

ОЦЕНКА СОРБЦИИ ЦЕФУРОКСИМА НАТРИЯ И ЦЕФОТАКСИМА НАТРИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-ИМПРИНТИРОВАННЫМИ ПОЛИМЕРАМИ

Фам Тхи Гам, Као Ньят Линь, А.Н. Зяблов

Фам Тхи Гам (ORCID 0009-0006-2352-4001)

Кафедра аналитической химии, Воронежский государственный университет, Университетская пл., 1, Воронеж, Российская Федерация, 394018

Кафедра аналитической химии и контроля качества лекарственных средств, Ханойский университет бизнеса и технологий, 124 Винь Туй, Хай Ба Чунг, г. Ханой, Вьетнам, 11600

E-mail: gampham@mail.ru

Као Ньят Линь (ORCID 0000-0002-5493-092X)

Приморское отделение Совместного Российско-Вьетнамского тропического научно-исследовательского и технологического центра, Нгуен Тхьен Тхуат 30, г. Нячанг, Кхань Хоа, Вьетнам, 57127

E-mail: cnlinh0812@gmail.com

Александр Николаевич Зяблов (ORCID 0000-0001-9134-464X)*

Кафедра аналитической химии, Воронежский государственный университет, Университетская пл., 1, Воронеж, Российская Федерация, 394018

E-mail: alex-n-z@yandex.ru*

Молекулярно-импринтированные полимеры (МИП) все больше привлекают внимание исследователей благодаря способности к молекулярному распознаванию, высокой специфичности, механической прочности, простоте синтеза, низкой стоимости и способности к селективной сорбции целевых молекул. Однако эффективность сорбции МИП во многом зависит от условий синтеза, поэтому изучение сорбционных свойств МИП является необходимым. В работе были синтезированы МИП с отпечатком антибиотиков цефуроксима натрия (Cefur) и цефотаксима натрия (Cefot). Эти МИПы позволили создать специфические распознающие участки в полимерной матрице. Установлено, что сорбционное равновесие достигается через 55 мин для Cefur и 45 мин для Cefot, что объясняется различиями в их молекулярной структуре. Изотермы сорбции Cefur и Cefot относятся к типу L, что указывает на механизм мономолекулярной сорбции в мелких порах полимера. Сильное взаимодействие между полимером и антибиотиком способствует быстрому заполнению пор даже при низких концентрациях, вследствие чего начальная сорбционная способность возрастает линейно. При дальнейшем повышении концентрации кривая выходит на плато, соответствующее максимальной сорбционной способности. Благодаря наличию специфических распознающих участков, МИП продемонстрировали более высокую сорбционную способность по сравнению с неимпринтированным полимером (НП). Максимальная сорбционная емкость составила 12,15 мг/г для МИП-Cefur и 5,17 мг/г для МИП-Cefot. МИП-Cefur обладает более высокой сорбционной способностью по сравнению с МИП-Cefot, что выражается в большей степени извлечения (49,5% против 29,8%) и более высоком импринтинг-факторе (3,1 против 2,5). Кроме того, как МИП-Cefur, так и МИП-Cefot показали высокую специфичность к целевым антибиотикам. Полученные результаты подтверждают эффективность молекулярно-импринтированных полимеров в сорбции и селективном определении антибиотиков, что делает их перспективными для практического применения.

Ключевые слова: антибиотик, цефуроксим натрия, цефотаксим натрия, молекулярно-импринтированные полимеры, сорбция, импринтинг-фактор

Для цитирования:

Фам Тхи Гам, Као Ньят Линь, Зяблов А.Н. Оценка сорбции цефуроксима натрия и цефотаксима натрия молекулярно-импринтированными полимерами. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 10. С. 64–70. DOI: 10.6060/ivkkt.20256810.7269.

For citation:

Pham Thi Gam, Cao Nhat Linh, Zyablov A.N. Evaluation of sorption of cefuroxime sodium and cefotaxime sodium by molecular-imprinted polymers. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 10. P. 64–70. DOI: 10.6060/ivkkt.20256810.7269.

