воронежском государственном университете [20] с величиной влагопоглощения (степень набухания) для сорбентов АК и СД 1,2 – 84-123 г/г, для остальных (образцы СК 1-3) – 603-1147 г/г (табл. 2).

Изучение сорбции нитрит-ионов. Для изучения сорбции готовили серию стандартных растворов с применением стандартного образца раствора нитрит-ионов (ГСО № 7479-98, 1 мг/см³, Primelab, РФ),

Таблица 1. Применение сорбентов различной природы для сорбции нитрит ионов из водных сред
 Table 1. The use of sorbents of various nature for the sorption of nitrite ions from aqueous media

Сорбент	Условия извлечения	R, %	q^{max} , мг/г	Литература
Стебли сахарного тростника / солома пшеницы	pH=5, $C_0 = 5$ мг/дм ³ , ДЗ = 5 г/дм ³ , $t = 90$ мин	90 / 63	–	[6]
Аминированный сорбент, полученный из стеблей кукурузы	pH = 5, $C_0 = 50$ ppm, ДЗ = 1 г/дм ³ , $t = 60$ мин	72	232.6	[7]
Уголь, полученный из стеблей сои	pH = 3, $C_0 = 50$ мг/дм ³ , ДЗ = 1 г/дм ³ , $t = 24$ ч	–	14.7	[8]
Магнитные НЧ, модифицированные полиионной жидкостью	pH=8, ДЗ = 1 г/дм ³ , $t = 10$ мин	93.4	3.9	[9]
Функционализированные магнитные НЧ	pH=5.5, $C_0 = 10$ мг/дм ³ , $m = 100$ мг, $t = 15$ мин	92	–	[10]
Гидротальцит	pH = 11.5, ДЗ = 1.5 г/дм ³ , $t = 18$ ч	–	37.2	[11]
Сорбент СК-2	pH = 4, ДЗ = 2 г/дм ³ , $t = 160$ мин	83	114.9	[Данная работа]

Примечание: ДЗ – доза сорбента (отношение массы сорбента к объему раствора сорбата).

Таблица 2. Гидрогели, примененные в качестве сорбентов нитрит-ионов из водных растворов
 Table 2. Hydrogels used as sorbents for nitrite ions in aqueous solutions.

Сорбент	Состав	Величина влагопоглощения (степень набухания), г/г	Температура*
АК	Сополимер акриламида с акрилатом калия: диаметр гранул 2-3 мм, Агрикола (Китай)	113	[19]
СД	Сополимер акриламида с акрилатом натрия: диаметр гранул 1-4 мм, Счастливый дачник (РФ)	84	
СК-1	Хитозан (1.0 г) : акриловая кислота, акриламид в мольном соотношении 0.1:0.9	689-852	[20]
СК-2	Хитозан (1.0 г) : акриловая кислота, акриламид в мольном соотношении 0.5:0.5	953-1147	
СК-3	Хитозан (1.0 г) : акриловая кислота, акриламид в мольном соотношении 0.9:0.1	603-759	

Примечание: * – в работах приведена подробная информация о синтезе образцов и их влагопоглощении.

с содержанием определяемого компонента (c_0) 20-500 мг/дм³. Для приготовления растворов использовали деионизированную воду, полученную с помощью системы водоподготовки RiOs-DI (Merck Millipore, США). Навеску гидрогелей массой 0.1 г помещали в плоскодонные колбы вместимостью 100 см³, добавляли 50 см³ (V) раствора сорбата с известной концентрацией c_0 . Добавлением раствора HCl устанавливали pH 4 и далее перемешивали смесь верхнеприводной мешалкой MXB-S3500L (Тайвань) при 22±1°C до достижения сорбционного равновесия (160 мин). Гидрогель отделяли от раствора с помощью водоструйного насоса.

В полученном фильтрате (объем 5 см³) определяли нитрит-ионы по ПНД Ф 14.1:2:4.3-95 «Методика измерений массовой концентрации нитрит-ионов в питьевых, поверхностных и сточных водах фотометрическим методом с реактивом Грисса», основанной на реакции солей диазония, образующихся при взаимодействии нитритов и сульфаниловой кислоты, с 1-нафтиламином. Оптическую плотность растворов красно-фиолетового цвета измеряли на спектрофотометре

UNICO №1201 при 520 нм в кюветах с длиной поглощающего слоя 10 мм.

