



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 451.183

doi: 10.17308/sorpchrom.2024.24/12402

Некоторые закономерности сорбции фенилаланина и триптофана из одно- и двухкомпонентных растворов сверхсшитым сорбентом MN-150

**Оксана Николаевна Хохлова[✉], Владимир Юрьевич Хохлов,
Елизавета Романовна Каширцева, Ксения Эдуардовна Зайцева**

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, okxox@yandex.ru[✉]

Аннотация. Исследование сорбционных систем, в которых гидрофобные взаимодействия преобладают над полярными и, в результате, разделение компонентов возможно за счет различия взаимодействий неполярных частей веществ с матрицей сорбента представляет существенный научно-практический интерес.

Исследована сорбция аминокислот триптофана и фенилаланина и их смесей сверхсшитым сорбентом MN-150 в статических и динамических условиях. Установлено, что более гидрофобный триптофан поглощается лучше во всем исследуемом диапазоне концентраций, чем менее гидрофобный фенилаланин. При их совместной сорбции поглощение уменьшается для обоих веществ из-за конкуренции за сорбционные места в фазе MN-150. Установлено, что изотермы сорбции наилучшим образом описываются уравнением Фрейндлиха, в результате использования которого получены константы равновесия и величины предельной сорбции аминокислот.

При изучении сорбции индивидуальных фенилаланина и триптофана и их смеси в динамических условиях выявлено, что для достижения резких фронтов сорбцию необходимо проводить на слоях сорбента с высотой, превышающей 6 см, и при высоких концентрациях раствора (0.03 М). С использованием метода, основанного на применении асимптотического уравнения выходной кривой в случае стационарного фронта получены кинетические характеристики сорбции в исследуемых системах. Установлено внутридиффузионное лимитирование кинетики сорбции для обеих аминокислот. Найдены величины коэффициентов диффузии аминокислот в фазе сорбента, причем для фенилаланина они выше, чем для триптофана. При сорбции из двухкомпонентных растворов скорость движения каждого компонента в зерне увеличивается, что, связано с тем, что при внедрении в сорбент двух ароматических аминокислот значительно разрушается сетка водородных связей, и движение веществ становится быстрее. Исследована сорбция-десорбция смеси фенилаланин/триптофан сверхсшитым сорбентом MN-150 в динамических условиях. На стадии сорбции происходит поглощение обеих аминокислот, при этом вытекающий раствор обедняется лучше сорбирующимся триптофаном. На стадии десорбции водой сначала (до полного вымывания фенилаланина) вытекает раствор смеси аминокислот с преобладанием триптофана, а затем получают чистый раствор этой аминокислоты. Поскольку ионная форма сорбента остается неизменной, то регенерация сорбента не требуется, и для полного разделения компонентов процесс проводят циклически.

Ключевые слова: триптофан, фенилаланин, сверхсшитый сорбент, сорбция, равновесие, кинетика, динамика.

Для цитирования: Хохлова О.Н., Хохлов В.Ю., Каширцева Е.Р., Зайцева К.Э. Некоторые закономерности сорбции фенилаланина и триптофана из одно- и двухкомпонентных растворов сверхсшитым сорбентом MN-150 // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2024. Т. 24, № 4. С. 448-457. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12402>



Original article

Some sorption patterns of phenylalanine and tryptophan from one- and two-component solutions by super-crosslinked sorbent MN-150

Oksana N. Khokhlova[✉], Vladimir Yu. Khokhlov,
Elisaveta R. Kashirtseva, Kseniya E. Zaitseva

Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, okxox@yandex.ru[✉]

Abstract. At the moment, of significant scientific interest is the study of sorption systems where hydrophobic interactions prevail over polar interactions, which makes the separation of components possible due to the difference in interactions of nonpolar components with the sorbent matrix.

In our study, we investigated the sorption of tryptophan and phenylalanine amino acids and their mixtures by an MN-150 super-crosslinked sorbent under static and dynamic conditions. The study demonstrated that in the entire range of concentrations studied, tryptophan, being more hydrophobic, is absorbed better than phenylalanine, which is less hydrophobic. In a case of joint sorption, the absorption rate decreases for both compounds because of the competition for sorption sites in the MN-150 phase. The study demonstrated that the sorption isotherms are best described by the Freundlich equation. As a result, we obtained equilibrium constants and the values of the limiting sorption for the studied amino acids.

