



## ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 451.183

doi: 10.17308/sorpchrom.2023.23/11575

### **Влияние температуры на необменную сорбцию ароматических аминокислот анионообменником АВ-17-8**

**Светлана Александровна Лисицына<sup>✉</sup>,**

**Оксана Николаевна Хохлова, Владимир Юрьевич Хохлов**

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, lisitsyna\_2000@mail.ru<sup>✉</sup>

**Аннотация.** Исследовалось равновесие в системах ароматическая аминокислота (триптофан, фенилаланин, тирозин и гистидин) – анионообменник АВ-17-8 (Cl<sup>-</sup>) при различных температурах. Температурный интервал составлял 277-343 К для выявления влияния как повышенной, так и пониженной температуры на сорбционное равновесие. Изотермы сорбции получены при 277, 293 и 343 К. Термодинамическое описание сорбционных систем проводилось с использованием подхода, основанного на представлении о стехиометричности процесса сорбции. Рассчитаны интегральные и дифференциальные энергетические характеристики, компенсационный эффект между энтальпийной и энтропийной составляющими для рассматриваемых сорбционных систем. Изменение температуры приводит к изменению физико-химических свойств исследуемых сорбатов и сорбента. В диапазоне температур 277-243 К содержание растворителя в фазе сорбента практически не изменяется. Экспериментально установлено низкое содержание растворителя при температуре 333 К и увеличение его количества при 343 К. Учитывалось, что при различных температурах происходит изменение констант ионизации функциональных групп и областей существования ионных форм аминокислот, но изменения механизма сорбции не происходит, поскольку не происходит перезарядки аминокислот.

Установлено, что для триптофана и фенилаланина процесс является экзотермическим. С повышением температуры происходит снижение количества сорбированного вещества. Энергия поглощения невелика за счет выраженного компенсационного эффекта энтальпийного и энтропийного факторов, дифференциальная энергия Гиббса практически не зависит от температуры за счет стабилизирующего действия гидрофобных сил в фазе сорбента. Для малорастворимой аминокислоты тирозина при повышении температуры от 277 до 293 К наблюдается незначительное увеличение сорбции, а при дальнейшем повышении – падение до следовых количеств. В интервале температур 277-293 К процесс сорбции характеризуется формированием пересыщенного раствора в фазе сорбента и является эндотермическим. Сорбции гидрофильного гистидина увеличивается при повышении температуры, что коррелирует с содержанием растворителя в фазе сорбента, в том числе с низким содержанием при 333 К. Процесс сорбции гистидина является эндотермическим, характеризуется сильной зависимостью дифференциальной энергии Гиббса от температуры и отсутствием компенсационного эффекта между энтальпийной и энтропийной составляющими.

**Ключевые слова:** необменная сорбция, температура, ароматические аминокислоты, дифференциальная энергия Гиббса, энтальпия, энтропия.

**Для цитирования:** Лисицына С.А., Хохлова О.Н., Хохлов В.Ю. Влияние температуры на необменную сорбцию ароматических аминокислот анионообменником АВ-17-8 // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2023. Т. 23, № 4. С. 681-690. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11575>

Original article

### **Influence of temperature on non-exchange sorption of aromatic amino acids by anion exchanger AV-17-8**

**Svetlana A. Lisitsyna<sup>✉</sup>, Oksana N. Khokhlova, Vladimir Yu. Khokhlov**

Voronezh State University, Voronezh, Russia, lisitsyna\_2000@mail.ru<sup>✉</sup>

**Abstract.** The equilibrium in thearomatic amino acid (tryptophan, phenylalanine, tyrosine and histidine) – anion exchanger AV-17-8 (Cl<sup>-</sup>) systems at different temperatures was investigated. In order to identify the influence of both increased and decreased temperatures on the sorption equilibrium the temperature range was 277-343 K was studied. Sorption isotherms were obtained at 277, 293, and 343 K. The thermodynamic description of sorption systems was carried out using an approach based on the idea that the sorption process is stoichiometric. The integral and differential energy characteristics and the compensation effect between the enthalpy and entropy components for the studied sorption systems were calculated.

A change in temperature led to a change in the physicochemical properties of the studied sorbates and sorbent. In the temperature range 277-243 K, the solvent content in the sorbent phase remained unchanged. A low solvent content at a temperature of 333 K and an increase in its amount at 343 K were experimentally established. It should be considered that at different temperatures the ionization constants of functional groups and the regions of existence of ionic forms of amino acids change, but the sorption mechanism does not change, since the recharging of amino acids did not occur.

