



УДК 543.544

Особенности сорбционного извлечения ванилина и изованилина волокнистым анионообменником ФИБАН А-1

Мещерякова А.В.¹, Воронюк И.В.¹, Елисеева Т.В.¹,
Поликарпов А.П.², Шункевич А.А.²

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж

²Государственное научное учреждение «Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 06.05.2016 г.

Определены кинетические и равновесные характеристики сорбции альдегидов ванилинового ряда (ванилина и изованилина) волокнистым высокоосновным анионообменником ФИБАН А-1 в статических условиях. Установлено время достижения равновесия в системе раствор гидроксибензальдегида – сорбент. Проведен анализ кинетических кривых сорбции пространственных изомеров на основе применения модели кинетики Бойда-Адамсона, установлен смешаннодиффузионный механизм поглощения ванилина и изованилина. Оценены значения степени извлечения изованилина анионообменником ФИБАН А-1 в диапазоне рН 2-12. Осуществлен анализ изотерм сорбции ванилина и изованилина, на основе которого отмечен полимолекулярный механизм поглощения сорбата. Определены равновесные характеристики сорбции гидроксибензальдегидов с использованием моделей сорбции Ленгмюра и БЭТ.

Ключевые слова: ванилин, изованилин, сорбция, волокнистый ионообменник, равновесие, кинетика, зависимость от рН

The features of vanillin and isovanillin sorption onto fibrous anion exchanger FIBAN A-1

Meshcheryakova A.V.¹, Voronyuk I.V.¹, Eliseeva T.V.¹,
Polikarpov A.P.², Shunkevich A.A.²

¹Voronezh State University, Voronezh

²Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

The kinetic and equilibrium features of vanillin and isovanillin sorption by strong basic anion-exchanger Fiban A-1 in static conditions are determined. The equilibrium time in the system hydroxybenzaldehyde solution – sorbent has been measured. The analysis of kinetic curves for isomers sorption based on Boyd-Adamson kinetic model has been made, the mechanism of mixed diffusion has been established for vanillin and isovanillin uptake. The values of isovanillin extraction degree by anion-exchanger Fiban A-1 have been estimated at pH range 2-12. Based on the analysis of vanillin and isovanillin sorption isotherms, the polymolecular mechanism of sorbate uptake has been revealed. The equilibrium characteristics of hydroxybenzaldehydes sorption have been determined using the sorption models of Langmuir and BET.

Keywords: vanillin, isovanillin, sorption, fibrous ion-exchanger, equilibrium, kinetics, pH dependence

Введение

Гидроксibenзальдегиды ванилинового ряда широко используются в пищевой и парфюмерной промышленности в качестве душистых веществ и отдушек. Один из важнейших представителей таких альдегидов – ванилин – легко синтезируется как из растительного сырья, так и отходов целлюлозно-бумажной промышленности (лигнина и сульфолигнина), при этом в реакционной смеси помимо основного продукта присутствуют его изомеры (изованилин и ортованилин) [1], например, при нитробензольном окислении лигнинов лиственной древесины и однолетних растений [2]. Актуальной задачей при синтезе ванилина является не только эффективное выделение полученных альдегидов из реакционных сред, но и разделение отдельных представителей ванилинового ряда. Одним из способов извлечения ароматических гидроксальдегидов может быть сорбционный, с применением анионообменных сорбентов, в том числе высокоосновных.

Целью настоящей работы являлось исследование особенностей поглощения ванилина и его изомера – изованилина – волокнистым высокоосновным анионообменным материалом марки ФИБАН.

Эксперимент

В качестве высокоосновного анионообменного сорбента в работе выбрано волокно ФИБАН А-1, синтезированное в лаборатории синтеза и исследования свойств ионообменных волокон («Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь), основные характеристики которого представлены в табл. 1. В качестве представителей ароматических альдегидов использованы пространственные изомеры альдегидов ванилинового ряда: ванилин (4-гидрокси-3-метоксибензальдегид) и изованилин (3-гидрокси-4-метоксибензальдегид), отличающиеся расположением гидроксид- и метоксигрупп относительно карбонильной группы.