When studying the sorption of phenylalanine, tryptophan, and their mixture under dynamic conditions, we determined that sharp fronts can be ensured when the sorption is performed on the layers of sorbent thicker than 6 cm and with large concentrations of the solution (0.03 M). Using a method based on the asymptotic equation of the output curve, when the front was stationary, we obtained the kinetic characteristics of sorption in the studied systems. We also determined the intradiffusion limiting stage of the sorption kinetics for both amino acids. The study determined the diffusion coefficients of amino acids in the sorbent phase. The diffusion coefficient of phenylalanine was higher than that of tryptophan. When adsorbed from two-component solutions, the speed of each component in the grain increases, because when two aromatic amino acids are introduced into the sorbent, the grid of hydrogen bonds is significantly destroyed, and the compounds move faster. We investigated the sorption/desorption of a tryptophan-phenylalanine mixture by an MN-150 sorbent under dynamic conditions. During the sorption stage, both amino acids are absorbed, and the resulting solution is weakened by tryptophan, which is better absorbed. During the desorption stage, first a solution of amino acids with predominant tryptophan flows out (until phenylalanine is washed out completely). Then a pure tryptophan solution is obtained. Since the ionic form of the sorbent remains unchanged, there is no need for the regeneration of the sorbent. The process is cyclic and is performed until the complete separation of the components.

Keywords: tryptophan, phenylalanine, super-crosslinked sorbent, sorption, equilibrium, kinetics, dynamics.

For citation: Khokhlova O.N., Khokhlov V.Yu., Kashirtseva E.R., Zaitseva K.E. Some sorption patterns of phenylalanine and tryptophan from one- and two-component solutions by super-crosslinked sorbent MN-150. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2024. 24(4): 448-457. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12402>

Введение

В ионообменных сорбционных системах при закреплении вещества в фазе сорбента основными действующими силами являются кулоновские взаимодействия, и даже при необменном поглощении, при котором ионная форма сорбента остается неизменной, основными являются полярные ион-ионные, ион-дипольные и диполь-дипольные взаимодействия между противоионами ионообменника и полярным поглощаемым веществом. Гидрофобные же силы являются дополнительными [1]. Однако, при одинаковом

строении полярных группировок, с помощью которых происходит закрепление вещества в сорбенте, например, у аминокислот, сложно разделить последние на ионообменниках. Поэтому актуально исследовать сорбционные системы, в которых гидрофобные взаимодействия преобладают над полярными и, в результате, разделение компонентов будет возможно за счет различия взаимодействий гидрофобных частей веществ с матрицей сорбента. К таким поглотителям относятся сверхсшитые сорбенты на основе стирол-

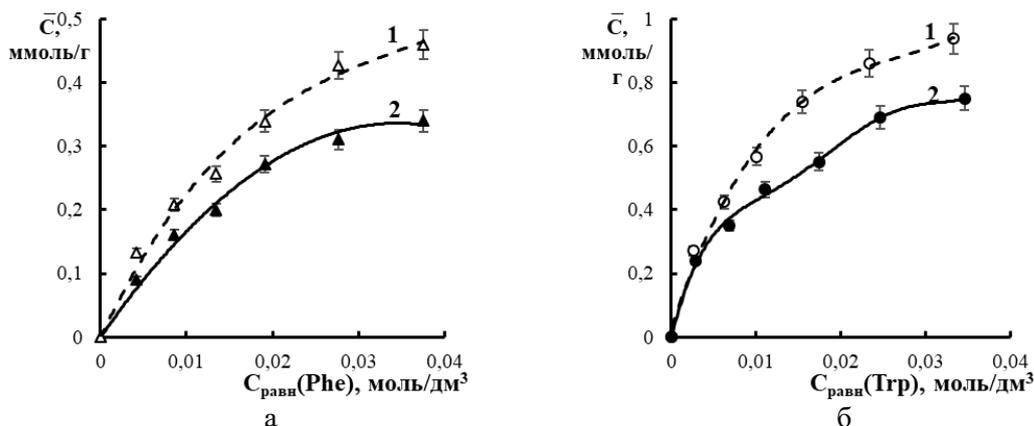


Рис. 1. Изотермы сорбции фенилаланина (а) и триптофана (б) из индивидуальных растворов (1) и смеси (2) сверхсшитым сорбентом MN-150

Fig. 1. Isotherms of sorption of phenylalanine (a) and tryptophan (b) from individual solutions (1) and their mixture (2) by a super-crosslinked sorbent MN-150

дивинилбензола [2-5]. Исследование подобных систем достаточно широко отражено в литературе, однако публикации в области сорбции и разделения аминокислот имеют ограниченный характер [6-11]. Поэтому цель работы – исследование сорбции гидрофобных аминокислот триптофана и фенилаланина сверхсшитым сорбентом MN-150 в статических и динамических условиях.