Для изучения влияния времени контакта фаз на сорбцию навеску сорбентов массой 0.1 г помещали в 50 см³ раствора нитрит-ионов ($c_0=0.2$ мг/дм³, pH=4). Выбор c_0 обусловлен рекомендацией ВОЗ по норме содержания нитритов в питьевой воде при длительном воздействии на организм [1]. Смесь перемешивали 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 130, 145, 160 и 170 мин. Через каждый интервал сорбент извлекали из раствора, определяли концентрацию сорбата (c_t) в фильтрате и далее по формуле (1) рассчитывали сорбционную емкость в момент времени q_t :

$$q_t = [(c_0 - c_t) \cdot V]/m, \quad (1)$$

где c_0 – концентрации нитрит ионов в исходном растворе до сорбции, мг/л; V – объем раствора нитрита натрия, см³; m – масса сорбента, г.

Изучение влияния pH. В плоскодонные колбы помещали 50 см³ растворов, содержащих нитрит-ионы ($c_0=0.2$ мг/дм³). Для варьирования pH от 2 до 11 в исследуемый раствор добавляли HCl (ГОСТ 14261-77, Камская химическая компания, РФ) или раствор NaOH (99% основного

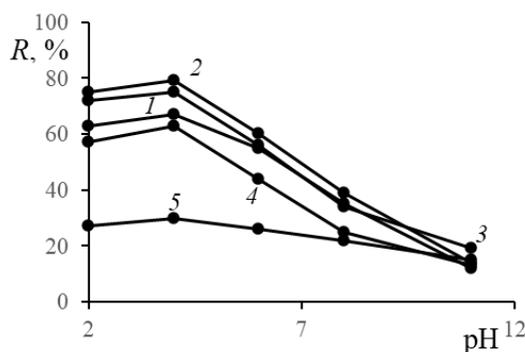


Рис. 1. Зависимость степени извлечения (R , %) нитрит-ионов от pH раствора при сорбции гидрогелями: 1 – СК-1, 2 – СК-2, 3 – СК-3, 4 – АК, 5 – СД

Fig. 1. Dependence of the recovery rate (R , %) of nitrite ions on the pH of the solution during sorption by hydrogels: 1 – SK-1, 2 – SK-2, 3 – SK-3, 4 – AK, 5 – SD

вещества, Ленреактив, РФ). После вносили 0.1 г сорбента и перемешивали 160 мин с применением верхнеприводной мешалки.

По полученным экспериментальным данным рассчитывали количественные характеристики сорбции нитрит-ионов в статических условиях. Степень извлечения (R , %) и сорбционную емкость (q_e , мг/г) вычисляли по уравнениям (2, 3):

$$R = 100 \cdot (c_0 - c_e) / c_0, \quad (2)$$

$$q_e = [(c_0 - c_e) \cdot V] / m, \quad (3)$$

где c_0 и c_e – концентрации нитрит-ионов в исходном растворе до и после сорбции соответственно, мг/дм³; V – объем раствора нитрита натрия, см³; m – масса сорбента, г.

Обсуждение результатов

Влияние pH раствора. pH является одним из наиболее важных факторов, влияющих на процесс сорбции. Степень извлечения сорбата максимальна при pH 2-4 (рис. 1). В этом интервале pH поверхность изученных полимеров положительно заряжена. При этом положительный заряд поверхности полимеров СК-1, 2, 3 обусловлен присутствием в ХТ групп $-\text{OH}_2^+$ и $-\text{NH}_3^+$ за счет ХТ [21]. Сорбция обусловлена электростатическим взаимодействием положительно заряженных функциональных групп гидрогелей с отрицательно заряженными ионами сорбата. При $\text{pH} > 4$ происходит ионизация

карбоксилатных групп, степень извлечения снижается, т.к. отрицательно заряженные группы $-\text{COO}^-$ и NO_2^- отталкиваются [22, 23].