It was established that the process is exothermic for tryptophan and phenylalanine. With increasing temperature, the amount of sorbed substance decreased. The absorption energy was low due to the significant compensatory effect of enthalpy and entropy factors, the differential Gibbs energy was practically independent of temperature due to the stabilizing effect of hydrophobic forces in the sorbent phase. For the poorly soluble amino acid tyrosine, when the temperature increased from 277 to 293 K, a slight increase in sorption was observed, and with a further increase, a decrease to trace amounts was revealed. In the temperature range of 277-293 K, the sorption process was characterized by the formation of a supersaturated solution in the sorbent phase and was endothermic. The sorption of hydrophilic histidine increased with increasing temperature, which correlates with the solvent content in the sorbent phase, including low content at 333 K. The process of histidine sorption is endothermic, characterized by a strong dependence of the differential Gibbs energy on temperature and the absence of a compensation effect between the enthalpic and entropic components.

**Keywords:** non-exchange sorption, temperature, aromatic amino acids, differential Gibbs energy, enthalpy, entropy.

**For citation:** Lisitsyna S.A., Khokhlova O.N., Khokhlov V.Yu. Influence of temperature on non-exchange sorption of aromatic amino acids by anion exchanger AV-17-8. *Sorbtionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2023. 23(4): 681-690. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11575>

## Введение

Температура является одним из самых важных факторов, действующих на сорбционное равновесие. Знание результатов этого воздействия позволяет найти энергетические характеристики сорбции, оптимальные условия разделения веществ и организовать безреагентное двухтемпературное разделение. Поэтому исследование действия температуры на поглощение веществ сорбентами различной природы является актуальной задачей химии сорбционных процессов. Целью работы являлось исследование влияния температуры на необменную сорбцию ароматических аминокислот триптофана, фенилаланина, тирозина и гистидина анионообменником АВ-17-8 в Cl<sup>-</sup> форме.

## Экспериментальная часть

Сорбцию проводили в статических условиях методом переменных концентраций. Содержание аминокислот в рас-

творе контролировали спектрофотометрически при длине волны 211 нм для гистидина, 257 нм для фенилаланина, 275 нм для тирозина и 279 нм для триптофана. Содержание цвиттерлитов в фазе сорбента находили как разность концентраций в растворе до и после сорбции с учетом объема и массы контактирующих фаз.

Исследуемые аминокислоты являются моноаминомонокарбоновыми, имеющими ароматический боковой радикал. В водном растворе, за исключением гистидина, аминокислоты находятся в виде биполярного иона, что в совокупности с использованием солевой Cl<sup>-</sup> формы анионообменника обуславливает протекание необменной сорбции.

Температурный интервал составлял 277-343 К для выявления влияния как повышенной, так и пониженной температуры на сорбционное равновесие. Для термодинамического описания получены изотермы сорбции при 277, 293 и 343 К.

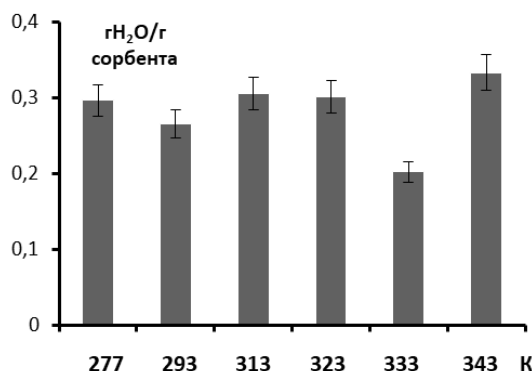


Рис. 1. Содержание растворителя в анионообменнике АВ-17-8 при различной температуре

Fig. 1. Solvent content in the AV-17-8 anion exchanger at different temperatures

### Обсуждение результатов

Аминокислоты при необменной сорбции закрепляются в сорбенте преимущественно за счет образования водородных связей между гидратными оболочками противоиона анионообменника и гидратными оболочками функциональных групп аминокислоты, а также за счет ион-дипольных взаимодействий между противоионами сорбента и аминокислотой, и гидрофобных взаимодействий радикалов с матрицей сорбента [1, 2].

Температура действует на всех участников сорбционной системы и взаимодействия между ними, а, в первую очередь, на состояние растворителя. Анионит АВ-17-8 является гелевым, т.е. вода в фазе сорбента входит в состав гидратных оболочек функциональных групп и противоионов, достаточно сильно удерживается ион-дипольными взаимодействиями, и считается, что «свободной» воды в сорбенте практически нет [3]. Это приводит к тому, что как при повышении, так и при понижении температуры количество воды в сорбенте остается практически постоянным (рис.1). Изменение конфигурации полимерных цепей сорбента с изменением температуры незначительно, поскольку они достаточно сильно сшиты дивинилбензолом. Незначительный рост

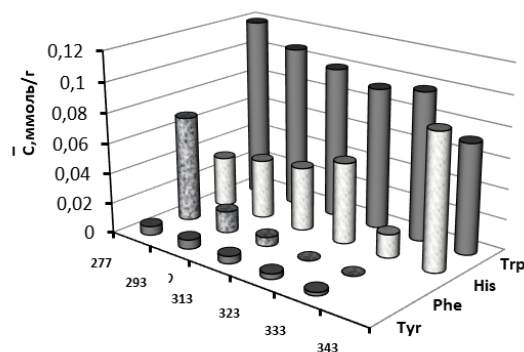


Рис. 2. Содержание аминокислот в сорбенте при различной температуре при  $C_p=0.02$  моль/дм<sup>3</sup> (0.0015 моль/дм<sup>3</sup> для тирозина)