**EVALUATION OF SORPTION OF CEFUROXIME SODIUM AND CEFOTAXIME SODIUM
BY MOLECULAR-IMPRINTED POLYMERS**

Pham Thi Gam, Cao Nhat Linh, A.N. Zyablov

Pham Thi Gam (ORCID 0009-0006-2352-4001)

Department of Analytical Chemistry, Voronezh State University, Universitetskaya sq., 1, Voronezh, 394018, Russia

Department of Analytical Chemistry and Quality Control of Medicines, Hanoi University of Business and Technology, 124 Vinh Tuy, Hai Ba Trung, Hanoi, 11600, Vietnam

E-mail: gampham@mail.ru

Cao Nhat Linh (ORCID 0000-0002-5493-092X)

Coastal Branch, Vietnam-Russia Tropical Centre, Nguyen Thien Thuat 30, Nha Trang, Khanh Hoa, 57127, Vietnam

E-mail: cnlinh0812@gmail.com

Alexander N. Zyablov (ORCID 0000-0001-9134-464X)*

Department of Analytical Chemistry, Voronezh State University, Universitetskaya sq., 1, Voronezh, 394018, Russia

E-mail: alex-n-z@yandex.ru*

Molecularly imprinted polymers (MIPs) are increasingly attracting the attention of researchers due to their ability for molecular recognition, high specificity, mechanical strength, ease of synthesis, low cost and ability for selective sorption of target molecules. However, the efficiency of MIP sorption largely depends on the synthesis conditions, so the study of the sorption properties of MIPs is necessary. In this work, MIPs with an imprint of the antibiotics cefuroxime sodium (Cefur) and cefotaxime sodium (Cefot) were synthesized. These MIPs made it possible to create specific recognition sites in the polymer matrix. It was found that the sorption equilibrium is achieved after 55 min for Cefur and 45 min for Cefot, which is explained by the differences in their molecular structure. The sorption isotherms of Cefur and Cefot belong to the L type, which indicates the mechanism of monomolecular sorption in small pores of the polymer. Strong interaction between the polymer and the antibiotic promotes rapid filling of the pores even at low concentrations, as a result of which the initial sorption capacity increases linearly. With a further increase in concentration, the curve reaches a plateau corresponding to the maximum sorption capacity. Due to the presence of specific recognition sites, MIPs demonstrated higher sorption capacity compared to non-imprinted polymer (NP). The maximum sorption capacity was 12.15 mg/g for MIP-Cefur and 5.17 mg/g for MIP-Cefot. MIP-Cefur has higher sorption capacity compared to MIP-Cefot, which is expressed in a higher degree of extraction (49.5% versus 29.8%) and a higher imprinting factor (3.1 versus 2.5). In addition, both MIP-Cefur and MIP-Cefot demonstrated high specificity to the target antibiotics. The obtained results confirm the efficiency of molecularly imprinted polymers in the sorption and selective determination of antibiotics, which makes them promising for practical application.

Keywords: antibiotic, cefuroxime sodium, cefotaxime sodium, molecularly imprinted polymers, sorption, imprinting factor

ВВЕДЕНИЕ

В современной системе здравоохранения антибиотики являются широко используемой группой антибактериальных препаратов для лечения инфекционных заболеваний. С момента своего появления в 1930-х г. антибиотики не только играют важную роль в лечении и профилактике заболеваний у людей и животных, но и используются в качестве кормовых добавок в животноводстве [1]. Однако злоупотребление и неправильное использование антибиотиков может привести к формированию у возбудителей заболеваний устойчивости к антибиотикам – одной из самых серьезных проблем для здравоохранения в настоящее время, вызывающей только в Европе более 25000 смертей ежегодно [2].

Широкое применение антибиотиков в животноводстве не только загрязняет окружающую среду, но и приводит к остаточному содержанию антибиотиков в продуктах животного происхождения, таких как мясо, печень, почки, молоко и яйца [3, 4]. Недавние исследования показали, что даже при воздействии низких доз антибиотиков у людей сохраняется риск серьезных проблем со здоровьем, включая ожирение, рак, снижение фертильности и врожденные пороки развития [4-6].

В настоящее время применяются различные аналитические методы для качественного и количественного определения антибиотиков в низких концентрациях в различных типах образцов. Эти методы включают хроматографические технологии, такие как газовая хроматография, высокоэффективная жидкостная хроматография, тонкослойная хроматография; спектроскопические методы, такие как спектрофотометрия, флуоресцентная и инфракрасная спектроскопии, а также другие аналитические методы [7-11].