Кинетика сорбции. Степени извлечения нитрит-ионов в течение 90 мин интенсивно возрастают (до 23-61%), затем плавно увеличиваются и достигают постоянной величины за 160 мин не зависимо от применяемого сорбента. После 175 мин степени извлечения практически не изменяются (рис. 2а). Высокая первоначальная скорость сорбции обусловлена электростатическим взаимодействием карбоксилатных групп гидрогелей и нитрит-ионов [24], а также обилием незанятых мест на поверхности сорбента, доступных для быстрого взаимодействия с нитрит-ионами [21]. Интегральные кинетические кривые сорбции (рис. 2б) аппроксимировали с использованием кинетических моделей псевдо-первого [уравнение Лагергрена(4)] и псевдо-второго порядков (5) [25]:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - K_1 t, \quad (4)$$

$$t/q_t = 1/K_2 q_e^2 + t/q_e, \quad (5)$$

где q_t – сорбционная емкость в момент времени t , мг/г, рассчитанная по формуле (1); q_e – сорбционная емкость в равновесном состоянии, мг/г, полученная линеаризацией уравнений (4, 5); K_1 – кинетическая постоянная псевдо-первого порядка (1/мин), K_2 – кинетическая постоянная псевдо-второго порядка, г/мг мин.

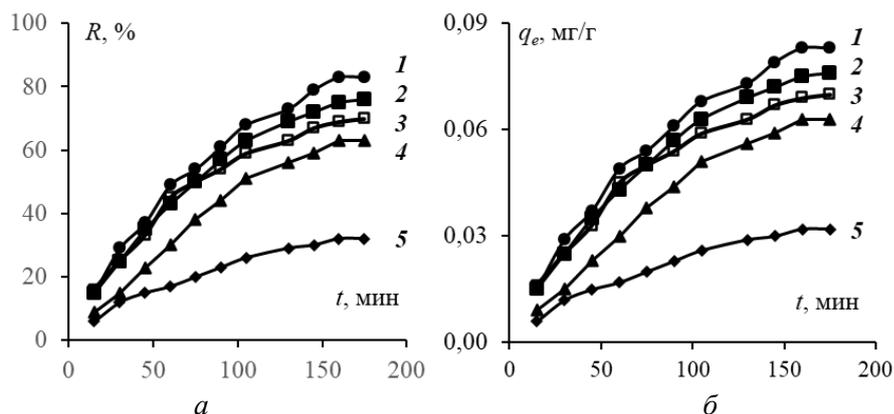


Рис. 2. Влияние времени контакта фаз (t , мин) на (а) степень извлечения и (б) сорбционную емкость (интегральные кинетические кривые) нитрит-ионов при сорбции гидрогелями: 1 – СК-2, 2 – СК-3, 3 – СК-1, 4 – АК, 5 – СД

Fig. 2. Effect of the phase contact time (t , min) on (a) the recovery rate and (b) the sorption capacity (integral kinetic curves) of nitrite ions adsorbed by hydrogels: 1 – SK-2, 2 – SK-3, 3 – SK-1, 4 – AK, 5 – SD

Таблица 3. Параметры кинетических моделей сорбции нитрит-ионов гидрогелями
 Table 3. Parameters of kinetic models of sorption of nitrite ions by hydrogels.

Сорбент	Модель псевдо-первого порядка			Модель псевдо-второго порядка			q_e^* , мг/г
	K_1 , 1/мин	q_e , мг/г	r^2	K_2 , г/мг мин	q_e , мг/г	r^2	
СК-1	0.0163	0.981	0.883	0.257	0.043	0.992	0.070
СК-2	0.0168	0.968	0.937	0.136	0.058	0.991	0.083
СК-3	0.0172	0.976	0.956	0.159	0.052	0.993	0.076
СД	0.0213	0.970	0.904	0.371	0.022	0.981	0.032
АК	0.0182	0.980	0.951	0.099	0.054	0.992	0.063

Примечание: q_e^* рассчитывали по уравнению (3) при условиях: $V = 50 \text{ см}^3$, $\text{pH} = 4$, $m = 0.1 \text{ г}$, $c_0 = 0.2 \text{ мг/дм}^3$, $t = 160 \text{ мин}$

Из полученных результатов (табл. 3) можно сделать вывод: кинетика процесса сорбции лучше аппроксимируется моделью псевдо-второго порядка, так как коэффициент корреляции r^2 более близок к 1 и расчетное (теоретическое) значение сорбционной емкости q_e близко к экспериментальному значению q_e^* , поэтому процесс может иметь хемосорбционный механизм (ионный обмен) [26, 27]. Аналогичный механизм установлен при сорбции ионов аммония полимерными сетчатыми гидрогелями на основе альгината натрия-g-поли(акрилат натрия) [24].

