Сорбционные и хроматографические процессы. 2026. Т. 26, № 2. С. 375-385.
Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy. 2026. Vol. 26, No 2. pp. 375-385.

ISSN 1680-0613

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья
УДК 544.773.432
doi: 10.17308/sorpchrom.2026.26/14185

Сорбция нестероидных противовоспалительных средств из водных сред алюмосиликатными керамическими микросферами

Алексей Алексеевич Кушнир[1], Александр Сергеевич Губин[1], Ксения Сергеевна Сыпко[2], Алексей Алексеевич Шигида[1], Павел Тихонович Суханов[1]✉

[1]Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия, pavel.suhanov@mail.ru✉
[2]Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия

Аннотация. Нестероидные противовоспалительные средства (НПВС) наряду с противогрибковыми, противоэпилептическими препаратами, половыми гормонами, бета-блокаторами – наиболее распространенные фармацевтические препараты, которые часто попадают в различные водоёмы через производственные стоки из-за нерационального использования и неправильной утилизации. Наиболее распространённые НПВС, применяемые потребителями: ибупрофен (ИБ), немисулид (НМ), диклофенак (ДК), кетопрофен (КТ) и пироксикам (ПК). Цель работы – изучение сорбции НПВС из водных сред с помощью алюмосиликатных микросфер, в том числе установление условий сорбции (pH, масса сорбента, время достижения сорбционного равновесия). В качестве сорбента выбраны алюмосиликатные керамические микросферы (ценосферы) производства ИНОТЕК (Россия).
Эффективность сорбции НПВС, различающихся по строению и по pKa, зависит от pH раствора. Степень извлечения ДК, ИБ, КТ максимальна при pH 1-2. Более сложное влияние pH оказывает на сорбцию ПК: при pH 1-2 он присутствует в растворе в катионной форме, затем при pH 3-6 ее содержание уменьшается, – в растворе присутствуют смесь нейтральной, катионной, анионной форм.
Важным параметром, влияющим на эффективность сорбции, является соотношение объема раствора сорбата и массы сорбента. При сорбции из раствора объемом 10 см^3 степень извлечения возрастает в интервале масс сорбента от 5 до 15 мг на 40-94%, в интервале 20-40 мг увеличивается лишь на 1-2%.
С увеличением времени контакта фаз от 0 до 45 мин эффективность сорбции плавно возрастает с 15-20% (10 мин) до 40-69% (45 мин). Кривая выходит на плато за 45-90 мин. При дальнейшем увеличении времени контакта фаз (120 мин) степень извлечения НПВС возрастает на 1-3%. Для описания кинетики сорбции применима модель псевдовторого порядка (R^2 = 0.951-0.981).
Ключевые слова: сорбция, алюмосиликатные керамические микросферы, ценосферы, нестероидные противовоспалительные средства, ибупрофен, немисулид, диклофенак, кетопрофен, пироксикам.
Для цитирования: Кушнир А.А., Губин А.С., Сыпко К.С., Шигида А.А., Суханов П.Т. Сорбция нестероидных противовоспалительных средств из водных сред алюмосиликатными керамическими микросферами // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2026. Т. 26, № 2. С. 375-385. https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2026.26/14185

Original article

Sorption of nonsteroidal anti-inflammatory drugs from aqueous media by aluminosilicate ceramic microspheres

Alexey A. Kushnir[1], Alexander S. Gubin[1], Kseniya S. Sypko[2], Alexey A. Shigida[1], Pavel T. Sukhanov[1]✉

[1]Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russian Federation, pavel.suhanov@mail.ru✉
[2]North Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation

© Кушнир А. А., Губин А. С., Сыпко К. С., Шигида А. А., Суханов П. Т., 2026

Сорбционные и хроматографические процессы. 2026. Т. 26, № 2. С. 375-385.
Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy. 2026. Vol. 26, No 2. pp. 375-385.

ISSN 1680-0613

Abstract. Nonsteroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs), along with antifungal, antiepileptic drugs, sex hormones, and beta-blockers, are the most common pharmaceutical preparations that often enter various water bodies through industrial wastewater due to irrational use and improper disposal. The most common NSAIDs used by consumers are ibuprofen (IB), nimesulide (NM), diclofenac (DC), ketoprofen (KT), and piroxicam (PC). The aim of the study is to investigate the sorption of NPVS from aqueous media using aluminosilicate microspheres, including selection of sorption conditions (pH, sorbent mass, time of sorption). Aluminosilicate ceramic microspheres (cenospheres) from INOTEK Holding (Russia) were selected as the sorbent.

The efficiency of NSAID sorption, which differs in structure and pKa, depends on the pH of the solution. The extraction degree of DC, IB, and KT decreases with increasing pH, reaching a maximum at pH 1-2, i.e., at values above pK_a. pH has a more complex effect on PC sorption: at pH 1-2 it is present in the solution in cationic form, then at pH 3-6 its content decreases, and a mixture of neutral, cationic, and anionic forms is present in the solution.

An important parameter affecting sorption efficiency is the ratio of the sorbate solution volume to the sorbent mass. During sorption from a solution volume of 10 cm^3, the extraction degree increases in the sorbent mass range from 5 to 15 mg by 40-94%, while in the range of 20-40 mg it increases by only 1-2%.