Таблица 1. Физико-химические характеристики используемого в работе волокна [3]

Матрица	полипропиленовое волокно с привитым сополимером стирола и дивинилбензола.
Полная обменная емкость, ммоль/г, не менее	2.7
Влагосодержание, %	63.5
Ионная форма	ОН-форма
Функциональные группы	четвертичное аммониевое основание
Рабочий диапазон рН	0-14

Равновесные и кинетические характеристики сорбции изучали в статических условиях при температуре 298 ± 2 К и соотношении массы сорбента к объему раствора не менее 1 : 400, также в системе проводилось постоянное перемешивание на орбитальном шейкере со скоростью 220 об/мин.

Равновесие в системе анионообменник ФИБАН А-1 – раствор альдегида ванилинового ряда изучали на основе анализа изотерм сорбции, полученных методом переменных концентраций ($0.5-20$ ммоль/дм³) при температуре 298 ± 2 К. При достижении равновесия рассчитывали количество гидроксibenзальдегида, сорбированного анионообменником. Концентрацию ванилина и изованилина определяли спектрофотометрическим методом на приборе спектрофотометр «СФ-2000» при длине волны 278 и 276 нм, соответственно.

Установление структурных изменений проводили путем анализа ИК-спектров сорбента, полученных на приборе ИК-Фурье-спектрометр Bruker Vertex-70 в режиме пропускания в диапазоне волновых чисел от 400 до 4000 см^{-1} .

Обсуждение результатов

Ранее установлено, что при рассмотрении особенностей сорбции гидроксibenзальдегидов на примере этилванилина (4-гидрокси-3-этоксibenзальдегида) на высокоосновных сорбентах различной геометрической формы, одним из основных преимуществ использования волокнистого материала является высокая скорость процесса [4]. В настоящей работе исследована скорость поглощения ванилина и изованилина с целью установления времени, необходимого для достижения равновесного состояния, а также для предварительной оценки лимитирующей стадии сорбции (рис. 1).

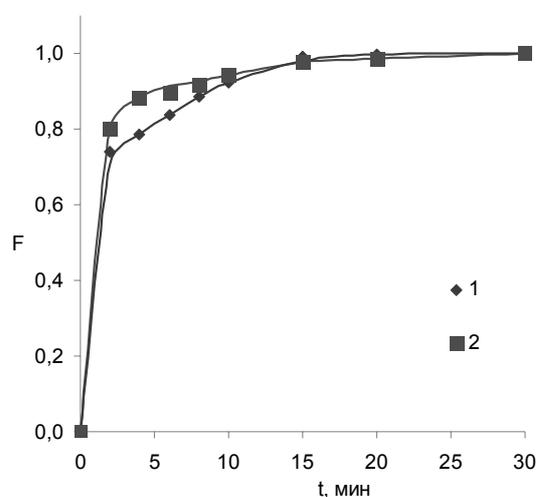


Рис. 1. Кинетическая кривая сорбции ванилина (1) и изованилина (2) анионообменным волокном ФИБАН А-1 ($C_0=6$ ммоль/дм³)

Отмечено, что, как и в случае поглощения этилванилина, скорость сорбционного процесса велика и время достижения равновесия составляет 30 минут. При этом уже на второй минуте эксперимента степень завершенности процесса (F) $\sim 0.7-0.8$. Быстрая кинетика обусловлена преимуществом геометрической формы волокнистого сорбента за счет большей пространственной доступности функциональных групп. Также отмечено, что в случае использования ФИБАН А-1 для извлечения альдегидов ванилинового ряда (ванилина, изованилина и этилванилина) из водных растворов изменение размера молекулы, а также расположения заместителей относительно карбонильной группы не оказывают существенного влияния на диффузионные ограничения при их сорбции. Однако при сравнении емкостей волокнистого сорбента относительно исследованных изомеров установлено, что несколько большее сродство проявляется к ванилину ($Q=1.93$ ммоль/г), чем к изованилину ($Q=1.44$ ммоль/г).