Fig. 2. Content of amino acids in the sorbent at different temperatures at  $C_R=0.02$  mol/dm<sup>3</sup> (0.0015 mol/dm<sup>3</sup> for tyrosine)

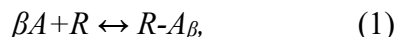
содержания растворителя, связанный с этим фактором, наблюдается при 343 К. Пониженное содержание растворителя в фазе сорбента обнаружено при 333 К. Эти данные воспроизводятся и совпадают с литературными [4].

Влияние температуры на состояние аминокислот заключается в изменении констант ионизации функциональных групп. При этом изменяется область рН существования ионных форм, в частности, цвиттерионов, но механизм сорбции остается прежним, поскольку перестройка аминокислот не происходит [5].

Сорбция триптофана, фенилаланина и гистидина при концентрации раствора 0.02 моль/дм<sup>3</sup> и тирозина при 0.0015 моль/дм<sup>3</sup> при различных температурах представлена на рисунке 2. Для гидрофобных аминокислот поглощение падает с повышением температуры, а для гидрофильного гистидина растет. Эта зависимость коррелирует с содержанием воды в фазе сорбента. Однако, для каждой аминокислоты имеются свои особенности. Это целесообразно рассматривать совместно с анализом изменения термодинамических характеристик сорбции при различных температурах.

Термодинамическое описание рассматриваемых систем проводилось с при-

менением подхода, основанного на представлениях о стехиометричности процесса сорбции, и подробно описанного в работах [6, 7]. Процесс сорбции вещества  $A$  представляют как



сорбционными центрами  $R$  являются функциональные группы с противоионами, коэффициент стехиометрии  $\beta$  в рассматриваемых системах равен единице. Представляет интерес нахождение дифференциальных энергетических характеристик, относящихся к фазе сорбента определенного состава, из активностей сорбируемого вещества в фазе равновесного раствора по формулам:

$$\Delta G_n = RT \ln a_A^{\beta}, \quad (2)$$

$$\Delta H_{\bar{n}} = \frac{RT_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{a_{A, T_1, \bar{n}}^{\beta}}{a_{A, T_2, \bar{n}}^{\beta}}. \quad (3)$$

Сорбция самого гидрофобного триптофана наименее зависит от действия температуры (рис. 2), поскольку для него характерно стабилизирующее гидрофобное взаимодействие радикала с матрицей сорбента. Дифференциальная энергия Гиббса в процессе сорбции этой аминокислоты уменьшается в диапазоне 7-15 кДж/моль. Необходимо отметить, что эти величины практически не отличаются при различных температурах (рис. 3 б), что вероятно, связано с компенсацией противоположно направленных эффектов разрыхления водородных связей [8] и усиления гидрофобного взаимодействия