With increasing phase contact time from 0 to 45 min, sorption efficiency smoothly increases from 15-20% (10 min) to 40-69% (45 min). The curve reaches a plateau at 45-90 min. With further increase in phase contact time (120 min), the NSAID extraction degree increases by 1-3%. The pseudo-second-order model is applicable for describing the sorption kinetics (R^2 = 0.951-0.981).

Keywords: sorption, aluminosilicate ceramic microspheres, cenospheres, nonsteroidal anti-inflammatory drugs, ibuprofen, nimesulide, diclofenac

For citation: Kushnir A.A., Gubin A.S., Sypko K.S., Shigida A.A., Sukhanov P.T. Sorption of nonsteroidal anti-inflammatory drugs from aqueous media by aluminosilicate ceramic microspheres. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2026. 26(2): 375-385. (In Russ.). https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2026.26/14185

Введение

В последнее время наличие остатков (отходов) фармацевтических препаратов в водных объектах беспокоит многих исследователей. Фармацевтические отходы классифицируются как новые загрязняющие вещества (*emerging contaminant*) трудно поддающиеся очистке, биоразложению и удалению с помощью традиционных методов [1].

Нестероидные противовоспалительные средства (НПВС) наряду с противогрибковыми, противоэпилептическими препаратами, половыми гормонами, бета-блокаторами – наиболее распространенные фармацевтические препараты, которые часто попадают в водоёмы через производственные стоки и в результате неправильной утилизации [2]. Кроме этого, они попадают в водоемы с выделениями человека, животных и представляют серьезную угрозу для экосистем [3].

Наиболее распространённые НПВС, применяемые потребителями: ибупрофен (ИБ), немисулид (НМ), диклофенак (ДК), кетопрофен (КТ) и пироксикам (ПК) [4]. Они обычно назначаются в виде таблеток или гелей для уменьшения воспаления в суставах, сухожилиях и костях, снижения температуры [5].

Для концентрирования НПВС применяют активные угли, биоугли, полученные из натуральных природных материалов и отходов сельского хозяйства, материалы на основе графена, карбоксилированных и некарбоксилированных многослойных углеродных нанотрубок [6-10]. Также для извлечения НПВС используются органические каркасные структуры и полые кремниевые материалы [11-14] (табл. 1).

Для извлечения НПВС из водных сред целесообразно разрабатывать новые высокоэффективные и экологически безопасные способы сорбции. Такими перспективными материалами могут быть алюмосиликатные керамические микросферы (ценосферы), которые образуются в составе летучей золы при высокотемпературном факельном сжигании угля [15].

Таблица 1. Сорбция нестероидных противовоспалительных средств сорбентами различной природы (*Q* – предельная сорбция, *R* – степень извлечения)
Table 1. Sorption of nonsteroidal anti-inflammatory drugs by sorbents of various origin (Q – sorption capacity, R – recoveries).

Сорбат	Сорбент	*Q*, мг/г	*R, %*	Литература
ИБ	Металлоорганические каркасные структуры MIL-100(Fe), ZIF-8 и UiO-66	152.4	–	[7]
ДК	Ионно-ковалентные органические каркасные структуры	371.2	–	[8]
ИБ	Активированный уголь, полученный из отходов мурумуру	2.2	70	[9]
ИБ КТ ДК	Пенокарбид кремния	4199 нг/г 730 нг/г 882 нг//г	–	[10]
ДК	Активированный уголь, полученный из соевой шелухи	98.8		[11]
ДК ИБ	Активированный уголь, полученный из луковой шелухи	–	81.9 65.9	[12]
НМ	Материал на основе аэрогеля	109.9		[13]
ДК, ИБ, КТ, НМ, ПК	Алюмосиликатные микросферы (ценосферы)	–	48-94	[данная работа]

Эти материалы, например, применяются для сорбции из водных сред фторидов [16], кадмия [17], элементарной ртути [18], а также для устранения разливов нефти на море [19] и удаления органических фотокатализаторов [20].

Цель работы – изучение сорбции алюмосиликатными микросферами нестероидных противовоспалительных средств из водных сред, установление условий сорбции, обеспечивающих максимальную эффективность извлечения.

Экспериментальная часть

Приборы, реактивы и материалы. При проведении эксперимента применяли ДК, ИБ, КТ, НМ и ПК производства Sigma Aldrich, США с содержанием основного вещества не менее 97 мас.%.

В работе использовали деионизированную воду (CAS 7732-18-5, ELCCOM, РФ). Для сорбции применяли алюмосиликатные керамические микросферы (ценосферы) производства ИНОТЕК (РФ). По данным производителя [15] насыпная плотность образца – 230-450 кг/м^3, химический состав, %: SiO_2 – 52-64, Al_2O_3 – 18-39, Fe_2O_3 – 1-10.