В работе проведен анализ кинетических кривых на основе применения формального подхода, заключающегося в линеаризации экспериментальных зависимостей в координатах уравнений Бойда-Адамсона [5] для случая внешней и внутренней кинетики (1)-(2) для ионообменников в виде цилиндров бесконечной высоты, соответственно.

$$-\ln(1-F) = \frac{3D}{r\delta K} t, \quad (1)$$

$$F = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\mu_n^2} \exp\left(-\mu_n^2 \frac{\bar{D}t}{r^2}\right), \quad (2)$$

где μ_n – корни некоторого характеристического уравнения; r – радиус цилиндра (волокна ионообменника), см; \bar{D} – коэффициент внутренней диффузии, см²/с; D – коэффициент внешней диффузии, см²/с; δ – толщина «пленки», см; K – коэффициент распределения сорбата в системе раствор – сорбент.

Отмечено, что применение данной модели является малоинформативным, так как коэффициенты корреляции линейных зависимостей в координатах $-\ln(1-F) - t$ для случая внешней диффузии и $\frac{\bar{D}t}{r^2} - t$ для случая внутренней диффузии близки друг к другу ($R^2=0.958$ и 0.985 для ванилина и изованилина соответственно), что может свидетельствовать о смешаннодиффузионном механизме поглощения исследуемого ряда сорбатов.

Помимо особенностей кинетики сорбции ванилина и изованилина в работе проведена оценка влияния кислотности среды на степень извлечения гидроксибензальдегидов из водных растворов с концентрацией 6 ммоль/дм³ (рис. 2).

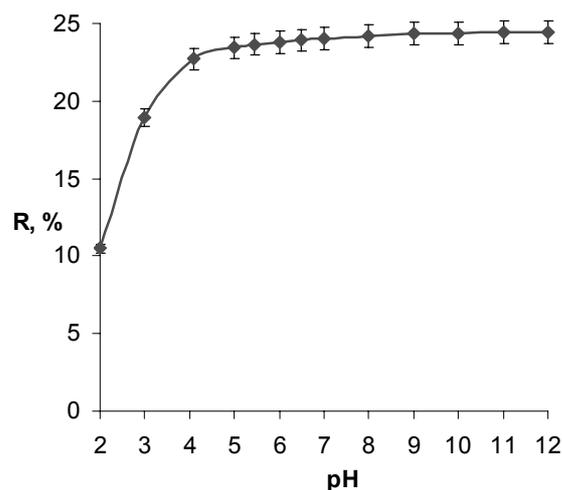
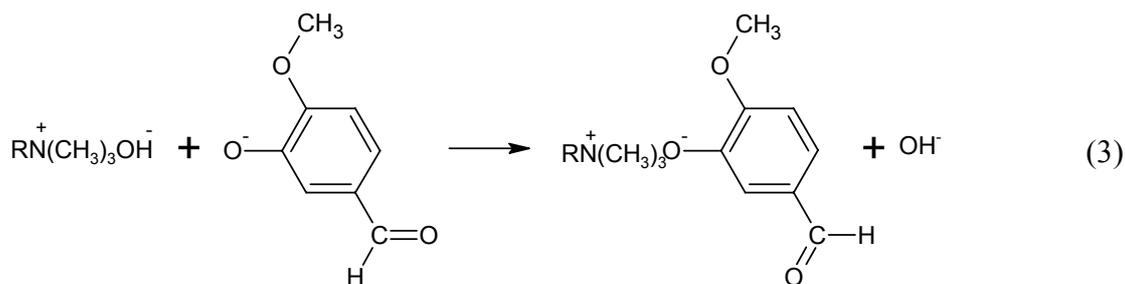


Рис. 2. Зависимость степени извлечения изованилина ФИБАН А-1 от кислотности раствора