Экспериментальная часть

В работе использован сверхсшитый сорбент MN-150, который представляет собой полистирол, сшитый дивинилбензолом (150%) с развитой пористой структурой и высокой удельной поверхностью, содержащий небольшое количество анионообменных функциональных групп ($OE=0.86$ ммоль/г) [5]. Сорбцию гидрофобных аминокислот фенилаланина и триптофана проводили из водных индивидуальных и смешанных (1:1) растворов в статических и динамических условиях. Так как аминокислоты находятся в растворе в виде биполярного иона, а сорбент используется в солевой форме (Cl^-), то в данных системах реализуется необменное поглощение. Контроль за содержанием фенилаланина и триптофана в рас-

творе осуществляли спектрофотометрически при длинах волн 257 и 279 нм с учетом влияния на аналитический сигнал друг друга в смешанных растворах [12]. Содержание вещества в сорбенте рассчитывали по разнице концентраций в растворе до и после сорбции с учетом объема и массы контактирующих фаз.

Обсуждение результатов

Исследовано равновесие сорбции ароматических аминокислот фенилаланина и триптофана из индивидуальных и смешанных растворов сверхсшитым сорбентом MN-150 в Cl^- форме. На рисунке 1 представлены изотермы сорбции аминокислот, из которых видно, что в области исследуемых концентраций не происходит изменения хода изотерм, а, следовательно, изменения механизма сорбции. Закрепление аминокислот в фазе сорбента происходит за счет сочетания полярных взаимодействий между функциональными группами веществ и противоионами у функциональных групп сорбента и гидрофобных взаимодействий боковых радикалов аминокислот и матрицы сорбента. Показано, что более гидрофобный триптофан поглощается лучше во

Таблица 1. Результаты описания различными моделями изотерм сорбции фенилаланина и триптофана из индивидуальных растворов и их смесей

Table 1. Various approaches to the description of isotherms of sorption of phenylalanine and tryptophan from individual solutions and their mixtures

Сорбция из индивидуальных растворов								
Phe	Модель	R ²	C _∞ , ммоль/г	К	Трп	R ²	C _∞ , ммоль/г	К
	Ленгмюра	0.973	0.72	4.8·10		0.993	1.4	1.0·10 ²
	Фрейндлиха	0.992	1.7	3.3		0.988	2.0	5.6
	Темкина	0.968	1.1	1.5·10 ⁴		0.982	1.7	8.9·10 ³
Сорбция из смесей								
Phe	Модель	R ²	C _∞ , ммоль/г	К	Трп	R ²	C _∞ , ммоль/г	К
	Ленгмюра	0.988	0.53	4.9·10		0.975	1.1	8.6·10 ²
	Фрейндлиха	0.977	1.6	2.7		0.995	1.9	3.5
	Темкина	0.987	1.1	2.1·10 ⁴		0.967	1.4	1.2·10 ⁴

где C_∞ – величина предельной сорбции, ммоль/г; К – константа равновесия; R² – коэффициент достоверности аппроксимации.

всем исследуемом диапазоне концентраций, чем менее гидрофобный фенилаланин. При увеличении числа компонентов в системе сорбция уменьшается для обоих веществ из-за конкуренции за сорбционные места в фазе MN-150.

Для получения равновесных характеристик сорбции аминокислот проведена обработка экспериментальных данных, полученных в статических условиях, с использованием моделей Ленгмюра, Фрейндлиха и Темкина [13]. Изотермы построены в линейном виде ($y=kx+b$), который позволяет получить константы равновесия и значения предельной сорбции аминокислот [13], представленные в таблице 1.

Из таблицы 1 видно, что изотермы хорошо описываются моделями Ленгмюра и Фрейндлиха, поскольку R² близки к единице и приблизительно равны между собой. Однако необходимо отметить, что модель Ленгмюра описывает поглощение, при котором сорбционные центры энергетически однородны [13]. В случае использования сверхсшитого сорбента MN-150, имеющего ионогенные группы, реализуется закрепление аминокислот как за счет полярного, так и неполярного взаимодействия, описанного выше, по-

этому в дальнейшем использовались равновесные параметры сорбции, рассчитанные по модели Фрейндлиха.

Необходимо отметить, что сорбция обеих аминокислот из индивидуальных и смешанных растворов в исследуемом диапазоне концентраций меньше максимально возможного количества сорбционных мест, найденных по модели Фрейндлиха (C_∞). Кроме того, рассчитанная теоретическая предельная сорбция из смеси меньше, чем из индивидуальных растворов, что согласуется с экспериментальными данными и подтверждает конкуренцию аминокислот, отмеченную ранее.