При выбранных значениях pH и времени установления сорбционного равновесия получены изотермы сорбции (рис. 3), принадлежащие по классификации

ИЮПАК к изотермам 1-типа, локализованной обратимой сорбции на активных энергетически однородных центрах. По мере увеличения концентрации нитрит-иона сорбция достигает насыщения и выходит на плато, при этом поверхность сорбентов насыщается сорбатом при концентрациях до 50 мг/дм^3 , что обусловлено высоким сродством сорбата к исследуемым сополимерам [28].

Для установления механизма сорбции нитрит-ионов акрилатными гидрогелями применяли модели Ленгмюра, Фрейндлиха и Дубинина-Радушкевича. Параметры уравнений Ленгмюра (q^{max} – максимальная или предельная сорбционная емкость сорбента, K_L – постоянная Ленгмюра), Фрейндлиха ($1/n$ – коэффициент неоднородности, K_F – постоянная

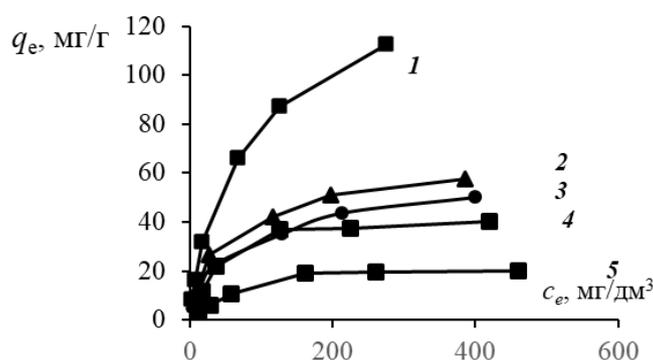


Рис. 3. Изотермы сорбции нитрит-ионов из водных сред акрилатными гидрогелями:
 1 – СК-2, 2 – СК-3, 3 – СК-1, 4 – АК, 5 – СД
 Fig. 3. Sorption of nitrite ions from aqueous solutions by acrylate hydrogels:
 1 – SK-2, 2 – SK-3, 3 – SK-1, 4 – AK, 5 – SD

Таблица 4. Параметры уравнений Ленгмюра, Фрейндлиха и Дубинина-Радушкевича при сорбции нитрит-ионов акрилатными гидрогелями.

Table 4. Parameters of Langmuir, Freundlich, and Dubinin-Radushkevich isotherms for the sorption of nitrite ions by acrylate hydrogels

Сорбент	Модель								
	Ленгмюра			Фрейндлиха			Дубинина-Радушкевича		
	q_{\max} (мг/г)	K_L	r^2	n	K_F	r^2	$K \cdot 10^{-6}$ (моль ² /кДж ²)	E (кДж/моль)	r^2
СК-1	50.4	0.028	0.993	0.493	3.49	0.959	5.47	9.55	0.986
СК-2	114.9	0.022	0.994	0.629	4.56	0.986	6.16	9.02	0.990
СК-3	59.5	0.026	0.994	0.570	3.73	0.951	5.40	9.57	0.963
СД	19.2	0.046	0.978	0.451	1.86	0.919	6.62	8.69	0.951
АК	44.1	0.033	0.995	0.489	3.27	0.937	5.61	9.43	0.958

Фрейндлиха) и Дубинина-Радушкевича (E – энергия сорбции, k – константа, связанная с энергией сорбции) получали линеаризацией экспериментальных зависимостей в обратных или логарифмических координатах [25, 29]. Наибольшие коэффициенты корреляции (табл. 4) установлены при представлении изотермы сорбции в координатах уравнения Ленгмюра, т.е. распределение нитрит-ионов в системе водный раствор – гидрогель основан на монослойной сорбции на активных центрах сополимеров. При этом на одном активном центре может сорбироваться один нитрит-ион. Такой механизм согласуется с предполагаемым электростатическим взаимодействием между группами сорбента и сорбата [30].

Параметры уравнения Ленгмюра применены для расчета предельной сорбции q_{\max} (табл. 4). Сорбция нитрит-ионов уменьшается в ряду: СК-2 > СК-3 > СК-1 > АК > СД (табл. 4). Предельная адсорбция нитрит-ионов на СК-2 более чем в 10 раз больше по сравнению с угольными, глинистыми и магнитными сорбентами (табл. 1).