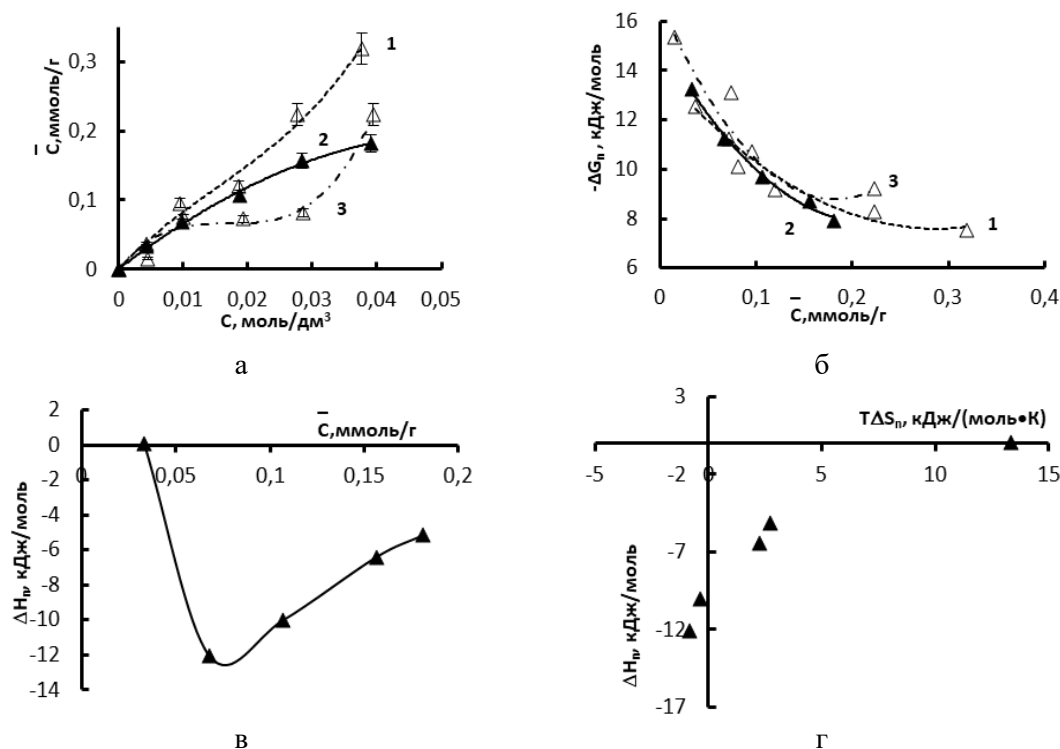


Рис. 3. Закономерности изменения характеристик необменной сорбции триптофана на анионообменнике АВ-17-8 (Cl) при различных температурах (1 – 277 К, 2 – 293 К, 3-343 К). а – изотермы сорбции, б – изменение дифференциальных энергий Гиббса, в – изменение дифференциальной энтальпии, г – компенсационный эффект между энтальпийным и энтропийным фактором

Fig. 3. Patterns of changes in the characteristics of non-exchange sorption of tryptophan on an AV-17-8 (Cl) anion exchanger at different temperatures (1 – 277 K, 2 – 293 K, 3-343 K). а – sorption isotherms, б – change in differential Gibbs energies, в – change in differential enthalpy, г – compensation effect between enthalpy and entropy factors

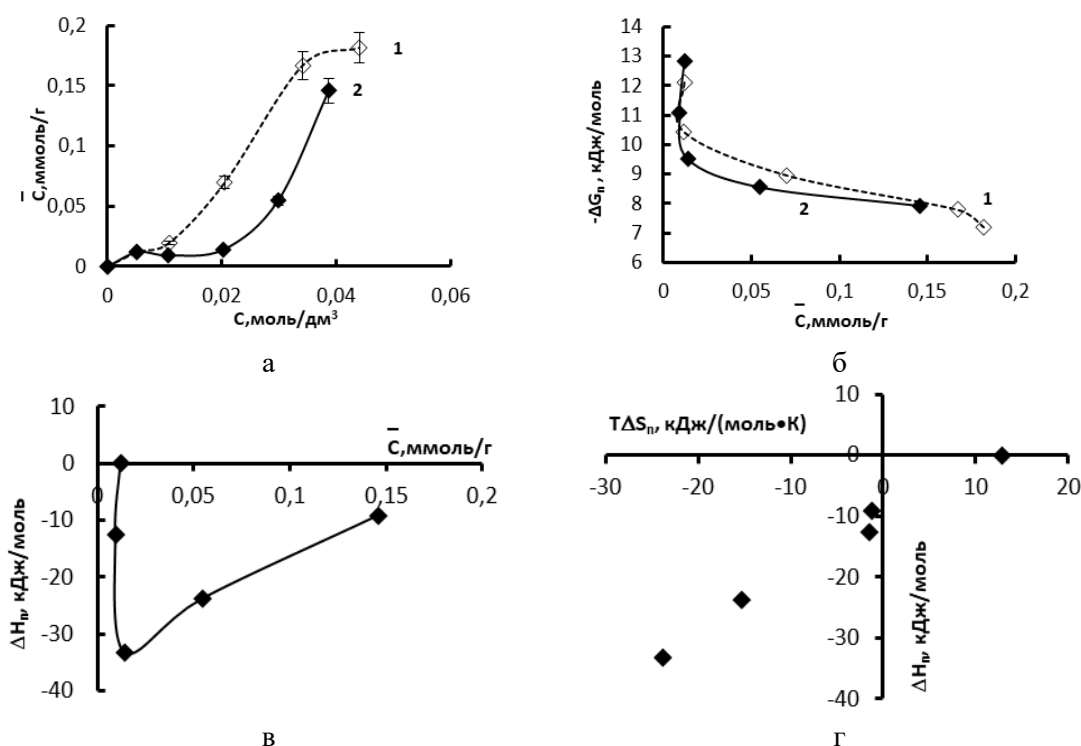


Рис. 4. Закономерности изменения характеристик необменной сорбции фенилаланина на анионообменнике АВ-17-8 (Cl) при различных температурах (1 – 277 К, 2 – 293 К). а – изотермы сорбции, б – изменение дифференциальных энергий Гиббса, в – изменение дифференциальной энтальпии, г – компенсационный эффект между энтальпийным и энтропийным фактором

Fig. 4. Patterns of changes in the characteristics of non-exchange sorption of phenylalanine on an AV-17-8 anion exchanger (Cl) at different temperatures (1 – 277 K, 2 – 293 K). a – sorption isotherms, b – change in differential Gibbs energies, c – change in differential enthalpy, d – compensation effect between enthalpy and entropy factors

[9, 10] при повышении температуры. Такое явление характерно и для других гидрофобных аминокислот.