Поскольку проведение разделения веществ удобнее проводить в колонке при перемещении фаз раствора и сорбента относительно друг друга, то изучена сорбция индивидуальных аминокислот фенилаланина и триптофана и их смеси в соотношении 1:1 на сверхсшитом сорбенте MN-150 в динамических условиях.

Внешний вид выходных кривых позволяет предварительно определить условия, наиболее подходящие для разделения аминокислот, и лимитирующую стадию сорбции (рис. 2 а). Для триптофана при сорбции в любых условиях наиболее размыт конечный участок кривой, что

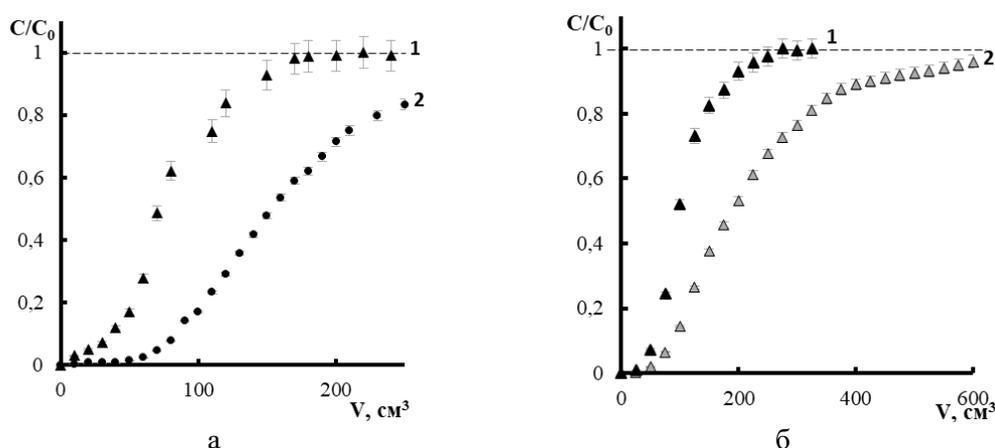


Рис. 2. Выходные кривые сорбции: а – фенилаланина (1) и триптофана (2) при совместном присутствии (1:1) и высоте слоя сорбента 6 см; б – фенилаланина из индивидуальных растворов при концентрациях 0.03 М (1) и 0.003 М (2).

Fig. 2. Output sorption curves: а – phenylalanine (1) and tryptophan (2) at a ratio of 1:1 and the height of the sorbent layer of 6 cm; б – phenylalanine from individual solutions with concentrations of 0.03 М (1) and 0.003 М (2).

свидетельствует, вероятно, о превалирующем вкладе внутридиффузионного лимитирования кинетики сорбции, что затрудняет достижение $C/C_0=1$, и связано со сложностью продвижения к сорбционным местам в глубине фазы сорбента. В случае фенилаланина выходные кривые менее размыты на обоих участках, и, вероятно, преобладает смешанно-диффузионный механизм кинетики.

Установлено влияние высоты слоя сорбента (при сохранении его общего количества) на вид выходных кривых. При сравнении результатов с использованием слоя высотой 3, 6 и 12 см, получено, что внешний вид выходных кривых для всех случаев остается практически неизменным, однако на более высоком слое (6 см) сорбция аминокислот на начальной стадии лучше, чем на низком (3 см), а дальнейшее увеличение высоты до 12 см не приводит к существенным изменениям выходных кривых, поэтому в дальнейшем использовали слой сорбента высотой 6 см.

Для выявления влияния концентрации на вид фронта сорбции получены выходные кривые фенилаланина из индивидуальных растворов при $C_0=0.003$ и 0.03 М

(рис. 2 б). При использовании разбавленных растворов выходная кривая размыта, особенно конечный участок, а при увеличении содержания аминокислоты в 10 раз фронт сорбции имеет резкий вид, что свидетельствует о целесообразности проведения процесса поглощения из растворов с высокой концентрацией. Потому далее сорбция фенилаланина и триптофана в динамических условиях проводилась при $C_0=0.03$ М.

На рис. 3 сравниваются выходные кривые сорбции ароматических аминокислот из индивидуальных и двухкомпонентных растворов ($h=6$ см, $C=0.03$ М). Из рисунков видно, что, как и в статических условиях, триптофан поглощается лучше фенилаланина. При добавлении в систему второго компонента сорбция аминокислот в смеси снижается и выходные кривые раньше выходят на плато.