Кроме того, одним из важных направлений аналитической химии является разработка способов пробоподготовки, разделения и концентрирования веществ. Среди огромного выбора сорбентов особое место занимают молекулярно-импринтированные полимеры (МИП) [12].

МИП представляют собой синтетические материалы со структурой, содержащей полости, сформированные под целевую молекулу. Основным преимуществом МИП является способность распознавать среди сходных веществ целевые молекулы, использованные в процессе импринтинга. Эти полимеры обладают высокой механической прочностью, устойчивостью к высоким температурам и давлению, а также химической инертностью

по отношению к агрессивным средам. Кроме того, они характеризуются длительным сроком хранения, благодаря чему сохраняют способность к молекулярному распознаванию на протяжении многих лет при комнатной температуре [13].

В последние годы МИП получили широкое применение в различных областях, таких как иммуноанализ, хроматографическое разделение, системы доставки лекарств, а также в создании сенсоров для оценки качества лекарственных средств, окружающей среды, пищевой промышленности и др. В области хроматографии МИП часто используются в качестве неподвижной фазы в высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ), тонкослойной хроматографии (ТСХ) и сверхкритической флюидной хроматографии (СФХ) для эффективного разделения и количественного определения аналитов [14-16]. Главное преимущество МИП заключается в их способности селективно разделять вещества с близкой структурой или оптические изомеры, что трудно достижимо для многих традиционных неподвижных фаз [17]. Кроме того, МИП интегрируются в современные сенсорные устройства для селективного распознавания молекул, таких как сахара, гербициды, нуклеиновые кислоты, производные аминокислот, токсины, лекарственные средства, растворители и химические пары. Помимо этого, МИП используются в качестве сорбентов в твердофазной экстракции [14-16]. Подготовка проб – это важный этап, направленный на извлечение аналита из матрицы пробы перед проведением анализа. Однако этот процесс часто сталкивается с двумя основными проблемами: низкая селективность сорбента и низкая концентрация аналита в пробе. Применение МИП позволяет селективно выделять аналиты из сложных матриц и повышать чувствительность при определении их содержания [18].

Процесс синтеза МИП включает три этапа: формирование предполимерного комплекса между функциональными мономерами и шаблоном, в основе которого могут быть как ковалентные, так и нековалентные взаимодействия; полимеризация; удаление шаблона из полимерной матрицы [15, 19]. Условия получения МИП включают выбор сшивающего агента, функционального мономера, а также таких параметров, как время реакции, температура и др. Эти факторы не только влияют на морфологию МИП, но и определяют эффективность и свойства материала [14]. Поэтому исследование сорбционных характеристик полимера необходимо для оптимизации условий синтеза МИП.

Целью работы являлась оценка способности полимеров на основе полиимида сорбировать антибиотики цефуроксим натрия и цефотаксим натрия из водных растворов.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе были использованы антибиотики квалификации «фармакопейные» производства ПАО «Красфарма» (цефуроксим натрия) и ЗАО «ЛЕККО» (цефотаксим натрия). Цефуроксим натрия относится к цефалоспориновым антибиотикам второго поколения с широким спектром антимикробного действия [20], тогда как цефотаксим натрия является полусинтетическим антибиотиком третьего поколения [21, 22].

Молекулярно-импринтированные полимеры были получены путем полимеризации смеси, содержащей сополимер 1,2,4,5-бензолтетракарбоновой кислоты и 4,4'-диаминодифенилоксида (ОАО МИПП НПО «Пластик», г. Москва), а также шаблонные вещества – цефуроксим натрия и цефотаксим натрия. Синтез МИП проводили по методике [23-26]. Неимпринтированный полимер синтезировали аналогичным способом, но без добавления шаблона [23-26].

Определение концентрации проводили методом градуировочного графика. Стандартные растворы антибиотиков готовили путем растворения точной навески вещества в дистиллированной воде в диапазоне 0,1-0,02 г/дм³.

Способность МИП сорбировать антибиотики исследовали с помощью установки с кондуктометром ССТ-3320Т (Россия) [27] для этого в стакан с раствором антибиотика помещали 0,1000 ± ± 0,0002 г полимера и регистрировали изменение электропроводности раствора [27].

Количество сорбированного вещества рассчитывали по формуле [25]:

$$A = \frac{(C_0 - C_{\text{равн.}}) \cdot V}{m}, \quad (1)$$

где A – количество сорбированного на поверхности полимера антибиотика мг/г; C₀, C_{равн.} – исходная и равновесная концентрация антибиотика в растворе после сорбции, г/дм³, соответственно; m – масса полимера, г; V – объем раствора, дм³.