Полученная зависимость указывает на существенное снижение емкости сорбента при его использовании в средах с $pH < 4$, в нейтральных и щелочных средах количество поглощаемого сорбата максимально и практически не меняется. Экспериментальные данные, прежде всего, связаны с характером поглощения гидроксибензальдегидов сорбентами, содержащими в качестве функциональных групп аммониевые основания ($pK=3.00$ [6]). Применение высокоосновных сорбентов в ОН-форме не исключает возможности поглощения слабоионизированных гидроксибензальдегидов ($pK_a(\text{изованилин})=8.89$ [7]) за счет ионообменного механизма. В матрице сорбента возможна перезарядка молекулы гидроксибензальдегида с образованием, соответственно, изованилат-иона, который может участвовать в реакции ионного обмена с функциональными группами сорбента по анионообменному типу:



Снижение сорбционной способности анионообменника А-1 к извлечению изованилина в кислых средах может быть обусловлено несколькими причинами. Во-первых, уменьшается вероятность перезарядки гидроксибензальдегида вследствие изменения степени ионизации функциональных групп сорбента; во-вторых, возможна конкурентная сорбция хлорид-ионов, которые появляются в системе при ее подкислении.

Таким образом, применение высокоосновных анионообменных волокон типа ФИБАН А-1 показывает удовлетворительные результаты при сорбции гидроксибензальдегидов из водных растворов, максимальная степень извлечения достигается при использовании растворов с $\text{pH} > 4$. Отметим, что растворы чистого ванилина и изованилина показывают $\text{pH} \sim 5.5$, что говорит об отсутствии необходимости проведения дополнительной подготовки системы в виде подщелачивания для улучшения сорбционных характеристик анионообменника.

В работе также оценены равновесные характеристики поглощения ванилина и изованилина на основе изотерм сорбции, полученных методом переменных концентраций, и коэффициентов распределения (рис. 3-4).

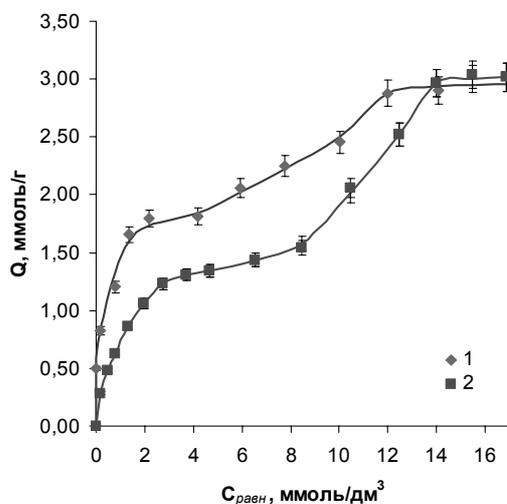


Рис. 3. Изотермы сорбции ванилина(1) и изованилина(2) анионообменником ФИБАН А-1

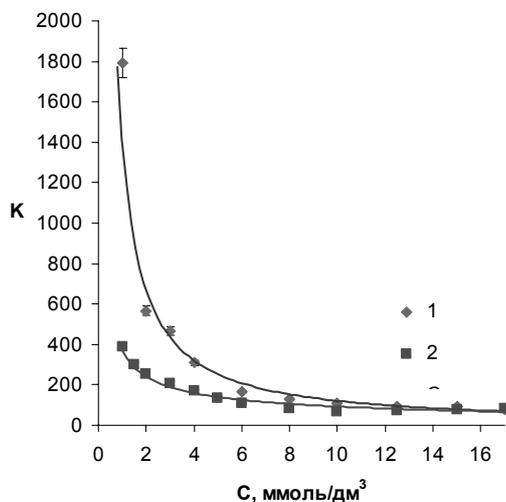
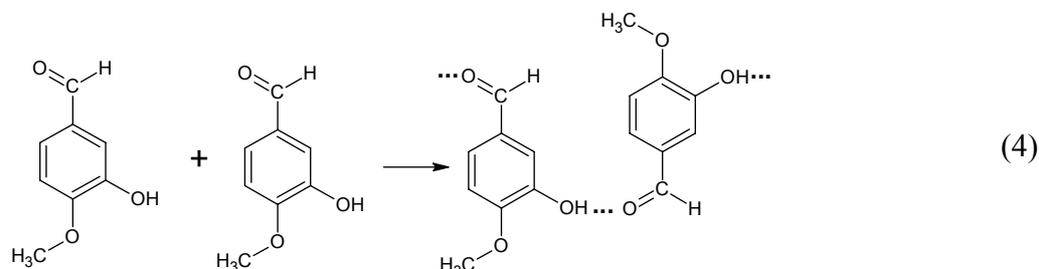