Введение в структуру полимеров ХТ увеличивает предельную сорбцию по сравнению с акрилатными гидрогелями СД и АК [21]. Различное сорбционное поведение графт-сополимеров (СК) в ряду СК-2 > СК-3 > СК-1 может быть обусловлено особенностями строения объемного полимерного каркаса и соотношением компонентов в предполимеризационной смеси при синтезе графт-сополимеров



(табл. 2). Так, эффективность сорбции нитрит-ионов образцами СК возрастет по мере увеличения содержания акриловой кислоты в предполимеризационной смеси, что связано с увеличением количества отрицательно заряженных ионизированных карбоновых групп в образующейся полимерной сетке. В результате возрастает электростатическое отталкивание частиц, а доступность сорбционно-активных центров сорбента возрастает. Несмотря на меньшее количество в предполимеризационной смеси акриловой кислоты в образце СК-2 значения q^{\max} более чем в 1.9 раза больше по сравнению с СК-1 и СК-3. Это может быть обусловлено меньшим количеством сшивающего агента, применяемого при синтезе образца [20], так как при увеличении его количества возрастает плотность поперечных сшивок и уменьшается стерическая доступность активных сорбционных центров [31].

Согласно модели Фрейндлиха интенсивность взаимодействия сорбент-сорбат может определяться коэффициентом неоднородности поверхности $1/n$ [25]: если $n > 1$, то сорбция является физическим процессом, $n < 1$ – химическим [32]. Для всех изученных гидрогелей $n < 0.629$ (таб. 4), можно предположить, что процесс сорбции нитрит-ионов – химический.

Изотерма Дубинина-Радушкевича широко применяется для определения типа процесса сорбции (физический, химический). Оценка характера сорбции основана на расчетном значении параметра E , характеристической энергии сорбции.

Список литературы/References

1. Yang H., Cheng H. Controlling nitrite level in drinking water by chlorination and chloramination. *Sep. Purif. Technol.* 2007; 56: 392-396. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.05.036>

2. Picetti R., Deeney M., Pastorino S., Miller M.R., Shah A., Leon D.A., Dangour A.D., Green R. Nitrate and nitrite contamination in drinking water and cancer risk: A

Так как E находится в пределах от 8 до 16 кДж/моль (табл. 4), следовательно, также можно сделать вывод о химической сорбции [26].

Заключение

Изучена сорбция из водных растворов нитрит-ионов акрилатными гидрогелями (сополимеры акриламида с акрилатом калия или натрия), получаемыми в промышленных условиях, и графт-сополимеров (на основе хитозана, акриловой кислоты и акриламида), синтезированных в лабораторных условиях. Установлены условия сорбции нитрит-ионов: pH 4 (степень извлечения зависит от заряда поверхности сорбента и сорбата), время контакта фаз – 160 мин, при которых в зависимости от природы сорбента предельная сорбция составляет 19.2-114.9 мг/г.

На основании изучения кинетики сорбционного процесса и анализа изотерм сорбции моделями Ленгмюра, Фрейндлиха и Дубинина-Радушкевича установлено, что процесс может иметь хемосорбционный механизм, обусловленный электростатическим взаимодействием между группами сорбента и сорбата.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

systematic review with meta-analysis. *Environ. Res.* 2022; 210: 112988. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112988>

3. Basaran B., Abanoz Y.Y., Şenol N.D., Oral Z.F.Y., Öztürk K., Kaban G. The levels of heavy metal, acrylamide, nitrate, nitrite, N-nitrosamine compounds in brewed black tea and health risk assessment: Türkiye. *J. Food Compost. Anal.* 2023; 120: 105285. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105285>