Для получения кинетических характеристик сорбции фенилаланина и триптофана из одно- и двухкомпонентных растворов сверхсшитым сорбентом MN-150 использован метод, основанный на применении асимптотического уравнения выходной кривой в случае стационарного фронта [14, 15], позволяющий кривые S-

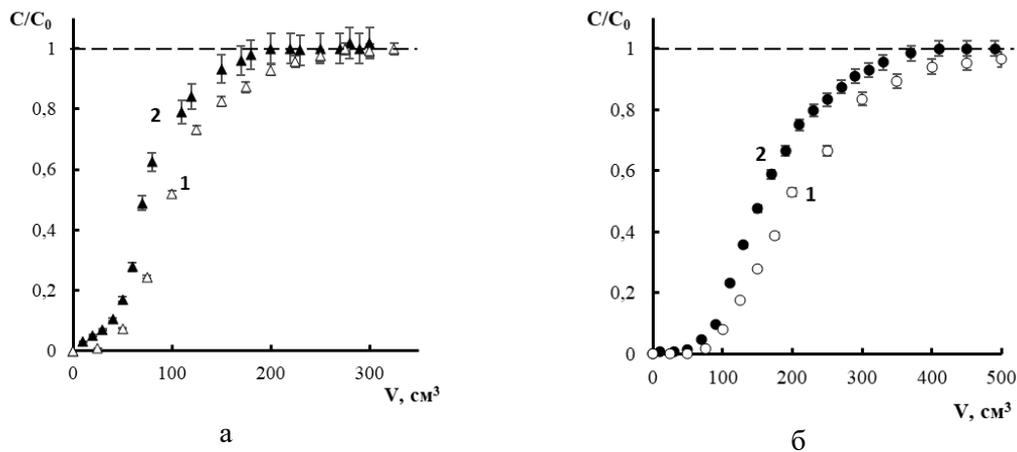


Рис. 3. Выходные кривые сорбции фенилаланина (а) и триптофана (б) из индивидуального раствора (1) и в смеси (2)

Fig. 3. Output sorption curves of phenylalanine (a) and tryptophan (b) from an individual solution (1) and a mixture (2)

образного вида привести к линейному путем использования уравнения (1):

$$V_{\text{экср}} = \frac{KE}{(1+\Theta)C_0} - \frac{ur_0^2}{12\bar{D}}(-\varphi)(\Theta, \eta, F), \quad (1)$$

где $V_{\text{экср}}$ – объем раствора, очищенного до заданного проскока, см^3 ; K – коэффициент равновесия; E – полная обменная емкость колонки, ммоль; u – скорость потока, $\text{см}^3/\text{с}$; \bar{D} – коэффициент диффузии вещества в зерне ионита, $\text{см}^2/\text{с}$; r_0 – радиус зерна сорбента, см ; φ – функция, определяемая системой уравнений:

$$\varphi(\Theta, \eta, F) = \ln \frac{f(1-f)}{1+\Theta(1-f)} - \frac{1+\eta}{\Theta} \ln \frac{f^{1+\Theta}}{1-f} + 1 - \eta + \frac{1+\Theta}{\Theta} \ln(1+\Theta) \quad (2)$$

$\Theta = (K-1)n_0$ – критерий подобия, характеризующий крутизну приведенной изотермы сорбции; $\eta = 4K/Vi[1+(K-1)n_0]$ – критерий подобия по совокупности определяющих параметров процесса; $F = C/C_0$ – концентрационное отношение (C и C_0 – текущая и исходная концентрации сорбтива, моль/ дм^3):

$$F = f - \frac{\Theta}{1+\eta} \frac{f(1-f)}{1+\Theta(1-f)} \quad (3)$$

$0 < f < 1$, f – степень отработанности поверхности зерен ионообменника для сечения колонки x , где x – расстояние от входа в слой колонки; n_0 – доля поглощаемого вещества в многокомпонентной системе; Vi – критерий, показывающий соотношение вкладов внутренней и внешней диффузии в кинетику сорбции.

Явная зависимость параметра f имеет вид:

$$f = \frac{2(1+\Theta)(1+\eta)F}{1+\eta(1+\Theta)+\Theta(1+\eta)+\{[1+\eta(1+\Theta)+\Theta(1+\eta)F]^2-4\Theta\eta(1+\Theta)(1+\eta)F\}^{1/2}} \quad (4)$$

Если изучаемая система однокомпонентная, то мольная доля иона в растворе $n_0 = 1$. Тогда $\Theta = K - 1$, $\eta = 4/Vi$, и уравнение (1) принимает вид:

$$V_{\text{экср}} = \frac{E}{C_0} - \frac{ur_0^2}{12\bar{D}}(-\varphi)(\Theta, \eta, F) \quad (5)$$

На основе проведенных расчетов получены линеаризованные выходные кривые в виде зависимости объема пропущенного раствора от функции $(-\varphi)$, представленные на рис. 4.