Рис. 4. Зависимость коэффициента распределения ванилина (1) и изованилина (2) в системе раствор сорбата – сорбент ФИБАН А-1 от их концентрации во внешнем растворе

Анализ приведенных данных указывает на высокое сродство применяемого в работе сорбента к альдегидам ванилинового ряда. Отмечено, что при концентрации раствора выше 6 ммоль/дм^3 в системе раствор альдегида – сорбент возможны дополнительные взаимодействия помимо ионного обмена, о чем свидетельствует появление второй ступени на изотерме сорбции. Сравнение емкостей и коэффициентов распределения говорит о большем сродстве волокнистого материала к ванилину,

особенно на первой ступени. Данный факт может быть объяснен пространственными затруднениями при ионообменном взаимодействии молекул изованилина с четвертичными аминогруппами сорбента. Расположение гидроксигруппы в паре-положении является наиболее выгодным при ориентации молекул ванилина относительно функциональной группы волокна.

Дополнительное связывание молекул гидроксibenзальдегидов сопряжено с их участием в сорбат-сорбатных взаимодействиях (4), что приводит к образованию полислоя.



Для описания мономолекулярной сорбции ванилина и изованилина в работе использован формальный подход, основанный на применении известных теорий сорбции (Ленгмюра, Фрейндлиха, Темкина) [8-10]. Линеаризация полученных в работе изотерм на начальном участке в координатах различных уравнений сорбции показала (табл. 2), что наибольшие коэффициенты корреляции наблюдаются в случае представления данных в координатах уравнения Ленгмюра.

Таблица 2. Модели сорбции, применяемые в работе

Модели сорбции	Уравнения сорбции	R ²	
		ванилин	изованилин
Ленгмюра	$\frac{Q}{Q_{\text{моно}}} = \frac{K_L \cdot C_{\text{равн}}}{1 + K_L \cdot C_{\text{равн}}}$	0.989	0.991
Темкина	$\frac{Q}{Q_{\text{моно}}} = \frac{1}{\alpha} \cdot \ln K + \frac{1}{\alpha} \ln C_{\text{равн}}$	0.862	0.976
Фрейндлиха	$Q = \beta \cdot C_{\text{равн}}^{1/n}$	0.951	0.974
Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ)	$\frac{Q}{Q_{\text{моно}}} = \frac{K_S \cdot C_{\text{равн}}}{(1 - K_L \cdot C_{\text{равн}}) \cdot (1 - K_L \cdot C_{\text{равн}} + K_S \cdot C_{\text{равн}})}$	0.992	0.978

$Q_{\text{моно}}$ – емкость монослоя, ммоль/г; K_S – константа равновесия для мономолекулярной сорбции, $\text{дм}^3/\text{ммоль}$; K_L – константа равновесия для полимолекулярной сорбции; $C_{\text{равн}}$ – равновесная концентрация сорбата, ммоль/ дм^3 ; α – константа, характеризующая линейное распределение адсорбционных центров по энергии, β и n – константы адсорбции уравнения Фрейндлиха.

Также в работе оценена возможность применения уравнения полимолекулярной сорбции Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ), модифицированного для жидких сред [11], для описания изотерм во всем диапазоне исследованных концентраций (табл. 2). Выявлено, что наибольший коэффициент корреляции характерен для изотермы сорбции ванилина.