Удельную площадь поверхности ценосфер $S_{уд}$ (м^2/г) устанавливали методом БЭТ на анализаторе TRISTAR II 3020 (Micromeritics, США), поверхностные и объемные свойства ценосфер, устанавливали методом низкотемпературной адсорбции/десорбции N_2. Размер частиц оценивали на сканирующем электронном микроскопе JSM-6510LV (Jeol, Япония). В результате, установлены следующие характеристики сорбента: $S_{уд}$ – 1.2 м^2/г, объем пор –0.0922 см^3/г, средний диаметр пор – 47 Å, средний размер частиц – 153±36 мкм. Микрофотография образца приведена на рис. 1.

Изучение сорбции НПВС в статических условиях. Навеску сорбентов массой 0.015 г помещали в термостатируемые сосуды, добавляли 30 см^3 (V) раствора исследуемого вещества с начальной концентрацией 0.1 мг/см^3 (C_0) и перемешивали до установления сорбционного

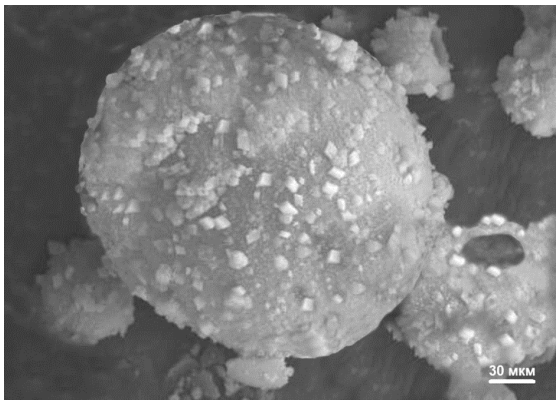


Рис. 1. Микрофотография образца ценосфер
Fig. 1. Micrograph for the cenosphere sample

Таблица 2. Физико-химические свойства НПВС [показатель кислотности, pK_a; параметр гидрофобности, logP] и длины волн при их спектрофотометрическом определениив.
Table 2. Physicochemical properties of NSAIDs [acidity index, pKa; hydrophobicity parameter, logP] and wavelengths for spectrophotometric determination

Сорбат	pKa	logP	Длина волны, нм
ДК	3.99	4.51	272
ИБ	4.45	3.97	264
КТ	3.98	3.12	257
ПМ	6.3	3.06	242
НМ	6.5	2.6	395

равновесия при 22±1°C. Далее сорбент отделяли фильтрованием («Синяя лента», ЗАО СоюзХимПром, Воронеж) и измеряли оптическую плотность каждого раствора НПВС на спектрофотометре Shimadzu UV mini-1240 при соответствующих длинах волн (табл. 2).

Для изучения влияния на сорбцию времени контакта фаз навеску сорбентов массой 0.015 г помещали в 30 $см^3$ раствора НПВС и перемешивали 5-120 мин. Через определенный интервал времени сорбент извлекали из раствора, определяли в фильтрате концентрацию сорбата (c_t) и далее рассчитывали сорбционную емкость в момент времени q_t:

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

где c_0 – концентрации НПВС в исходном растворе до сорбции, мг/$см^3$; V – объем раствора НПВС, $см^3$; m – масса сорбента, г.

Изучение влияния pH. В плоскодонные колбы помещали 30 $см^3$ растворов, содержащих НПВС. Для варьирования pH от 2 до 11 в исследуемый раствор добавляли HCl (ГОСТ 14261-77, Камская химическая компания, РФ) или раствор NaOH (99% основного вещества, Ленреактив, РФ). После вносили 0.015 г сорбента и перемешивали необходимое время с применением верхнеприводной мешалки.

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

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

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

где c_0 и c_e – концентрации НПВС в исходном растворе до и после сорбции соответственно, мг/$см^3$; V – объем раствора НПВС, $см^3$; m – масса сорбента, г.

Физико-химические свойства НПВС (табл. 2) – показатель кислотности (pK_a), параметр гидрофобности (logP), содержание форм сорбата (N, %) и их структурные формы в зависимости от pH раствора рассчитывали с помощью программы MarvinSketch вер. 22.6 (Chemaxon).

Обсуждение результатов

Влияние pH раствора на степень извлечения НПВС из водных сред. Эффективность сорбции НПВС, различающихся по строению и по pK_a (табл. 2), зависит от pH раствора. Степень извлечения ДК, ИБ, КТ максимальна при pH 1-2 (рис. 2). Такой эффект обусловлен тем, что в сильнокислой среде сорбаты на 98-99% в водном растворе присутствуют в виде неионизированных молекул, что обусловливает переход ДК, ИБ, КТ в фазу сорбента. При pH 3-4 (рис. 3) содержание неионизированных молекул снижается на 10-15% и после (pH 4-7) их количество стремится к 0%, в растворе преобладают анионные формы (рис. 4).

Форма ДК, ИБ, КТ изменятся в зависимости от pH вследствие того, что в их структуре содержится карбоксильная группа, способная реагировать с водой с образованием сопряженного аниона и гидроксония.

Аминогруппы, содержащиеся в молекулах ДК, ИБ, КТ, также вступают в реакцию с водой с образованием сопряженного катиона и гидроксида. При этом изменение pH оказывает обратный эффект по сравнению с реакцией карбоксильной группы.

При pH 1-5 молекула НМ присутствует в нейтральной форме, также благоприятной для сорбции (рис. 4). Степень извлечения при этом максимальна (рис. 3) и составляет 90-93 %. В дальнейшем при переходе в более щелочную среду содержание цвиттер-формы уменьшается и соответственно уменьшается степень извлечения (рис. 4).