В таблице 2 приведены результаты расчетов кинетических характеристик сорбции ароматических аминокислот: емкость колонки по сорбируемому веществу, объем очищаемого раствора, диффузионный критерий Био и коэффициенты диффузии аминокислот в фазе сверхсшитого сорбента MN-150.

Большие значения Био свидетельствуют о внутридиффузионном лимитировании кинетики сорбции для обеих аминокислот; коэффициенты диффузии в сорбенте имеют малые величины, характерные для органических веществ [16, 17], и при прочих равных условиях выше для фенилаланина из-за того, что триптофан является более крупной и объемной молекулой. Интересно отметить, что при

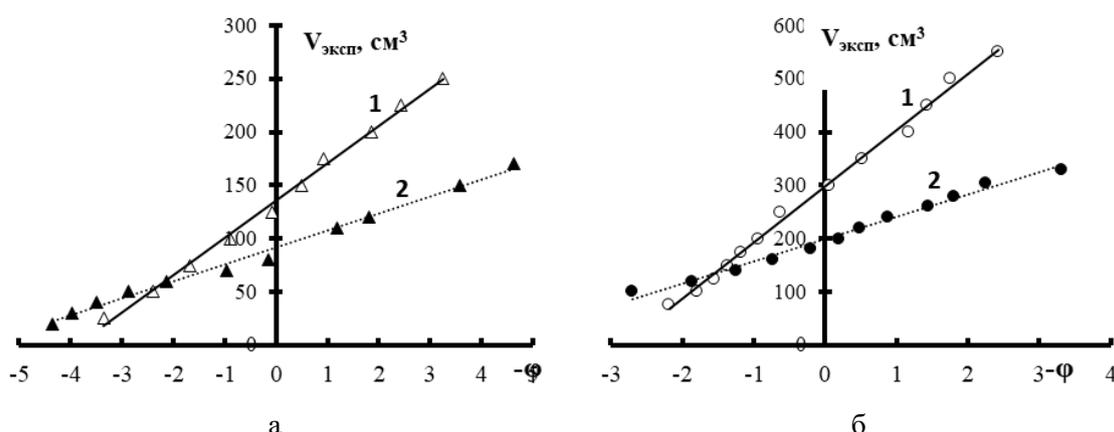


Рис. 4. Зависимость объема пропущенного раствора от функции $(-\phi)$ для сорбции: а – фенилаланина из индивидуального раствора (1) и в присутствии триптофана (2), б – триптофана из индивидуального раствора (1) и в присутствии фенилаланина (2)
 Fig. 4. Dependence of the volume of the solution on the function $(-\phi)$ for the sorption of: а – phenylalanine from an individual solution (1) and in the presence of tryptophan (2), б – tryptophan from an individual solution (1) and in the presence of phenylalanine (2)

Таблица 2. Кинетические характеристики сорбции фенилаланина и триптофана сверхсшитым сорбентом MN-150

Table 2. Kinetic characteristics of the sorption of phenylalanine and tryptophan by a super-cross-linked sorbent MN-150

Аминокислота	n_0 (мольная доля компонента)	V , см ³ Объем очищаемого раствора	E , ммоль/г	$V_i \cdot 10^3$	$\bar{D} \cdot 10^{-8}$, см ² /с
Phe	1	150	0.61	1.8	7.1
	0.5	90	0.42	1.2	16
Trp	1	300	1.35	2.2	2.4
	0.5	200	0.90	2.0	6.0

сорбции из двухкомпонентных растворов, при уменьшении количества поглощенных веществ скорость движения каждого компонента в зерне увеличивается, что, вероятно, связано с тем, что значительно разрушается сетка водородных связей в фазе сорбента при внедрении двух ароматических аминокислот.

С целью исследования возможности разделения аминокислот проведен цикл сорбции-десорбции смеси фенилаланин/триптофан сверхсшитым сорбентом MN-150 в динамических условиях. Разделение проводилось при использовании колонки с высотой слоя сорбента 6 см, концентрации аминокислот 0.03 М, соотношении компонентов в растворе 1:1, скорости пропускания раствора 2 см³/мин

и десорбции поглощенных веществ водой. На рис. 5 представлены выходные кривые сорбции-десорбции смеси фенилаланина и триптофана в описанных условиях.

На стадии сорбции происходит поглощение обеих аминокислот, при этом происходит обеднение вытекающего раствора лучше сорбирующимся триптофаном. На стадии десорбции водой на начальных стадиях (до полного вымывания фенилаланина) собирают раствор смеси аминокислот с преобладанием триптофана, а затем получают чистый раствор этой аминокислоты. Поскольку ионная форма сорбента остается неизменной, то регенерация сорбента не требуется, и для полного разделения компонентов процесс проводят циклически.