Линеаризация изотерм сорбции альдегидов ванилинового ряда волокном А-1 в координатах уравнений сорбции Ленгмюра и БЭТ позволила рассчитать некоторые равновесные характеристики поглощения исследуемых сорбатов (табл. 3).

При сопоставлении полученных данных относительно монослоя отмечена хорошая корреляция между использованными уравнениями. Рассчитанные константы

сорбционного равновесия, как и коэффициент распределения альдегида в системе раствор сорбата – сорбент (рис. 4), указывают на большее сродство анионообменного волокна к ванилину.

Таблица 3. Равновесные параметры сорбции гидроксibenзальдегидов анионообменником ФИБАН А-1, рассчитанные по уравнениям Ленгмюра и БЭТ.

Гидроксibenзальдегид	Расчет по уравнению Ленгмюра		Расчет по уравнению БЭТ		
	$Q_{\text{моно}}$, ммоль/г	K_S , дм ³ /ммоль	$Q_{\text{моно}}$, ммоль/г	K_S , дм ³ /ммоль	K_L , дм ³ /ммоль
Ванилин	2.08	3.16	1.96	3.08	0.02
Изованилин	1.67	0.91	1.34	1.09	0.04

Подтверждением полимолекулярного характера сорбции гидроксibenзальдегидов волокном ФИБАН А-1 являются найденные в настоящем исследовании изменения в структуре сорбента при его различных степенях насыщения. Методом ИК-спектроскопии проведено изучение спектров поглощения сорбента до сорбции, а также насыщенного в растворах изованилина с концентрациями 6 и 20 ммоль/дм³, соответствующих моно- и полимолекулярному поглощению (рис. 5).

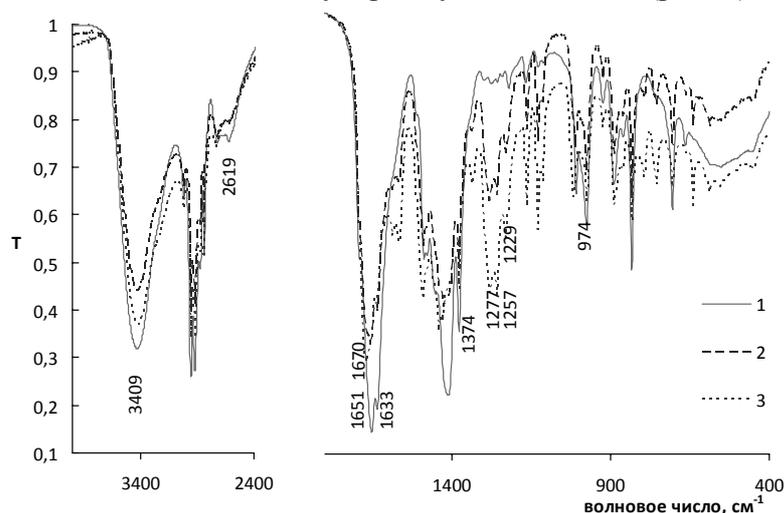


Рис. 5. ИК-спектр ФИБАН А-1: 1 – OH-форма, 2 – форма, насыщенная изованилином ($C_0=6$ ммоль/дм³); 3 – форма, насыщенная изованилином ($C_0=20$ ммоль/дм³)

Участие функциональных групп сорбента в процессе поглощения гидроксibenзальдегидов по ионообменному механизму подтверждается уменьшением интенсивности полос поглощения в области 2619, 1651, 1633, 1374 и 974 см⁻¹, характерных для валентных и деформационных колебаний OH-групп, связанных с четвертичным азотом в связи $-N^+(CH_3)_3 \cdots OH$ [12]. Присутствие молекул сорбата в матрице волокна также подтверждается наличием пиков 1277, 1257, 1229 см⁻¹, характерных для эфирных групп в ароматических соединениях [13-14]. Полоса, характерная для карбонильной группы 1670 см⁻¹, наиболее интенсивно проявляется при максимальном насыщении сорбента. В спектрах анионообменника также отмечено сначала снижение интенсивности полосы пропускания в области 3409 см⁻¹, характерной для аминов и связанных межмолекулярными взаимодействиями OH-групп, а потом увеличение их интенсивности [12,13]. Это может быть связано с тем, что при насыщении волокна в растворе с концентрацией 6 ммоль/дм³, реализуется преимущественно ионообмен-