Энтальпия необменной сорбции триптофана имеет отрицательные значения и проходит через минимум. Внедрение малых количества вещества в сорбент не приводит к значимым тепловым эффектам, при повышении концентрации экзотермичность нарастает, а затем уменьшается (рис. 3 в). Это, по-видимому, обусловливается сочетанием ряда факторов таких как регидратация сорбата, изменение структуры раствора в фазе сорбента, связывание с сорбционными центрами и дополнительное взаимодействие с матрицей. Выделение тепла компенсируется уменьшением энтропии за счет

связывания аминокислоты в фазе анионообменника и упорядочивания системы при этом (рис. 3 г).

Для мицеллообразующего фенилаланина [11, 12] сорбция резко падает при возрастании температуры и выше 323 К не протекает (рис. 2). Это связано с тем, что для нейтральных поверхностно-активных веществ, каким и является фенилаланин, характерно смешение ККМ в область меньших концентраций [13], следовательно, мицеллообразование в растворе при повышенных температурах в системах с фенилаланином преобладает над распределением в фазу сорбента. Поэтому при термодинамическом описании рассматривается интервал температур от 277 до 293 К.

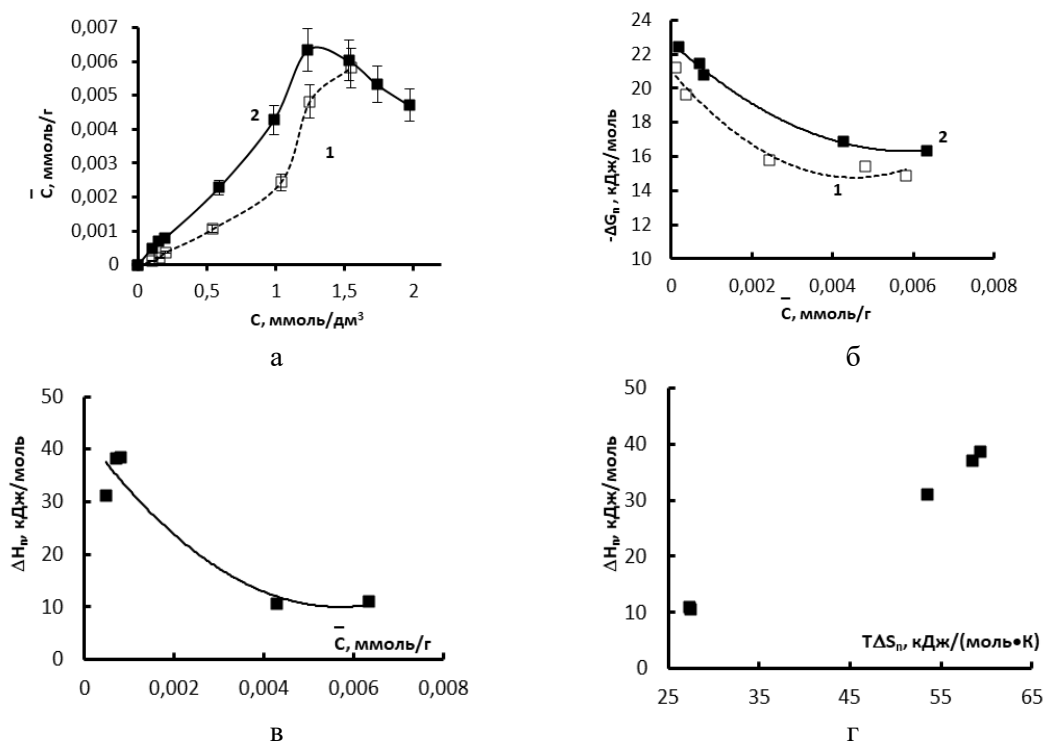


Рис. 5. Закономерности изменения характеристик необменной сорбции тирозина на анионообменнике АВ-17-8 (СI) при различных температурах (1 – 277 К, 2 – 293 К). а – изотермы сорбции, б – изменение дифференциальных энергий Гиббса, в – изменение дифференциальной энтальпии, г – компенсационный эффект между энтальпийным и энтропийным фактором

Fig. 5. Patterns of changes in the characteristics of non-exchange sorption of tyrosine on an AV-17-8 anion exchanger (CI) at different temperatures (1 – 277 K, 2 – 293 K). а – sorption isotherms, б – change in differential Gibbs energies, с – change in differential enthalpy, д – compensation effect between enthalpy and entropy factors

В целом, изменение дифференциальной энергии Гиббса, энтальпии и компенсационный эффект между энтальпийным и энтропийным фактором аналогичны закономерностям, полученным в системе с триптофаном.