Степени извлечения (R, %) высчитывали по уравнению:

$$R, \% = \frac{(C_0 - C) \cdot 100}{C_0}, \quad (2)$$

где C₀, C – концентрации антибиотиков в растворе до сорбции и после сорбции, г/дм³, соответственно [25].

Коэффициенты распределения (D) определяли с использованием следующего уравнения:

$$D = \frac{R}{(100 - R)} \cdot \frac{V}{m}, \quad (3)$$

где m – масса навески полимера, г; V – объем анализируемого раствора, дм³ [27].

Способность молекулярно-импринтированного полимера с отпечатками антибиотков распознавать целевые молекулы оценивали с помощью импринтинг-фактора:

$$IF = \frac{D_{\text{МИП}}}{D_{\text{НИП}}}, \quad (4)$$

где D_{МИП} и D_{НИП} – соответственно коэффициент распределения вещества для молекулярно-импринтированного полимера и неимпринтированного полимера [27].

Коэффициент десорбции (K, %) рассчитывается по формуле [28]:

$$K, \% = \frac{A_1 \cdot 100}{A}, \quad (5)$$

где A₁ – количество десорбированного с поверхности полимера антибиотика, мг/г; A – количество сорбированного на поверхность полимера антибиотика, мг/г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В работе проведена оценка сорбционной способности полимеров к антибиотикам – цефуроксиму натрия и цефотаксиму натрия на основе изотерм и данных по кинетике сорбции. Установлено, что время сорбционного равновесия для двух антибиотиков различается: Cefur достигает равновесия за 55 мин, тогда как Cefot – всего за 45 мин. Это различие может быть связано с различиями в молекулярной структуре, что приводит к разной степени связывания с полимером.

Изотермы сорбции антибиотиков Cefur и Cefot полимерами приведены на рис. 1 и 2. В составе имидизированных полиамидокислот присутствуют активные атомы водорода, а также функциональные группы, включая –ОН, –С=О и –NH, что определяет их сорбционные свойства [25]. Общая структура антибиотика цефалоспоринона включает карбоксильную (–COOH), амидную (–CONH–) и карбонильную (–C=O) группы в кольце бета-лактама [29]. Таким образом, процесс сорбции антибиотиков цефалоспоринового ряда на МИП может происходить благодаря образованию водородных связей между антибиотиком и сорбентом через гидраторазделенную пару (антибиотик-H₂O-сорбент).

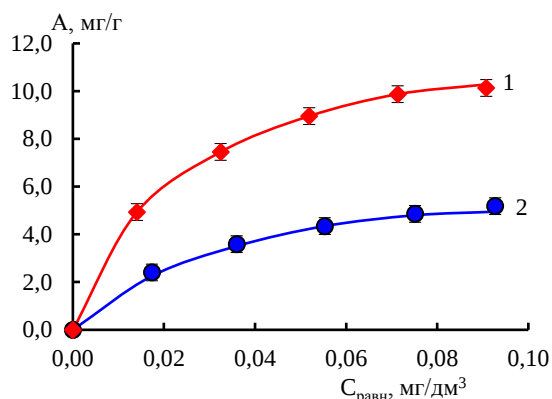


Рис. 1. Изотерма сорбции цефуроксима натрия (Cefur)
1 – МИП-Cefur; 2 – НП

Fig. 1. Sorption isotherm of cefuroxime sodium (Cefur)
1 – MIP-Cefur; 2 – NP

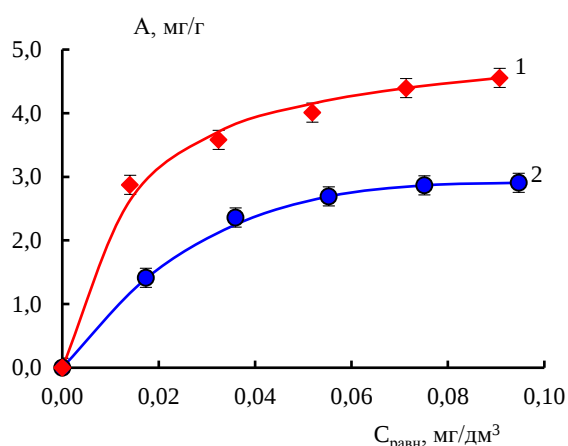


Рис. 2. Изотерма сорбции цефотаксима натрия (Cefot)
1 – МИП-Cefot; 2 – НП

Fig. 2. Sorption isotherm of sorption of cefotaxime sodium (Cefot) 1 – MIP-Cefot; 2 – NP