ный механизм, в ходе которого количество гидроксильных групп уменьшается вследствие их замещения изованилат-ионами (3). Однако при использовании растворов с концентрацией 20 ммоль/дм³ наблюдается дополнительное сорбат-сорбатное взаимодействие (4), в ходе которого появляются ОН-группы гидроксibenзальдегида, ассоциированные с карбонильной группой межмолекулярной водородной связью. Таким образом, методом структурно-группового анализа отмечены изменения, происходящие в структуре сорбента при его использовании в растворах с различной концентрацией альдегида.

Заключение

При исследовании сорбции представителей альдегидов ванилинового ряда установлено, что для их извлечения могут быть использованы волокнистые сорбенты с сильноосновными функциональными аминогруппами. При этом волокнистая форма сорбента позволяет достигать высоких скоростей сорбции, которые лимитируются равноценным вкладом внешне- и внутридиффузионных ограничений. Возможность перезарядки гидроксibenзальдегида в матрице сорбента в ОН-форме приводит к его ионообменному закреплению, что позволяет использовать исследованный волокнистый материал ФИБАН А-1 в нейтральных и щелочных средах. Отмечено, что при поглощении ванилина и изованилина из водных растворов в области концентраций выше 6 ммоль/дм³ возникает дополнительное сорбат-сорбатное взаимодействие, что ведет к формированию полислоя и увеличивает емкость сорбента по альдегидам. Применение теорий сорбции Ленгмюра и БЭТ для описания полученных изотерм позволило рассчитать константы сорбционного равновесия моно- и полимолекулярной сорбции; выявлено, что ФИБАН А-1 проявляет большую сорбционную способность к ванилину. Данный факт может быть объяснен меньшими стерическими затруднениями для сорбции при положении гидроксигруппы сорбата в пара-положении.

Список литературы

1. Дикусар Е.А., Поткин В.И., Петкевич С.К., Мурашева М.Ю. и др. // *Химия растительного сырья*. 2014. № 2. С. 87-96.
2. Гоготов А.Ф., Рыбальченко Н.А., Бабкин В.А. // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2001. № 9. С. 161-167.
3. Государственное научное учреждение «Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси». Режим доступа: <http://ifoch.basnet.by/research/fiban/A1.html> (дата обращения: 19.04.2016)
4. Воронюк И.В., Родионова Д.О., Елисеева Т.В., Поликарпов А.П. и др. // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2015. Т. 15. № 6. С. 834-841.
5. Кокотов Ю.А., Пасечник В.А. Равновесие и кинетика ионного обмена. Л. Химия. 1970. 336 с.
6. Inamuddin Dr., Luqman M. *Ion Exchange Technology I: Theory and Materials* - Springer Science & Business Media. 2012. pp. 332.
7. Войткевич С.А. 865 душистых веществ для парфюмерии и бытовой химии. М. Пищевая промышленность. 1994. 594 с.
8. Langmuir J. // *J. Am. Chem. Soc.* 1916. Vol. 38. No 11. pp. 2221-2295.
9. Freundlich H.M.F. // *J. Phys. Chem.* 1906. Vol. A57. pp. 385-410
10. Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии. М. Химия. 1976. 512 с.
11. Ebadi A. *Adsorption*. 2009. No 15. pp. 65-73.
12. Углянская В.А. и др. Инфракрасная спектроскопия ионообменных материалов. Воронеж. Изд-во Воронеж. ун-та, 1989. 205 с.

13. Беллами Л. Инфракрасные спектры молекул. М. Изд-во иностранной литературы. 1957. 444 с.