4. Yuan J., Yin H., Jin X., Zhao D., Liu Y., Du A., Liu X., O'Mullane A.P. A practical FeP nano arrayselectrocatalyst for efficient catalytic reduction of nitrite ions in wastewater to ammonia. *Appl. Catal. B.* 2023; 325: 122353. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2022.122353>
5. BadeeNezhad A., Emamjomeh M.M., Farzadkia M., JonidiJafari A., Sayadi M., Davoudian Talab A.H. Nitrite and nitrate concentrations in the drinking groundwater of Shiraz City, South-central Iran by statistical models. *Iran. J. Public. Health.* 2017; 46(9): 1275-1284.
6. Diriba D., Hussen A., Rao V.M. Removal of Nitrite from aqueous solution using sugarcane Bagasse and Wheat Straw. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 2014; 93(1): 126-131. <https://doi.org/10.1007/s00128-014-1297-3>
7. Homagai P.L., Poudel R., Paudyal H., Ghimire K.N., Bhattarai A. Adsorption of nitrate and nitrite anion by modified maize stalks from aqueous solutions. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2023; 30(19): 54682-54693. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26179-y>
8. Ogata F., Imai D., Kawasaki N. Adsorption of nitrate and nitrite ions onto carbonaceous material produced from soybean in a binary solution system. *J. Environ. Chem. Eng.* 2015; 3(1): 155-161. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.11.025>
9. Fateme A., Soleimani M., Dargahi M. Investigation of kinetic and isotherm models for the removal of nitrate and nitrite ions on MNPs@PIL adsorbent from aqueous solution. *Russ. J. Phys. Chem.* 2020; 94(13): 2829-2835. <https://doi.org/10.1134/s0036024420130026>
10. Poursaberi T., Ghadernia S., Hassanisadi M., Torkestani K., Mirrahimi M. Efficient separation of nitrite from aqueous solutions by grafting metalloporphyrin on Fe₃O₄ nanoparticles. *J. Iran. Chem. Soc.* 2012; 10(1): 13-20. <https://doi.org/10.1007/s13738-012-0123-2>
11. Wan D., Liu H., Liu R., Qu J., Li S., Zhang J. Adsorption of nitrate and nitrite from aqueous solution onto calcined (Mg-Al) hydrotalcite of different Mg/Al ratio. *Chem. Eng. J.* 2012; 195-196: 241-247. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.04.088>
12. Vigata M., Meinert C., Hutmacher D.W., Bock N. Hydrogels as drug delivery systems: a review of current characterization and evaluation techniques. *Pharmaceutics.* 2020; 12(12): 1188. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics12121188>
13. Rakhmetullayeva R.K., Abutalip M., UrkimbayevaZh.R., Kanzhigitova, D. K., Mangazbayeva R.A., Naushabayev A.K., Sarova N.B., Mukatayeva Zh.S., Zhigerbayeva G.N. Complex of hydrogels based on acrylic acid and methyl acrylate with copper ions. *Mater. Today. Proc.* 2022; 71: 38-45. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.246>
14. Shi X., Cantu-Crouch D., Sharma V., Pruitt J., Yao G., Fukazawa K., Wu J.Y., Ishihara K. Surface characterization of a silicone hydrogel contact lens having bioinspired 2-methacryloyloxyethyl phosphorylcholine polymer layer in hydrated state. *Colloids Surf. B.* 2021; 199: 111539. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2020.111539>
15. Buenger D., Topuz F., Groll J. Hydrogels in sensing applications. *Prog. Polym. Sci.* 2012; 37(12): 1678-1719. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.09.001>
16. Cao X., Jiang C., Sun N., Tan D., Li Q., Bi S., Song J. Recent progress in multifunctional hydrogel-based supercapacitors. *J. Sci. Adv. Mater. Dev.* 2021; 6(3):338-350. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2021.06.002>
17. Khan A.H., Cook J.K., Wortmann W.J., Kersker N.D., Rao A., Pojman J. A., Melvin A.T. Synthesis and characterization of thiol-acrylate hydrogels using a base-catalyzed Michael addition for 3D cell culture applications. *J. Biomed. Mater. Res. Part B Appl. Biomater.* 2020; 108(5): 2294-2307. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.34565>
18. Sennakesavan G., Mostakhdemin M., Dkhar L.K., Seyfoddin A., Fatihhi S.J. Acrylic acid/acrylamide based hydrogels and its properties - A review. *Polym. Degrad. Stab.* 2020; 180: 109308.



<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109308>

19. Maslova N.V., Kochetova Zh.Yu., Sukhanov P.T., Zmeev A.V. Investigation of the kinetics of hydrogel swelling based on acrylamide copolymers and potassium (sodium) acrylate. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022; 65(3): 27-34 (in Russian). <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20226503.6498>

20. Karmanova O.V., Tikhomirov S.G., Popov V.N., Lavlinskaya M.S., Sorokin A.V., Sukhanov P.T. A method for producing a composite superabsorbent polymer based on chitosan with improved moisture absorption capacity (in Russian). <https://patentimages.storage.googleapis.com/0f/ed/aa/d31021f38cd58d/RU2763736C1.pdf> (accessed 12.1.2023)

21. AL Samman M.T., Sánchez J. Chitosan- and alginate-based hydrogels for the adsorption of anionic and cationic dyes from water. *Polymers*. 2022; 14(8):1498. <https://doi.org/10.3390/polym14081498>