Процесс сорбции цефуроксима натрия и цефотаксима натрия соответствует изотерме сорбции типа L, что свидетельствует о механизме мономолекулярной сорбции на поверхности микропор сорбента [27]. Характерной особенностью такой изотермы является выпуклый начальный участок графика, отражающий зависимость сорбции от концентрации. Это объясняется увеличением числа занятых сорбционных центров, вследствие чего молекулам сорбата становится сложнее находить свободные позиции [30]. Сильное взаимодействие между полимером и молекулами антибиотиков способствует заполнению пор даже при относительно низких концентрациях. Поэтому на начальном этапе изотермы сорбционная способность возрастает линейно с увеличением концентрации раствора. Однако при дальнейшем увеличении концентрации кривая выходит на плато, что свидетельствует о достижении максимальной сорбционной емкости.

По данным ИК-спектроскопии, сорбция цефуроксима натрия и цефотаксима натрия МИПами проходит преимущественно за счет образования водородных связей. Взаимодействие осуществляется между карбоксильной группой полимера и молекулами воды ($-\text{COO}^- \dots \text{H}_2\text{O}$), а также между молекулами воды и амидной группой антибиотиков ($\text{H}_2\text{O} \dots -\text{CONH}-$), что подтверждается наличием характерных полос поглощения в области $2363\text{--}2359\text{ см}^{-1}$ в ИК спектрах. Дополнительно сорбция может проходить через взаимодействие имино-группы сорбента с водой ($=\text{NH} \dots \text{H}_2\text{O}$) и воды с карбоксильной группой антибиотиков ($\text{H}_2\text{O} \dots -\text{COO}^-$), что отражается появлением характеристических частот в диапазоне $(1375\text{--}1373\text{ см}^{-1})$.

На рис. 3 показано количество антибиотика, сорбированного МИП и НП. Установлено, что МИП обладает более высокой сорбционной способностью по сравнению с НП благодаря пористой структуре и специфическим молекулярным распознающим участкам, сформированным в процессе молекулярного импринтинга при наличии молекул-шаблонов (Cefur и Cefot). Эти участки способствуют глубокому проникновению молекул антибиотика в структуру МИП, что повышает эффективность сорбции. Напротив, НП не содержит специфических распознающих участков, так как при его синтезе не использовались молекулы-шаблоны. В результате Cefur и Cefot удерживаются лишь на поверхности НП, не проникая внутрь его структуры, что снижает его сорбционную способность. Кроме того, результаты показывают разницу в сорбционной способности между двумя антибиотиками: Cefur сорбируется в большем количестве, чем Cefot. МИП-Cefur достигает максимального значения сорбции $12,15\text{ мг/г}$, тогда как для МИП-Cefot этот показатель составляет всего $5,17\text{ мг/г}$.

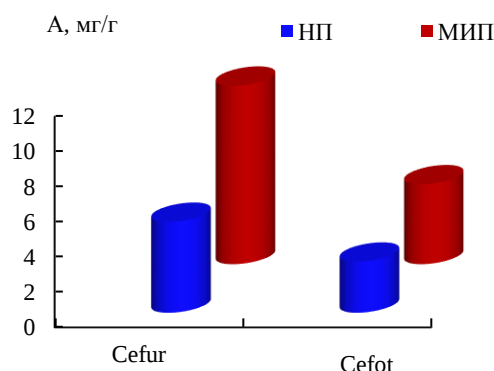


Рис. 3. Количество сорбированных антибиотиков полимерами с отпечатками антибиотиков и неимпринтированным полимером

Fig. 3. The amount of antibiotics sorbed by polymers with antibiotic imprints and non-imprinted polymer

Для характеристики сорбционных свойств полимеров были рассчитаны такие параметры, как степень извлечения (R , %), коэффициент распределения (D), импринтинг-фактор (IF) и коэффициент десорбции (K , %) (табл. 1).