Более сложное влияние pH оказывает на сорбцию ПК: при pH 1-2 он присутствует в растворе в катионной форме, затем при pH 3-6 ее содержание уменьшается, и в растворе присутствуют смесь 3 форм: нейтральной, катионной, анионной (рис. 4), при этом уменьшается растворимость с 331 до 0.35 мг/см^3 (по данным Marvin Sketch) и соответственно степень извлечения увеличивается более чем в 2.5 раза. Таким образом, при извлечении ДК, ИБ, КТ pH выбрано 2, для НМ и ПК – 5.

Влияние массы и объема раствора на степень излечения НПВС. Изучена дозировка сорбента, которая является важным параметром процесса сорбции. Для выбора параметров сорбции изучено влияние массы сорбента в интервале 5-40 мг на степень извлечения НПВС (рис. 5 а). Данный параметр непосредственно связан с наличием активных центров сорбента и в молекулах сорбата. При большой массе сорбента существенно увеличивается число мест связывания сорбата [21]. Степень извлечения возрастает в интервале масс сорбента от 5 до 15 мг, а в интервале 20-40 мг увеличивается лишь на 1-2%.

При массе сорбента 15 мг изучено влияние объема раствора на степень извлечения (рис. 5 б). Объем раствора варьировали в пределах от 10 до 50 см^3. Увеличение объема до 50 см^3 уменьшает степень извлечения НПВС примерно в 1.5-2 раза.

Кинетика сорбции НПВС. С увеличением времени контакта от 0 до 45 мин эффективность сорбции плавно возрастает с 15-20% (10 мин) до 40-69% (45 мин). На этом этапе скорость сорбции выше по сравнению с другими стадиями за счет наличия более активных центров, тогда как на более поздних стадиях скорость сорбции снижалась по мере увеличения насыщения сорбента сорбатом [22].

Кривая выходит на плато в течение 45-90 мин (скорость сорбции незначительна, так как количество свободных активных центров уменьшается). Дальнейшее увеличение времени контакта фаз (120 мин) приводит к возрастанию степени извлечения НПВС на 1-3% (рис. 5 в).

Вклад в кинетику может вносить стадия собственно химической реакции между сорбируемым веществом и сорбентом, а также процесс физической сорбции. Для оценки вклада каждой стадии, кинетику сорбции исследовали с помощью моделей псевдопервого (Лагергрена) и псевдовторого порядка [23, 24].

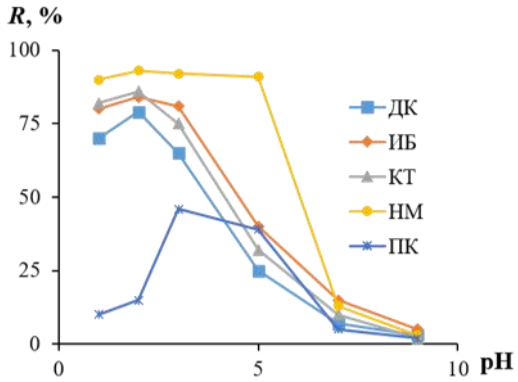


Рис. 2. Влияние pH раствора на степень извлечения НПВС при сорбции из водных сред: ДК (1), ИБ (2), КТ (3), НМ (4), ПК (5) (масса сорбента – 0.01 г, объем раствора – 10 см^3, время контакта фаз – 120 мин).

Fig. 2. Effect of pH on the recoveries of NSAIDs during sorption from aqueous media: DC (1), IB (2), KT (3), NM (4), PC (5) (sorbent mass – 0.01 g, solution volume – 10 cm^3, phase contact time – 120 min)

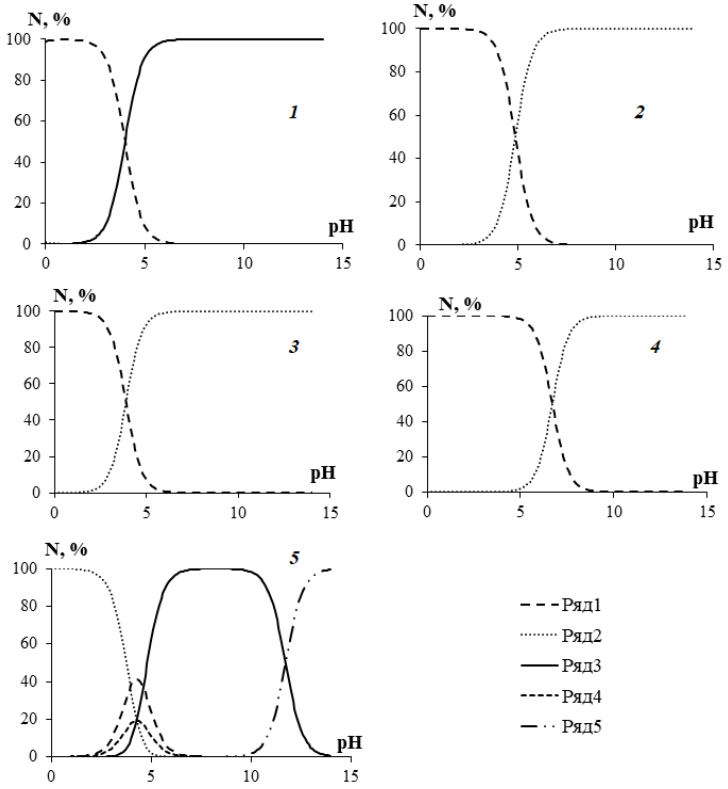


Рис. 3. Влияние pH на содержание форм (N, %) ДК (1), ИБ (2), КТ (3), НМ (4), ПК (5) в растворе (ряды соответствуют формам вещества, структурные формулы приведены на рис. 4).