22. Kenawy E.-R., Elnaby H.H., Azaam M.M. Synthesis of superabsorbent composite based on chitosan-g-poly(acrylamide)/attapulgate. *Polym. Bull.* 2023. <https://doi.org/10.1007/s00289-023-04877-4>

23. Safari J.B., Bapolisi A.M., Krause R.W.M. Development of pH-sensitive chitosan-g-poly(acrylamide-co-acrylic acid) hydrogel for controlled drug delivery of tenofovir disoproxil fumarate. *Polymers*. 2021; 13(20): 3571. <https://doi.org/10.3390/polym13203571>

24. Li I.-C., Chen Y.-H., Chen Y.-C. Sodium alginate-g-poly(sodium acrylate) hydrogel for the adsorption-desorption of ammonium nitrogen from aqueous solution. *J. Water Process. Eng.* 2022; 49: 102999. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102999>

25. Kazimirova K.O., Shtykov S.N. Sorption and concentration anionic azo dyes on nanomagnetite modified with cationic polyelectrolytes. *Sorbtsionnye khromatograficheskie protsessy*. 2023; 23(6): 980-992 (in

Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11859>

26. Ho Y.S. Review of second-order models for adsorption systems. *J. Hazard. Mater.* 2006; 136(3): 681-689. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.12.043>

27. Sun Z.M., Qu X.S., Wang G.F., Zheng S.L., Frost R.L. Removal characteristics of ammonium nitrogen from wastewater by modified Ca-bentonites. *Appl. Clay Sci.* 2015; 107: 46-51. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.02.003>

28. Sukhanov P.T., Kushnir A.A. Adsorption of nitrophenols from aqueous media by N-vinylpyrrolidone-based polymeric adsorbents. *Moscow Univ. Chem. Bull.* 2019; 74: 88-92. <https://doi.org/10.3103/S0027131419020081>

29. Eyubova E.J., Nagiev K.J., Chiragov F.M. Equilibrium and kinetic studies of sorption of Fe(III) ions on R-modified sorbent with CSMA. *Sorbtsionnye i Khromatograficheskie Protsessy*. 2023; 23(6): 1094-1102 (in Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11870>

30. Kushnir A.A., Gubin A.S., Sukhanov P.T., Sizo K.O. Sorption of nootropics from aqueous media with activated carbon Norit®PK 1-3. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2023; 23(1): 129-137 (in Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11000>

31. Sorokin A., Lavlinskaya M. Synthesis of the superabsorbents enriched in chitosan derivatives with excellent water absorption properties. *Polym. Bull.* 2022; 79: 407-427. <https://doi.org/10.1007/s00289-020-03521-9>

32. Al-Ghouti M.A., Al-Absi R.S. Mechanistic understanding of the adsorption and thermodynamic aspects of cationic methylene blue dye onto cellulosic olive stones biomass from wastewater. *Sci. Rep.* 2020; 10: 5928. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72996-3>



Информация об авторах / Information about the authors

Н.В. Маслова – к.х.н., преподаватель высшей категории, председатель цикловой комиссии факультета среднего профессионального образования, цикловой комиссии «Химических технологий и управления в технических системах», ВГУИТ, Воронеж, Россия

А.А. Кушнир – к.х.н., доцент кафедры промышленной экологии и техносферной безопасности, ВГУИТ, Воронеж, Россия

П.Т. Суханов – д.х.н., профессор кафедры физической и аналитической химии, ВГУИТ, Воронеж, Россия

А.С. Сатуров – магистрант кафедры вычислительной техники и информационных систем, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия

N.V. Maslova – Ph.D., Faculty of Secondary Vocational Education, Cycle Commission "Chemistry of technologies and management in technical systems" VSUIT, Voronezh, Russian Federation, e-mail: maslovanatvl@mail.ru

A.A. Kushnir – Ph.D., Associate Professor of the Department of Industrial Ecology and Technosphere Safety, VSUIT, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kushnir_aleksei@mail.ru

P.T. Sukhanov – professor, doctor of science (chemistry), Department of Physical and Analytical Chemistry, VSUIT, Voronezh, Russian Federation, e-mail: pavel.suhanov@mail.ru

Saturov Aleksei S. – undergraduate student, Department of Computer Engineering and Information Systems, Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia, e-mail: alex7704@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16.04.2024; одобрена после рецензирования 26.06.2024; принята к публикации 03.07.2024.

The article was submitted 16.04.2024; approved after reviewing 26.06.2024; accepted for publication 03.07.2024.