МИП демонстрирует лучшую способность сорбции по сравнению с НП для обоих антибиотиков Cefur и Cefot, что подтверждается измеренными параметрами. В частности, степень извлечения (R) для МИП-Cefur достигает 49,5%, что почти в два раза выше, чем у НП (24,3%). Аналогичная тенденция наблюдается для МИП-Cefot, где R составляет 29,8%, что превышает показатель НП (14,4%). Коэффициент распределения (D) для МИП также выше, чем для НП, что свидетельствует о более сильном связывании МИП с антибиотиком. Импринтинг-фактор (IF), превышающий 1 для обоих антибиотиков, подтверждает эффективность молекулярного импринтинга, обеспечивающего МИП более высокую избирательность по сравнению с НП. Кроме того, коэффициент десорбции (K)

для МИП превышает значение НП (94,7% против 83,8% для Cefur), что указывает на лучшую способность МИП к высвобождению антибиотика, обеспечивая их эффективное повторное использование.

Результаты также показывают, что МИП более эффективно сорбируют Cefur по сравнению с Cefot. Так, степень извлечения МИП-Cefur (49,5%) превосходит значение для МИП-Cefot (29,8%). Импринтинг-фактор для МИП-Cefur (3,1) выше, чем для МИП-Cefot (2,5), что свидетельствует о более эффективном формировании молекулярно-распознающих участков для Cefur.

Результаты в табл. 2 показали, что МИП-Cefur обладает значительно большей селективностью к Cefur (степень извлечения 49,5%) по сравнению с цефтриаксоном натрия (3,7%). Аналогично, МИП-Cefot демонстрирует более высокое сродство к Cefot (29,8%), чем к цефуроксиму натрия (5,3%). Эти данные подтверждают высокую специфичность как МИП-Cefur, так и МИП-Cefot к соответствующим целевым антибиотикам.

Таблица 1

Характеристики адсорбции антибиотиков молекулярно-импринтированными (МИП) и неимпринтированными (НП) полимерами ($n = 3$, $P = 0,95$)

Table 1. Characteristics of antibiotic adsorption by molecularly imprinted (MIP) and non-imprinted (NP) polymers ($n = 3$, $P = 0.95$)

Сорбент	Антибиотик	R , %	S_r , %	D , $\text{дм}^3/\text{г}$	S_r , %	IF	K , %
НП	Cefur	$24,3 \pm 2,1$	3,5	$0,159 \pm 0,009$	2,2	3,1	83,8
МИП-Cefur		$49,5 \pm 1,5$	1,2	$0,489 \pm 0,014$	1,1		94,7
НП	Cefot	$14,4 \pm 1,0$	2,8	$0,083 \pm 0,005$	2,4	2,5	82,7
МИП-Cefot		$29,8 \pm 1,7$	2,3	$0,205 \pm 0,006$	1,2		93,9

Таблица 2

Характеристики адсорбции молекулярно-импринтированных полимеров (МИП) с целевым и другим антибиотиками ($n = 3$, $P = 0,95$)

Table 2. Adsorption characteristics of molecularly imprinted polymers (MIPs) with target and other antibiotics ($n = 3$, $P = 0.95$)

Сорбент	Антибиотик	R , %	S_r , %	D , $\text{дм}^3/\text{г}$	S_r , %	% сорбции
МИП-Cefot	Cefur	$5,3 \pm 0,4$	3,2	$0,027 \pm 0,002$	2,9	22,22
	Cefot	$29,8 \pm 1,7$	2,3	$0,205 \pm 0,006$	1,2	77,78
МИП-Cefur	Ceftr	$3,7 \pm 0,2$	4,5	$0,018 \pm 0,002$	3,8	4,88
	Cefur	$49,5 \pm 1,5$	1,2	$0,489 \pm 0,014$	1,1	95,12

ВЫВОДЫ

В работе показано, что МИП обладает более высокой сорбционной способностью по сравнению с НП благодаря формированию специфических молекулярных распознающих центров. Время достижения сорбционного равновесия для Cefur (55 мин) больше, чем для Cefot (45 мин). Максимальное количество сорбции МИП-Cefur составляет 12,15 мг/г, что почти в два раза превышает по-

казатель для МИП-Cefot (5,17 мг/г). Степень извлечения и импринтинг-фактор также выше для МИП-Cefur, что свидетельствует о его большей сорбционной способности по сравнению с МИП-Cefot. Кроме того, МИП-Cefur и МИП-Cefot демонстрируют высокую селективность к цефуроксиму и цефотаксиму по сравнению с другими антибиотиками группы цефалоспоринов, такими как цефтриаксон натрия и цефуроксим натрия.