Тирозин является самой малорастворимой из рассматриваемых аминокислот. Для него характерно повышение сорбции от 277 до 293 К (рис. 5), а затем при росте температуры падение до следовых количеств (рис. 2). Поэтому при термодинамическом описании рассматривается интервал температур 277-293 К. В этом температурном и концентрационном интервале процесс является эндотермическим, ход изменения дифференциальной энтальпии имеет обратный характер по сравнению с

предыдущими аминокислотами, а величины дифференциальных энергий Гиббса имеют большие значения и зависят от температуры. Это объясняется формированием пересыщенного раствора в фазе сорбента и уменьшением стабилизирующего влияния гидрофобных взаимодействий.

Гистидин является самой гидрофильной из рассматриваемых аминокислот. Кроме того, в водном растворе он находится в виде однозарядного катиона, поэтому его поведение отличается от гидрофобных аминокислот, а именно, характерен рост сорбции с повышением температуры, что коррелирует с содержанием растворителя в фазе сорбента, в том числе с аномальным содержанием при

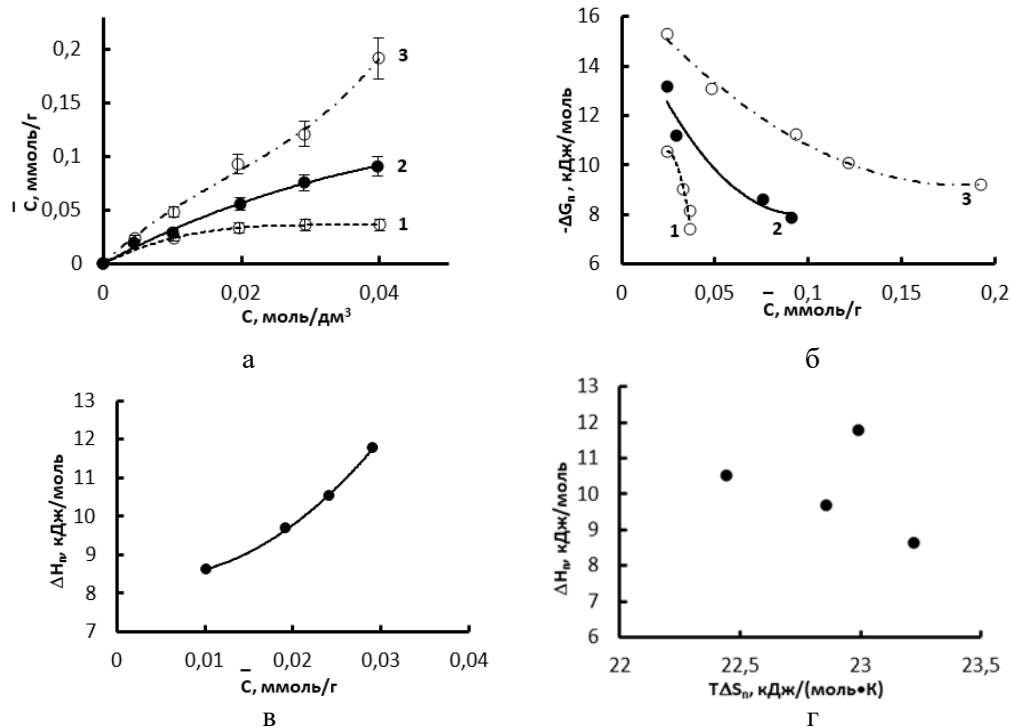


Рис. 6. Закономерности изменения характеристик необменной сорбции гистидина на анионообменнике АВ-17-8 (Cl) при различных температурах (1 – 277 К, 2 – 293 К, 3-343 К). а – изотермы сорбции, б – изменение дифференциальных энергий Гиббса, в – изменение дифференциальной энтальпии, г – компенсационный эффект между энтальпийным и энтропийным фактором

Fig. 6. Patterns of changes in the characteristics of non-exchange sorption of histidine on an AV-17-8 (Cl) anion exchanger at different temperatures (1 – 277 K, 2 – 293 K, 3-343 K). a – sorption isotherms, b – change in differential Gibbs energies, c – change in differential enthalpy, d – compensation effect between enthalpy and entropy factors

Таблица. Интегральные характеристики сорбции аминокислот анионообменником АВ-17-8  
 Table. Integral characteristics of amino acid sorption by an AV-17-8 anion exchanger

	T, К	K <sub>A</sub>	ΔG, Дж/моль	ΔH, кДж/моль	TΔS, кДж/моль
Триптофан	277	1.31	-613	-1.51	-0.90
	293	1.13	-304		-1.21
	343	1.12	-323		-1.19
Фенилаланин	277	1.06	-137	-2.15	-2.02
	293	1.01	-20.1		-2.13
Тирозин	277	1.00	-0.41	0.98	0.09
	293	1.01	-6.12		0.10
Гистидин	277	0.97	71.9	1.17	1.10
	293	1.03	-73.8		1.25
	343	1.08	-215		1.39

333 К. Процесс является эндотермическим, характеризуется отсутствием компенсационного эффекта между энтальпийным и энтропийным фактором и сильной зависимостью энергии Гиббса от температуры (рис. 5). Это связано, вероятно, с потерей части воды гидратных

оболочек при переходе из фазы раствора в фазу сорбента и отсутствием стабилизирующего эффекта гидрофобных взаимодействий.