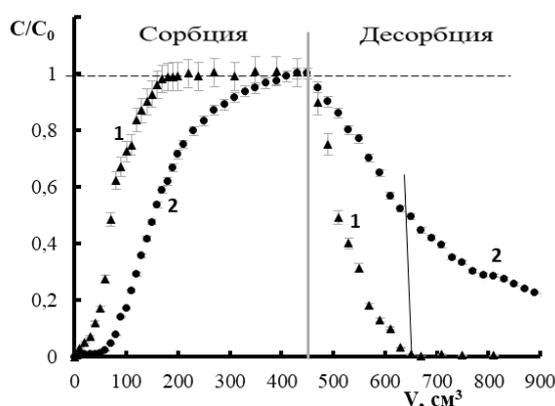


Рис. 5. Выходные кривые сорбции-десорбции смеси фенилаланина и триптофана на сверхсшитом сорбенте MN-150: 1 – фенилаланин, 2 – триптофан
Fig. 5. breakthrough curves of sorption-desorption of a mixture of phenylalanine and tryptophan on a super-crosslinked sorbent MN-150: 1 – phenylalanine, 2 – tryptophan

Заключение

Изучена сорбция ароматических аминокислот фенилаланина и триптофана сверхсшитым сорбентом MN-150 статических и динамических условиях. Установлено, что сорбция триптофана выше, чем сорбция фенилаланина, а поглощение из смеси меньше, чем из индивидуальных растворов из-за конкуренции за сорбционные места.

Получены равновесные и кинетические характеристики сорбции аминокислот сверхсшитым сорбентом MN-150. Установлено, что кинетика сорбции имеет внутридиффузионный характер. Установлено, что коэффициенты диффузии аминокислот в фазе сорбента при сорбции из двухкомпонентных растворов выше, по сравнению с однокомпонентными системами из-за, вероятно, значительного разрушения сетки водородных

связей при внедрении в сорбент двух ароматических аминокислот.

Установлено, что разделение смеси фенилаланин-триптофан на сверхсшитом сорбенте MN-150 целесообразно вести из концентрированных растворов, что обеспечивает более резкие фронты сорбции, и на высоких слоях сорбента $h > 6$ см. На стадии сорбции происходит обеднение вытекающего раствора лучше сорбирующимся триптофаном, а на стадии десорбции водой получают чистый раствор этой аминокислоты.

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. Хохлова О. N., Каширцева Е. R., Хохлов В. Ю., Трунаева Е. S. Квантово-химическое моделирование необменной сорбции аминокислот анионообменником AV-17. *Zhurnal fizicheskoy khimii*. 2021; 95(4): 581-587. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0044453721040130>
2. Davankov V.A. Rogozhin S.V., Cзыурупа М.Р. Novy`j podxod k sozdaniyu

ravnomerno sshity`x makrosetchaty`x polistirol`ny`x struktur. *Vy`sokomolekulyarny`e soedineniya*. 1973; 15(6): 463-465. (In Russ.)

3. Dmitrienko S.G. Primenenie sversshity`x polistirolov dlya koncentrirovaniya i razdeleniya organicheskix soedinenij i ionov e`lementov. *Zhurnal analiticheskoy khimii*. 2018; 73(11): 830-842. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0044450221060049>