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

The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. Bacanlı M.G. // *Arch. Toxicol.* 2024. V. 98. P. 1717-1725. DOI: 10.1007/s00204-024-03760-z.
2. Feier B., Blidar A., Pusta A., Carciuc P., Cristea C. // *Biosensors.* 2019. V. 9. N 1. P. 1-17. DOI: 10.3390/bios9010031.
3. Zhang Z., Zhang H., Tian D., Phan A., Seididamyeh M., Alanazi M., Xu Z.P., Sultanbawa Y., Zhang R. // *Coord. Chem. Rev.* 2024. V. 498. P. 1-27. DOI: 10.1016/j.ccr.2023.215455.
4. Manyi-Loh C., Mamphweli S., Meyer E. // *Molecules.* 2018. V. 23. N 4. P. 1-48. DOI: 10.3390/molecules23040795.
5. Vicente J.P., García E.P., Chiva J.A., Durgbanshi A., Aranda E.O., Broch S.C., Bose D., Romero J.E. // *Microchem. J.* 2022. V. 177. P. 1-16. DOI: 10.1016/j.microc.2022.107309.
6. Arsène M.M.J., Davares A.K.L., Viktorovna P.I., Andreevna S.L., Sarra S., Khelifi I., Sergueïevn D.M. // *Veterin. World.* 2022. V. 15. N 3. P. 662-671. DOI: 10.14202/vet-world.2022.662-671.
7. Hu J., Ba Y., Pan Z., Li X. // *Heliyon.* 2024. V. 10. N 24. P. 1-16. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e40629.
8. Алсовейди А.К.М., Караваева О.А., Гулий О.И. // *Антибиотики и химиотер.* 2022. Т. 67. Вып. 1-2. С. 53-61. Alsoveydi A.K.M., Karavaeva O.A., Guliy O.I. // *Antibiot. Khimioter.* 2022. V. 67. N 1-2. P. 53-61 (in Russian). DOI: 10.37489/0235-2990-2022-67-1-2-53-61.
9. Кетруш Е.Ф., Мурсалов Р.К., Силаев Д.В., Русанова Т.Ю. // *Изв. Саратов. ун-в. Нов. сер. Сер.: Химия. Биология. Экология.* 2023. Т. 23. Вып. 4. С. 392-403. Ketrusch E.F., Mursalov R.K., Silaev D.V., Rusanova T.Yu. // *Izv. Saratov. Univ. Nov. ser. Ser: Khim., Biol., Ekol.* 2023. V. 23. N 4. P. 392-403 (in Russian). DOI: 10.18500/1816-9775-2023-23-4-392-403.
10. Belova D.D., Kharchenko E.N., Chaplygina O.S. // *J. Med. Chem. Sci.* 2022. V. 5. N 3. P. 385-392. DOI: 10.26655/JMCHEMSCI.2022.3.13.
11. Wang J., Ye K.X., Tian Y., Liu K., Liang L.L., Li Q.Q., Huang N., Wang X.T. // *Chin. J. Chromatogr.* 2023. V. 41. N 3. P. 241-249. DOI: 10.3724/SP.J.1123.2022.06004.
12. Tamayo F.G., Turiel E., Martín-Esteban A. // *J. Chromatogr. A.* 2007. V. 1152. N 1-2. P. 32-40. DOI: 10.1016/j.chroma.2006.08.095.
13. Vasapollo G., Sole R.D., Mergola L., Lazzoi M.R., Scardino A., Scorrano S., Mele G. // *Int. J. Molec. Sci.* 2011. V. 12. P. 5908-5945. DOI: 10.3390/ijms12095908.
14. Bahrani S., Ghaedi M., Hashemi S.A., Mousavi S.M. // *Interface Sci. Technol.* 2021. V. 33. P. 655-699. DOI: 10.1016/B978-0-12-818805-7.00002-3.
15. Baker Z.K., Sardari S. // *Iranian Biomed. J.* 2021. V. 25. N 2. P. 68-77. DOI: 10.29252/ibj.25.2.68.
16. Sajini T., Mathew B. // *Talanta Open.* 2021. V. 4. P. 1-20. DOI: 10.1016/j.talo.2021.100072.
17. Ellwanger A., Owens P.K., Karlsson L., Bayoud S., Cormack P., Sherrington D., Sellergren B. // *J. Chromatogr. A.* 2000. V. 897. N 1-2. P. 317-327. DOI: 10.1016/S0021-9673(00)00819-0.
18. Carballido L., Karbowiak T., Cayot P., Gerometta M., Sok N., Bou-Maroun E. // *Chem.* 2022. V. 8. N 9. P. 2330-2341. DOI: 10.1016/j.chempr.2022.05.021.