Fig. 3. Effect of pH on the content of forms (N, %) of DC (1), IB (2), KT (3), NM (4), PC (5) in solution (the series advise the forms of the substance, the structural formulas are shown in Fig. 4)

Модель псевдопервого порядка в основном используется для анализа результатов, полученных при сорбции из водных растворов.

Она описывает скорость сорбции, которая пропорциональна количеству незанятых участков связывания на сорбентах и предполагает, что сорбция происходит за счет движущей силы, создаваемой разностью концентраций, и контролируется плёночной диффузией [25].

Кинетическая модель псевдовторого порядка описывает сорбцию, где взаимодействие между сорбатами и функцио-

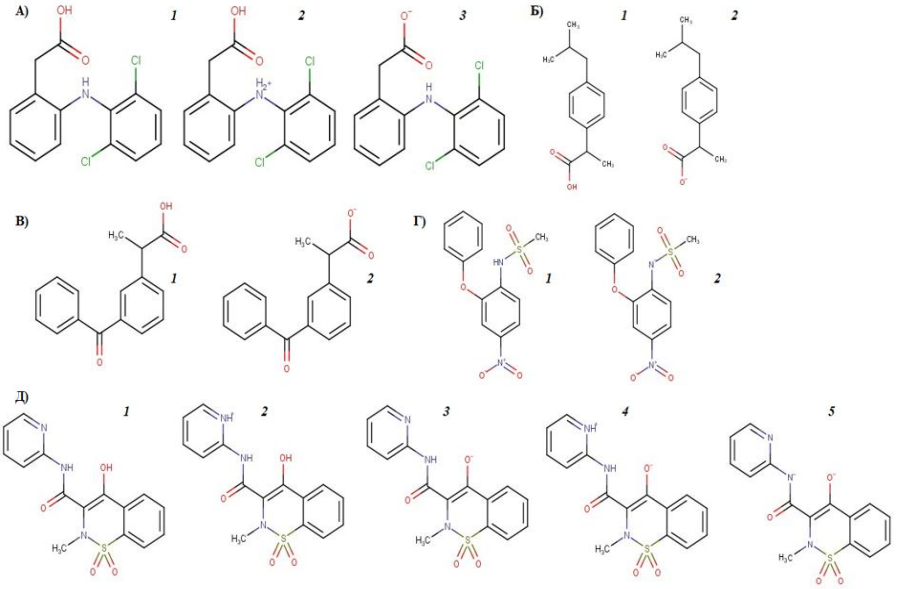


Рис. 4. Структурные формулы противовоспалительных препаратов при различных pH.
Fig. 4. Structural Formulas of anti-inflammatory drugs at different pH