14. Преч Э. Определение строения органических соединений. М. Мир. БИНОМ. Лаборатория знаний. 2013. 439 с.

References

1. Dikusar E.A., Potkin V.I., Petkevich S.K., Murasheva M.YU et al., *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2014, No 2, pp. 87-96.

2. Gogotov A.F., Rybal'chenko N.A., Babkin V.A., *Khimiya v interesah ustojchivogo razvitiya*, 2001, No 9. pp. 161-167.

3. Gosudarstvennoe nauchnoe uchrezhdenie «Institut fiziko-organicheskoy himii Nacional'noj akademii nauk Belarusi». Rezhim dostupa: <http://ifoch.bas-net.by/research/fiban/A1.html> (data obrashcheniya: 19.04.2016)

4. Voronyuk I.V., Rodionova D.O., Eliseeva T.V., Polikarpov A.P. et al., *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2015, Vol. 15, No 6, pp. 834-841.

5. Kokotov Yu.A., Pasechnik V.A., Ravnovesie i kinetika ionnogo obmena, L., Khimiya, 1970, 336 p.

6. Inamuddin Dr., Luqman M., Ion Exchange Technology I: Theory and Materials, Springer Science & Business Media, 201, pp. 332.

7. Vojtkevich S.A., 865 dushistyh veshchestv dlya parfyumerii i bytovoj himii, M., Pishchevaya promyshlennost', 1994, 594 p.

8. Langmuir J., *J. Am. Chem. Soc.*, 1916, Vol. 38, No 11, pp. 2221-2295.

9. Freundlich H.M.F., *J. Phys. Chem.*, 1906, Vol. A57, pp. 385-410

10. Voyuckij S.S., Kurs kolloidnoj himii, M. Himiya, 1976, 512 p.

11. Ebadi A., *Adsorption*, 2009, No 15, pp. 65-73.

12. Uglyanskaya V.A. et al., Infракрасная спектроскопия ионообменных материалов, Воронеж, Изд-во Воронеж. ун-та, 1989, 205 p.

13. Bellami L., Инфракрасные спектры молекул, М, Изд-во иностранной литературы, 1957, 444 p.

14. Prech E., Opredelenie stroeniya organicheskikh soedinenij, M., Mir, BINOM, Laboratoriya znaniy, 2013, 439 p.

Мещерякова Анна Владимировна – студентка кафедры аналитической химии Воронежского государственного университета, Воронеж

Воронюк Ираида Владимировна – к.х.н., доцент кафедры аналитической химии Воронежского государственного университета, Воронеж, тел. (473) 220-89-32

Елисеева Татьяна Викторовна – к.х.н., доцент кафедры аналитической химии Воронежского государственного университета, Воронеж

Поликарпов Александр Петрович – к.х.н., зав. лабораторией синтеза и исследования свойств ионообменных волокон, Государственное научное учреждение «Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси» (ИФОХ НАН Беларуси), тел. +375 17 284 20 57

Шункевич Александр Акимович – к.х.н., ведущий научный сотрудник лаборатории синтеза и исследования свойств ионообменных волокон, Государственное научное учреждение «Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси» (ИФОХ НАН Беларуси)

Meshcheryakova Anna V. - student, Department of Analytical Chemistry, Voronezh State University, Voronezh

Voronyuk Iraida V. – Cand. Chem. Sci, Lecturer, Department of Analytical Chemistry, Voronezh State University, Voronezh, e-mail: chem.vrn@mail.ru

Eliseeva Tatiana V. – Cand. Chem. Sci, Lecturer, Department of Analytical Chemistry, Voronezh State University, Voronezh

Polikarpov Alexander P. - Cand. Chem. Sci, Head of the Laboratory of ion exchange fibers synthesis and properties study, Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, E-mail: fiban@ifoch.bas-net.by

Shunkevich Alexander A. - Cand. Chem. Sci, Leading Researcher of the Laboratory of ion exchange fibers synthesis and properties study, Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: shunkevich@ifoch.bas-net.by