19. Gagliani F., Giulio T.D., Asif M.I., Malitesta C., Mazzotta E. // *Biosensors.* 2024. V. 14. N 7. P. 1-33. DOI: 10.3390/bios14070358.
20. Siddiqui M.R., Alothman Z.A., Wabaidur S.M., Khan M.A., Alam M.S., Ali M.S. // *J. Chilean Chem. Soc.* 2015. V. 60. N 2. P. 2869-2871. DOI: 10.4067/S0717-97072015000200001.
21. Nair A., Chandrashekhara H.R., Nayak U.Y. // *J. Appl. Pharmaceut. Sci.* 2024. V. 14. N 12. P. 098-112. DOI: 10.7324/JAPS.2024.192430.
22. Катаева Н.Н., Наронова Н.А., Голицына К.О., Белоконова Н.А., Шулепова К.Е. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2024. Т. 67. Вып. 7. С. 55-62. Kataeva N.N., Naronova N.A., Golitsyna K.O., Belokonova N.A., Shulepova K.E. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2024. V. 67. N 7. P. 55-62 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20246707.7018.
23. Бессонов М.И. Полиимиды – новый класс термостойких полимеров. Л.: Наука. 1983. 328 с. Bessonov M.I. Polyimides – a new class of heat-resistant polymers. L.: Nauka. 1983. 328 p. (in Russian).
24. Као Ньят Линь, Зяблов А.Н., Дуванова О.В., Селеменев В.Ф. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2020. Т. 63. Вып. 2. С. 71-76. Cao Nhat Linh, Zyablov A.N., Duvanova O.V., Selemenov V.F. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2020. V. 63. N 2. P. 71-76 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20206302.6071.
25. Зяблов А.Н., Хальзова С.А., Селеменев В.Ф. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2017. Т. 60. Вып. 7. С. 42-47. Zyablov A.N., Khalzova S.A., Selemenov V.F. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2017. V. 60. N 7. P. 42-47 (in Russian). DOI: 10.6060/tcct.2017607.5595.
26. Ву Хоанг Йен, Зяблов А.Н. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 10. С. 14-20. Vu Hoang Yen, Zyablov A.N. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2022. V. 65. N 10. P. 14-20 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226510.6584.
27. Ву Хоанг Йен, Косинков А.А., Данковцева А.Г., Фам Тхи Гам, Као Ньят Линь, Зяблов А.Н. // *Сорбц. и хроматограф. процессы.* 2023. Т. 23. Вып. 1. С. 56-61. Vu Hoang Yen, Kosinkov A.A., Dankovtseva A.G., Pham Thi Gam, Cao Nhat Linh, Zyablov A.N. // *Sorbts. Khromatogr. Protsessy.* 2023. V. 23. N 1. P. 56-61 (in Russian). DOI: 10.17308/sorpchrom.2023.23/10993.
28. Liu R., Guan Y., Chen L., Lian B. // *Front Microbiol.* 2018. V. 9. N 41. P. 1-9. DOI: 10.3389/fmicb.2018.00041.
29. Alcaide B., Aragoncillo C., Almendros P. 2.02 - Cephalosporins. In: Comprehensive Heterocyclic Chemistry III. Ed. by A.R. Katritzky, Ch.A. Ramsden, E.F.V. Scriven, R.J.K. Taylor. Elsevier. 2008. P. 111-171. DOI: 10.1016/B978-008044992-0.00202-9.
30. Нецкина О.В. Адсорбция из растворов на твёрдой поверхности. Новосибирск: РИЦ НГУ. 2015. 17 с. Netskina O.V. Adsorption from solutions on a solid surface. Novosibirsk: RITs NGU. 2015. 17 p. (in Russian).

Поступила в редакцию (Received) 25.04.2025

Принята к опубликованию (Accepted) 19.05.2025