4. Czyurupa M.P., Blinnikova Z.K., Pavlova L.A., Pastuxov A.V., Davankov V.A. Sverxsshitomu polistirolu polveka: ot netrivial'noj idei do promy`shlennoj realizatsii. *Laboratoriya i proizvodstvo*. 2020; 11(1): 86-96. (In Russ.) <https://doi.org/10.32757/2619-0923.2020.1.11.86.96>
5. Purolite : [Электронный ресурс]. URL : <http://www.purolite.com>. (Дата обращения: 29.04.2023).
6. Sholoxova A.Yu., Patrushev Yu.V., Eliseeva T.V. Sorbciya vanilina sverxsshity`m polistirol`ny`m sorbentom MN-202. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2018; 18(2): 197-202. (In Russ.) <https://doi.org/10.17308/sorp-chrom.2018.18/500>
7. Andreeva E.Yu., Dmitrienko S.G., Zolotov Yu.A. Sorbciya kofina i teorfillina na sverxsshitom polistirole. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 2. Ximiya*. 2010; 51(1): 48-52. (In Russ.)
8. Shkutina I.V., Mironenko N.V., Sarkisyan Z.M., Selemenev V.F. Usloviya adsorbtsionnoj immobilizatsii papaina na sverxsshity`x ionoobmennikax. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy`*. 2019; 19(4): 399-406. (In Russ.) <https://doi.org/10.17308/sorp-chrom.2019.19/778>
9. Valderrama C. Evaluation of polyaromatic hydrocarbon removal from aqueous solutions using activated carbon and hyper-crosslinked polymer (Macronet MN200). *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2009; (84): 236-245. <https://doi.org/10.1002/jctb.2030>
10. Platonov I.A., Novikova E.A., Onuchak L.A., Davankov V.A., Tsyurupa M.P., Pavlova L.A. Izuchenie sorbcii nitrobenzola sverxsshity`mi polistirol`ny`mi sorbentami. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy`*. 2010; 10(1): 25-34. (In Russ.)
11. Lyubimov S.E. The use of hyper-crosslinked polymer sorbents and composites based on them in the sorption of toxic and bad-smelling substances. *Russian Chemical Bulletin*. 2019; 68(8): 1599-1602. <https://doi.org/10.1007/s11172-019-2598-9>
12. Kaznacheev A.V., Xoxlova O.N., Selemenev V.F., Xoxlov V.Yu., Mokshina N.Ya. Spektrofotometricheskoe opredelenie aromatischeskix i geterociklicheskix aminokislot v ix smesyax. *Zhurnal analiticheskoy ximii*. 2000; 55: 375-377. (In Russ.)
13. Frolov Yu.G. Kurs kolloidnoj ximii. Poverxnostny`e yavleniya i dispersny`e sistemy`. Uchebnik dlya vuzov. Moskva, Ximiya Publ, 1988. 464 p. (In Russ.)
14. Slavinskaya G.V., Selemenev V.F., Xoxlova O.N., Kondrina O.Yu. Raschet vy`hodnoj krivoj dinamicheskoy sorbcii triptofana vy`sokoosnovny`m anionitom. *Zhurnal fizicheskoy ximii*. 2004; 78(8): 1475-1478. (In Russ.)
15. Korotkix O.I., Xoxlova O.N., Xoxlov V.Yu., Selemenev V.F. Prognozirovanie vida vy`hodny`x krivy`x sorbcii aminokislot nizkoosnovny`m anionoobmennikom AN-251. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2009; 9(5): 603-609. (In Russ.)
16. Kornienko T.S., Bondareva L.P., Zagorul`ko E.A., Gapeev A.A., Gajvoronskaya N.N. Opredelenie koefficientov diffuzii ionov metallov i aminokislot v faze makroporistogo kompleksobrazuyushhego ionoobmennika. *Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. Ximiya i ximicheskaya texnologiya*. 2014; 57(10): 62-65. (In Russ.)
17. Xoxlova O.N. Nekotory`e osobennosti neobmennoj sorbcii aromatischeskix aminokislot nizkoosnovny`mi anionoobmennikami v dinamicheskix usloviyax I. Vliyanie uslovij provedeniya sorbcii. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy`*. 2012; 12(2): 223-230. (In Russ.)
18. Wang Q., Chen G.Q., Kentish S.E. Sorption and diffusion of organic acid ions in anion exchange membranes: Acetate and lactate ions as a case study // *Journal of Membrane Science*. 2020; 614(15): 118534. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118534>



Информация об авторах / Information about the authors

О.Н. Хохлова – к.х.н., доцент кафедры аналитической химии, химический факультет, Воронежский Государственный Университет, Воронеж, Россия

В.Ю. Хохлов – д.х.н., профессор кафедры аналитической химии, химический факультет, Воронежский Государственный Университет, Воронеж, Россия

Е.Р. Каширцева – аспирант химический факультет, Воронежский Государственный Университет, Воронеж, Россия

К.Э. Зайцева – химический факультет, Воронежский Государственный Университет, Воронеж, Россия

O.N. Khokhlova – associate professor, department of analytical chemistry, chemical faculty, Voronezh State University, Voronezh, Russia, e-mail: okxox@yandex.ru

V.Yu. Khokhlov – professor, department of analytical chemistry, faculty of chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russia, e-mail: vladkh70@mail.ru

E.R. Kashirtseva – graduate student department of analytical chemistry, faculty of chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russia, e-mail: kashirtseva_e@mail.ru

K.E. Zaitseva – department of analytical chemistry, faculty of chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russia, e-mail: ksse-nia.zay@gmail.com

Статья поступила в редакцию 20.05.2024; одобрена после рецензирования 22.06.2024; принята к публикации 05.07.2024.

The article was submitted 20.05.2024; approved after reviewing 22.06.2024; accepted for publication 05.07.2024.