Интегральные энергетические характеристики сорбции аминокислот в исследуемых



двух температурных интервалах анионообменником АВ-17-8 приведены в таблице.

Как видно из таблицы сорбция аминокислот протекает самопроизвольно, но энергия поглощения невелика в силу рассмотренного компенсационного эффекта между энтальпийным и энтропийным фактором; наблюдается переход от экзотермического к эндотермическому процессу по мере нарастания гидрофильности аминокислоты.

### Заключение

Таким образом, рассмотрено влияние температуры на поглощение ароматических аминокислот (триптофан, фенилаланин, тирозин, гистидин) анионообменником АВ-17-8, рассчитаны энергии Гиббса, энтальпии и энтропии необменной

### Список литературы

1. Трунаева Е.С., Хохлова О.Н., Хохлов В.Ю. Компьютерное моделирование межчастичных взаимодействий в фазе анионообменника при необменной сорбции аминокислот // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2018. Т. 18, № 2. С. 142-149.
2. Хохлова О.Н., Каширцева Е.Р., Трунаева Е.С. Хохлов В.Ю. Квантово-химическое моделирование необменной сорбции аминокислот анионообменником АВ-17 // *Журнал физической химии*. 2021. Т. 95, № 4. С. 581-587.
3. Практикум по ионному обмену : учеб. пособие / В.Ф. Селеменев, Г.В. Славинская, В.Ю. Хохлов. Воронеж. гос. ун-т, 2004. 160 с.
4. Рудакова Л.В., Селеменев В.Ф., Рудаков О.Б., Кудухова И.Г., Никитина С.Ю. Влияние температуры на характер равновесного набухания полимерных гранул в воде и этаноле // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2013. Т. 13, Вып. 5. С. 676-686.
5. Хохлов В.Ю., Селеменев В.Ф., Хохлова О.Н., Загородний А.А. Ионные равновесия в растворах аминокислот при

сорбции. Установлено, что для гидрофобных аминокислот поглощение падает с повышением температуры и характеризуется наличием компенсационного эффекта между энтальпийным и энтропийным фактором; для гидрофильного гистидина сорбция растет, а компенсационный эффект отсутствует. Показано, что по мере нарастания гидрофильности аминокислоты наблюдается переход от экзотермического к эндотермическому процессу сорбции.

### 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.

различных температурах // *Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Химия. Биология. Фармация*. 2003. № 1. С. 18-22.

6. Хохлова О.Н. Термодинамическое описание сверхэквивалентной сорбции ионообменниками. Теоретические основы // *Журнал физической химии*. 2014. Т. 88, № 7-8. С. 1243-1246.

7. Трунаева Е.С., Хохлова О.Н., Хохлов В.Ю. Термодинамическое описание необменной сорбции веществ ионообменниками // *Журнал физической химии*. 2018. Т. 92, № 12. С. 1920-1924.

8. Dougherty R.C. Temperature and pressure dependence of hydrogen bond strength: A perturbation molecular orbital approach // *J. Chem. Phys.* 1998. Vol. 109. P. 7372-7378.

9. Wen-Yih Chen, Hsiang-Ming Huang, Chien-Chen Lin, Fu-Yung Lin, Yu-Chia Chan. Effect of temperature on hydrophobic interaction between proteins and hydrophobic adsorbents: studies by isothermal titration calorimetry and the Van't Hoff equation // *Langmuir*. 2003. Vol. 19, no 22. P. 9395-9403.





10. Schellman J.A. Temperature, stability, and the hydrophobic interaction // *Biophys J.* 1997. Vol. 73(6). P. 2960-2964.

11. Хохлова О.Н., Селеменов В.Ф., Кузнецова Л.В., Хохлов В.Ю. Необменная сорбция фенилаланина низкоосновными анионитами // *Журнал физической химии.* 2001. Т. 75, № 11. С. 2011-2015.

12. Трунаева Е.С., Хохлова О.Н., Хохлов В.Ю. Квантово-химическое моделирование гидратации и ассоциации фенилаланина в растворе // *Журнал структурной химии.* 2015. Т. 56, № 6. С. 1111-1115.

13. Буканова Е.Ф. Коллоидная химия ПАВ. Часть 1. Мицеллообразование в растворах ПАВ : учеб. пособие / Е.Ф. Буканова. М. : МИТХТ им. М.В. Ломоносова, 2006. 81 с.