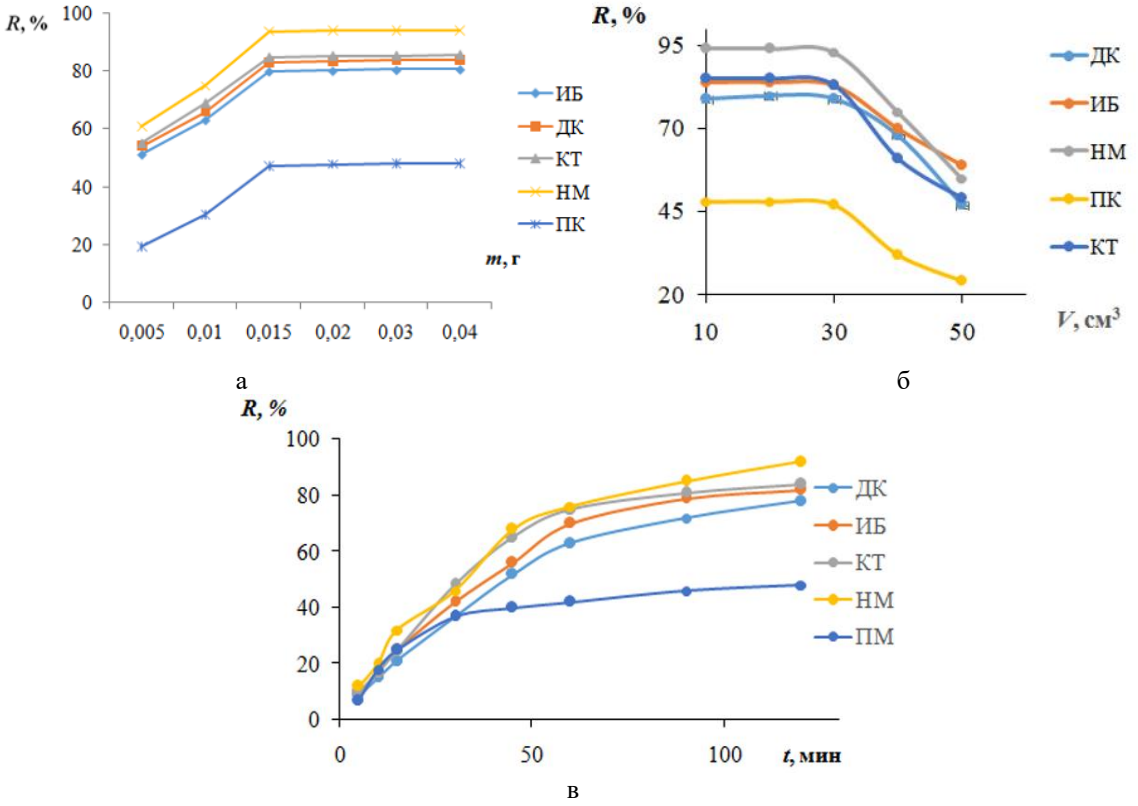


Рис. 5. Влияние на степень извлечения НПВС массы сорбента (а), объема раствора (б) и времени достижения сорбционного равновесия (в).
Fig. 5. Effect on the extraction efficiency of NSAIDs of sorbent mass (a), solution volume (b), and sorption time (c).

нальными группами на поверхности сорбентов определяет его эффективность.

Модель основана на равновесной сорбции, которая зависит от количества

Таблица 3. Параметры кинетических моделей при сорбции НПВС ценосферами
Table 3. Parameters of kinetic models for NSAID sorption by cenospheres

Сорбат	Модель псевдопервого порядка			Модель псевдовторого порядка		
	k_1, 1/мин	q_t, мг/г	r^2	k_2, г/мг мин	q_t, мг/г	r^2
ДК	$2.65 \cdot 10^{-4}$	217	0.975	$5.18 \cdot 10^{-5}$	277	0.981
ИБ	$3.82 \cdot 10^{-4}$	291	0.952	$5.76 \cdot 10^{-5}$	285	0.982
КТ	$4.44 \cdot 10^{-4}$	328	0.932	$5.78 \cdot 10^{-5}$	294	0.951
НМ	$3.43 \cdot 10^{-4}$	272	0.937	$6.23 \cdot 10^{-5}$	303	0.977
ПК	$2.71 \cdot 10^{-4}$	85	0.974	$3.92 \cdot 10^{-4}$	125	0.984

сорбата на поверхности сорбента, и количества сорбата поглощенного при достижении равновесия.

В дополнение к внешней диффузии, кинетическая модель псевдовторого порядка дополняется механизмами внутренней диффузии в частице [26]. Сравнение моделей псевдопервого, псевдовторого порядка и значения рассчитанных констант представлены в табл. 3.

Для описания кинетики сорбции применима модель псевдовторого порядка (R^2=0.951-0.981). Однако по этой модели невозможно четко различить физические взаимодействия (сорбцию), такие как электростатические, гидрофобные взаимодействия и химическую сорбцию. Основным ее ограничением является способность описывать сорбционные системы фармацевтических препаратов только на начальном участке – в течение первых 30 мин [27, 28].

Высокие коэффициенты детерминации модели псевдовторого порядка (более 0.930) в промежуток времени больше 40 мин обусловлены тем, что помимо химической сорбции на процесс сорбции может влиять физическая сорбция. Аналогичные результаты получены при сорбции ДК углеродным сорбентом на основе графена [29].

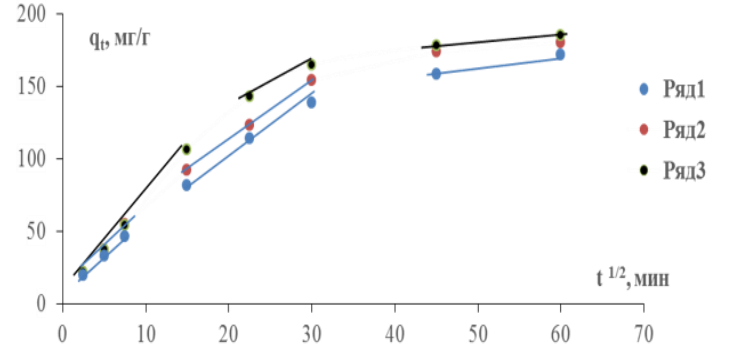
Для оценки стадий, ограничивающих скорость сорбции, используется количественный подход (построение графика зависимости q_t от $t_{0,5}$). Обычно, для этого применяют уравнение внутричастичной диффузии, предложенное Вебером и Моррисом:

$$q_t = k_p \cdot t^{1/2} + B, \quad (4)$$

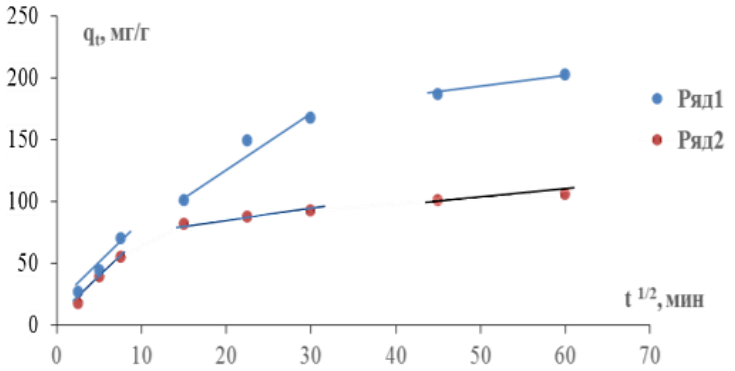
где k_p – константа скорости диффузии внутри частиц (мг/г·мин$^{1/2}$), B – константа, относящаяся к толщине пограничного слоя (мг/г), который определяется по графику зависимости q_t от $t^{1/2}$.

Если график представляет прямую линию и проходит через начало координат, то процесс сорбции контролируется только внутричастичной диффузией; если несколько линейных участков на кривой сорбции – то на процесс сорбции влияют более одного процесса (стадии). Графики Вебера-Морриса приведены на рис. 6. Полученные результаты соответствуют тому, что сорбция на ряду с внутричастичной диффузией контролируется другими стадиями сорбции [30, 31]. Первый линейный участок относится к пограничному слою диффузии (до 10-15 мин). Второй (от 15 до 45 мин) – описывает этап постепенной сорбции НПВС в мезопорах. На третьем участке (от 45 до 90 мин) внутричастичная диффузия замедляется и происходит диффузия сорбатов в микропоры по аналогии с мезопористыми кремнезёмными полимерными и неорганическими сорбентами типа SBA-15 (мезопористый диоксид кремния) [32, 33].

Таким образом, скорость сорбции изначально контролируется диффузией через границу слоя жидкости и в последствии ограничивается внутричастичной диффузией, включая диффузию сорбатов в мезопорах и микропорах.



а



б

Рис 6. Графики Вебера-Морриса диффузии внутри частиц НПВС при сорбции ценосферами в рядах а) 1 – ДК, 2– ИБ, 3 – КТ и б) 1 – НМ, 2 – ПК.
Fig. 6. Weber-Morris intraparticle diffusion plots for NSAIDs during sorption by cenospheres: (a) series: 1 – DC, 2 – IB, 3 – KT; (b) series: 1 – NM, 2 – PC

Заключение

В работе изучена сорбция НПВС из водных сред с помощью алюмосиликатных микросфер, производства ИНОТЕК (Россия). Эффективность сорбции НПВС, различающихся по строению и по pK_a НПВС, зависит от pH раствора. Степени извлечения НПВС в оптимальных условиях (pH при извлечении ДК, ИБ, КТ – 2, НМ и ПК – 5, масса сорбента – 15 мг, объем раствора – 30 $см^3$, время контакта фаз – 120 мин) составили 48-94 %. Для описания кинетики сорбции применима модель псевдовторого порядка.

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.

Список литературы/References

1. Moreno Ríos A.L., Gutierrez-Suarez K., Carmona Z., Ramos C.G., Silva Oliveira L.F. *Chemosphere*. 2022; 291(Pt 1): 132822. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132822

2. Vaudin P., Augé C., Just N., Mhaouty-Kodja S., Mortaud S., Pillon D. *Environ. Res*. 2022; 205: 112495. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112495

3. Marmon P., Owen S.F., Margiotta-Casaluci L. *Environ. Int*. 2021; 146: 106222. https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106222

4. Rozaini M.N.H., Semail N.-F., Zango Z.U., Lim J.W., Yahaya N., Setiabudi H.D., Tong W.-Y., Shamsuddin R., Chan Y.J., Khoo K.S., Suliman M., Kiatkittipong W. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 2025; 166: 105020. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2023.105020

5. Parolini M. *Sci. Total Environ.* 2020; 740: 140043. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140043

6. Kushnir A.A., Sypko K.S., Gubin A.S., Sheremet E.O., Sukhanov P.T. *Sorbtsionnye I Khromatograficheskie Protsessy*. 2021; 21(2): 196-215. (In Russ.) https://doi.org/10.17308/sorp-chrom.2021.21/3354

7. Cobian-Solorio G.A., Aguayo-Villarreal I.A., Rojas-Mayorga C.K., Muñiz-Valencia R., Emparan-Legaspi M.J., Davila Guzman N.E. *J. Mol. Struct.* 2025; 1321: 139698. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.139698

8. Lin Z., Jin Y., Xiao Z., Li Y., Lin Y., Chen Z., Zhuang X., Mo P., Liu Y., Chen P., Lv W., Liu G. *Sep. Purif. Technol*. 2024; 339: 126628. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.126628

9. Costa R.L.T., do Nascimento R.A., de Araújo R.C.S., Vieira M.G.A., da Silva M.G.C., de Carvalho S.M.L., de Faria L.J.G. *J. Mol. Liq.* 2021; 343: 116980. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116980

10. Jana P., Bruzzoniti M.C., Appendini M., Rivoira L., Del Bubba M., Rossini D., Ciofi L., Sorarù G.D. *Ceram. Int.* 2016; 42(16): 18937-18943. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.09.045