### References

1. Trynaeva E.S., Khokhlova O.N., Khokhlov V.Yu. Komp'yuternoe modelirovanie mezchastichnyh vzaimodeystvij v faze anionoobmennika pri neobmennoj sorbcii aminokislot. *Sorbtionnyye i khromatograficheskie protsessy.* 2018; 18(2): 142-149. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2018.18/493> (In Russ.)

2. Khokhlova O.N., Kashirtseva E.R., Khokhlov V.Yu., Trynaeva E.S. Kvantovo-himicheskoe modelirovanie neobmennoj sorbcii aminokislot anionoobmennikom AV-17. *ZHurnal fizicheskoy himii.* 2021; 95(4): 762-768. <https://doi.org/10.31857/S0044453721040130> (In Russ.)

3. Praktikum po ionnomu obmenu / Selemenev V.F., Slavinskaya G.V., Khokhlov V.Yu. Voronezh, VGU, 2004, 180 p. (In Russ.)

4. Rudakova L.V., Selemenev V.F., Rudakov O.B., Kudukhova I.G., Nikitina S.Yu. Vliyaniye temperatury na harakter ravnovesnogo nabuhaniya polimernykh granul v vode i etanole. *Sorbtionnyye i khromatograficheskie protsessy.* 2013; 13(5): 676-686. (In Russ.)

5. Khokhlov V.Yu., Selemenev V.F., Khokhlova O.N., Zagorodny A.A. Ionnyye ravnovesiya v rastvorakh aminokislot pri

razlichnykh temperaturah. *Vestnik VGU. Seriya : Khimiya, Biologiya, Pharmatsiya.* 2003; 1: 18-22. (In Russ.)

6. Khokhlova O.N. Termodinamicheskoye opisanie sverhekivalentnoy sorbcii ionoobmennikami. Teoreticheskiye osnovy. *ZHurnal fizicheskoy himii.* 2014; 88(7-8): 1243-1246. <https://doi.org/10.7868/S0044453714080135> (In Russ.)

7. Trunaeva E.S., Khokhlova O.N., Khokhlov V.Yu. Termodinamicheskoye opisanie neobmennoj sorbcii veshchestv ionoobmennikami. *ZHurnal fizicheskoy himii.* 2018; 92(12): 1920-1924. <https://doi.org/10.1134/S0044453718120440> (In Russ.)

8. Dougherty R.C. Temperature and pressure dependence of hydrogen bond strength: A perturbation molecular orbital approach. *J. Chem. Phys.* 1998; 109: 7372-7378. <https://doi.org/10.1063/1.477343>

9. Wen-Yih Chen, Hsiang-Ming Huang, Chien-Chen Lin, Fu-Yung Lin, Yu-Chia Chan. Effect of temperature on hydrophobic interaction between proteins and hydrophobic adsorbents: studies by isothermal titration calorimetry and the Van't Hoff equation. *Langmuir.* 2003; 19(22): 9395-9403. <https://doi.org/10.1021/la034783o>

10. Schellman J. A. Temperature, stability, and the hydrophobic interaction. *Biophys J.* 1997; 73(6): 2960-2964. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(97\)78324-3](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(97)78324-3)

11. Khokhlova O.N., Selemenev V.F., Khokhlov V.Yu., Kuznetsova L.V. Neobmennaya sorbciya fenilalanina nizkoosnovnymi anionitami. *ZHurnal fizicheskoy himii.* 2001; 75(11): 2011-2015. (In Russ.)

12. Trynaeva E.S., Khokhlova O.N., Khokhlov V.Yu. Kvantovo-himicheskoye modelirovanie gidratatsii i assotsiatsii fenilalanina v rastvore. *ZHurnal strukturnoy himii.* 2015; 56(6): 1111-1115. <https://doi.org/10.15372/JSC20150605> (In Russ.)

13. Bуканова Е.Ф. Коллоидная химия ПАВ. Мицеллообразование в растворах ПАВ., МИТХТ им. Ломоносова, 2006, 81h. (In Russ.)



### **Информация об авторах / Information about the authors**

**С.А. Лисицына** – студент кафедры аналитической химии Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия

**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

**S.A. Lisitsyna** – student, department of analytical chemistry, chemical faculty, Voronezh State University, Voronezh, Russia, e-mail: lisitsyna\_2000@mail.ru

**O.N. Khokhlova** – associate professor, department of analytical chemistry, chemical faculty, Voronezh State University, Voronezh, Russia, e-mail: okxox@yandex.ru, ORCID: 0009-0006-9314-7870

**V.Yu. Khokhlov** – professor, department of analytical chemistry, faculty of chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russia, e-mail: vladkh70@mail.ru, ORCID: 0009-0001-0655-1546

*Статья поступила в редакцию 13.06.2023; одобрена после рецензирования 26.07.2023; принята к публикации 02.08.2023.*

*The article was submitted 13.06.2023; approved after reviewing 26.07.2023; accepted for publication 02.08.2023.*