11. de Souza R.M., Quesada H.B., Cusioli L.F., Fagundes-Klen M.R., Bergamasco R. *Ind. Crops Prod.* 2021; 161: 113200. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113200

12. Abbas G., Javed I., Iqbal M., Haider R., Hussain F., Qureshi N. *Desalination Water Treat*. 2017; 95: 274-285. https://doi.org/10.5004/dwt.2017.21465

13. Viscusi G., Mottola S., Boumezough Y., Arris S., De Marco I., Gorrasi G. *Chemosphere*. 2025; 376: 144293. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144293

14. Sellaoui L., Mechi N., Lima É.C., Dotto G.L., Ben Lamine A. *J. Phys. Chem. Solids.* 2017; 109: 117-123. https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2017.05.019

15. https://inoteck.net/keramicheskaya_mikrosfer

16. Xu X., Li Q., Cui H., Pang J., Sun L., An H., Zhai J. *Desalination*. 2011; 272(1-3): 233-239. https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.01.028

17. Olabemiwo F., Tawabini B., Patel F., Oyehan T., Khaled M., Laoui T. *Desalination Water Treat.* 2018; 127: 140-150. https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22859

18. Kunecki P., Wdowin M., Hanc E. *J. Clean. Prod.* 2023; 391: 136181. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136181

19. Sun J., Li R., Wang X., Zhao C., Song Q., Liu F., Wang Z., Liu C., Zhang X. *Chemosphere.* 2023; 330: 138619. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138619

20. Lin L., Huang M., Long L., Chen D. *Journal of Alloys and Compounds.* 2014; 615: 929-932. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.06.088

21. Eltaweil A.S., Elgarhy G.S., El-Subruiti G.M., Omer A.M. *Int. J. Biol. Macromol.* 2020; 154: 307-318. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.03.122.

22. Khadir A., Motamedi M., Negarestani M., Sillanpää M., Sasani M. *Int. J. Biol. Macromol.* 2020; 162: 663-677. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.06.09

23. Kazimirova K.O., Shtykov S.N. *Sorbtsionnye I Khromatograficheskie Protsessy*. 2023; 23(6): 980-992. (In Russ.) https://doi.org/10.17308/sorp-chrom.2023.23/11859

24. Ho Y.S. *J. Hazard. Mater.* 2006; 136(3): 681-689. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.12.043.

25. Shumilova M.A., Petrov V.G. *Sorbtsionnye I Khromatograficheskie Protsessy*.2022; 22 (2): 173-182. (In Russ.) https://doi.org/10.17308/sorp-chrom.2022.22/9222

26. Crini G., Badot P.-M. *Progress in Polymer Science.* 2008; 33: 399-447. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2007.11.001

27. Tran H.N., You S.-J., Hosseini-Bandegharaei A., Chao H.-P. *Water Res*. 2017; 120: 88-116. https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.04.014

28. Ho Y.S., McKay G. *Trans. I. Chem. E.* 1998; 76: 332-340.

29. Hiew B.Y.Z., Lee L.Y., Lai K.C., Gan S., Thangalazhy-Gopakumar S., Pan G.-T., Yang T.C. *Environ. Res*. 2019; 168: 241-253. https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.09.030

30. Allen S.J., McKay G., Khader K.Y.H. *Environ. Pollut.* 1989; 56: 39-50.

31. Cheung W.H., Szeto Y.S., McKay G. *Bioresour. Technol.* 2007; 98(15): 2897-2904. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.09.045

32. Kruk M., Jaroniec M., Ko C.H., Ryoo R. *Chem. Mater.* 2000; 12: 1961-1968.

33. Ryoo R., Ko C.H., Kruk M., Antochshuk V., Jaroniec M. *J. Phys. Chem. B*. 2000; 104: 11465-1147.

Информация об авторах / Information about the authors

А.А. Кушнир – к.х.н., доцент кафедры промышленной экологии и техносферной безопасности, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия

А.С. Губин – д.х.н., доцент кафедры промышленной экологии и техносферной безопасности, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия

К.С. Сыпко – к.х.н., и.о. заведующего кафедрой химии и химической технологии, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия

А.А. Шигида – студент, кафедра физической и аналитической химии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия

П.Т. Суханов – д.х.н., профессор кафедры физической и аналитической химии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия

A.A. Kushnir – Ph.D., Associate Professor of the Department of Industrial Ecology and Technosphere Safety, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russian Federation

A.S. Gubin – Ph.D., doctor of science (chemistry), Department of Industrial Ecology and Technosphere Safety, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russian Federation

K.S. Sypko – Ph.D., Acting Head of the Department of Chemistry and Chemical Technology Federal State Autonomous Educational Institution for Higher Education "North-Caucasus Federal University", Russian Federation

A.A. Shigida – student, Department of Physical and Analytical Chemistry, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russian Federation

P.T. Sukhanov – professor, doctor of science (chemistry), Department of Physical and Analytical Chemistry, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russian Federation

Статья поступила в редакцию 24.02.2026; одобрена после рецензирования 08.04.2026; принята к публикации 15.04.2026.
The article was submitted 24.02.2026; approved after reviewing 08.04.2026; accepted for publication 15.04.2026.