

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 541.183

doi: 10.17308/sorpchrom.2025.25/13576

Адсорбционно-хроматографическое определение фенолов в водных растворах

Елена Алексеевна Подолина^{1✉}, Наталья Григорьевна Синельникова¹,
Виктор Михайлович Мухин², Миниса Абдуллаевна Ханина³

¹Московский политехнический университет (филиал в г. Электросталь), Электросталь, Россия, podolina70@mail.ru[✉]

²АО ЭНПО «Неорганика», Электросталь, Россия

³Государственный гуманитарно-технологический университет г. Орехово-Зуево, Россия

Аннотация. Высокая антиоксидантная активность (АОА) фенолов (фенол, ди- и тригидроксибензолы) делает их незаменимыми компонентами в химической, коксо- и нефтехимической, текстильной и целлюлозно-бумажной промышленности. Очищенные сточные воды таких производств могут содержать значительные количества фенола, ПДК в воде которого, согласно СанПин 1.2.3685-21, составляет 0.1 мг/дм³. Целью настоящей работы – разработка методики адсорбционно-хроматографического определения фенолов в водных растворах.

Впервые изучена адсорбция фенолов из водных растворов активным углем МеКС-О. Процесс адсорбции осуществляли в двух вариантах: статический (в центрифужной пробирке) и динамический (на мини-колонке). При выбранном режиме перемешивания обеспечивается «доставка» молекул фенола к внешней границе «вязкого» слоя, происходит насыщение поверхности АУ МеКС-О до равновесия с раствором. Скорость адсорбции фенолов осуществлялась только за счет внутридиффузионного массопереноса. При этом реализуется физический механизм сорбции (изотермы Ленгмюра). В результате взаимодействий между адсорбентом (АУ) и адсорбтивом (фенолов) реализуется механизм донорно-акцепторного комплекса: кислород (-ОН, >C=O, -COOH) или азот (C≡N) на поверхности АУ МеКС-О действует как донор электронов, тогда как бензольное кольцо фенолов как акцептор. Поверхностные функциональные группы на АУ МеКС-О способные взаимодействовать с молекулами воды и адсорбировать гидратированные молекулы фенолов, что значительно повышает адсорбционную способность АУ. С помощью ИК-спектроскопии подтверждено, что фенолы адсорбируются в микропорах АУ МеКС-О в гидратированном виде. Взаимодействие фенолов с активными центрами АУ осуществляется через «мостик из молекулы воды». С помощью уравнений Ленгмюра (ТМА) и Дубинина-Радускевича (ТОЗМ) подтверждено, что микропоры АУ МеКС-О заполняются аналогично капиллярной конденсации. Десорбирование фенолов осуществляли в динамическом режиме (на мини-колонки), элюент этанольный раствор КОН, степень десорбции фенолов 80-82%.

Разработана адсорбционно-хроматографическая методика определения фенолов в водных растворах. Методика апробирована на искусственно приготовленных смесях фенолов, ошибка определения не превышает 2%

Ключевые слова: активный уголь, МеКС-О, адсорбция, десорбция, фенол.

Для цитирования: Подолина Е.А., Синельникова Н.Г., Мухин В.М., Ханина М.А. Адсорбционно-хроматографическое определение фенолов в водных растворах // Сорбционные и хроматографические процессы. 2025. Т. 25, № 6. С. 920-929. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13576>

Original article

Adsorption-chromatographic determination of phenols in aqueous solutions

Elena A. Podolina^{1✉}, Natalia G. Sinelnikova¹, Viktor M. Mukhin², Minisa A. Khanina³

¹Moscow Polytechnic University (Electrostal Branch), Electrostal, Russian Federation, podolina70@mail.ru[✉]

© Подолина Е. А., Синельникова Н. Г., Мухин В. М., Ханина М. А., 2025

²AOA ENPO "Neorganika", Elektrostal, Russian Federation

³State University of Humanities and Technology, Orekhovo-Zuyevo, Russian Federation

Abstract. The high antioxidant activity (AOA) of phenols (phenol, di- and trihydroxybenzenes) makes them indispensable components in the chemical, coke and petrochemical, textile and pulp and paper industries. Treated wastewater from such industries may contain significant amounts of phenol, the maximum permissible concentration in water for which, according to the data, is 0.1 mg/l. The aim of this work is to develop a method for adsorption-chromatographic determination of phenols in aqueous solutions.

The adsorption of phenols from aqueous solutions by activated carbon MeKS-O was studied for the first time. The adsorption process was carried out in two modes: static (in a centrifuge tube) and dynamic (on a mini-column). The selected mixing mode ensures the "delivery" of phenol molecules to the outer boundary of the "viscous" layer, saturating the surface of the AC with MeKS-O to equilibrium with the solution. The rate of phenol adsorption was achieved solely through internal diffusion mass transfer. In this case, the physical mechanism of sorption (Langmuir isotherms) is realized. As a result of interactions between the adsorbent (AC) and the adsorptive (phenols), the mechanism of a donor-acceptor complex is realized: oxygen ($-\text{OH}$, $>\text{C}=\text{O}$, $-\text{COOH}$) or nitrogen ($-\text{C}\equiv\text{N}$) on the AC MeKS-O surface acts as an electron donor, while the benzene ring of phenols acts as an acceptor. Surface functional groups on AC MeKS-O are capable of interacting with water molecules and adsorbing hydrated phenol molecules, which significantly increases the adsorption capacity of AC. Using IR spectroscopy, it was confirmed that phenols are adsorbed in the micropores of the AC MeKS-O in a hydrated form and interaction with the active centers of the AC is carried out through a "bridge" of a water molecule. Using the Langmuir (TMA) and Dubinin–Radushkevich (TOZM) equations, it was confirmed that the micropores of the AU MeKS-O are filled similarly to capillary condensation. Phenol desorption was performed dynamically (on mini-columns) using an ethanol solution of KOH as the eluent; the degree of phenol desorption was 80-82%.

An adsorption-chromatographic method for determining phenols in aqueous solutions has been developed. The method has been tested on artificially prepared phenol mixtures; the determination error does not exceed 2%.

Keywords: active carbon, MeKS-O, adsorption, desorption, phenol.

For citation: Podolina E.A., Sinelnikova N.G., Mukhin V.M., Khanina M.A. Adsorption-chromatographic determination of phenols in aqueous solutions. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2025. 25(6): 920-929. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13576>

Введение

Высокая антиоксидантная активность (АОА) фенолов (фенол, ди- и тригидроксibenзолы) делает их незаменимыми компонентами в химической, коксо- и нефтехимической, текстильной и целлюлозно-бумажной промышленности [1,2]. Очищенные сточные воды таких производств могут содержать значительные количества фенола, ПДК в воде которого, согласно [3], составляет 0.1 мг/дм³. Существующие аналитические методики определения фенола в воде [4,5] включают стадию предварительного концентрирования, которую осуществляют такими методами как: жидкостно-жидкостная экстракция (ЖЖЭ) [4-6], твердожидкостная экстракция (ТЭЖ) [7] и адсорбция на эффективных активных углях (АУ) различных марок [8-10]. Целью настоящей работы – разработка методики адсорбционно-хроматографического

определения фенолов в водных растворах.

Теоретическая часть

АУ МеКС-О (медицинский косточковый сорбент) [11], изготавливают из отходов растительного сырья (косточки абрикоса, сливы, вишни) по ТУ 2568-302-04838763-2007. С помощью метода низкотемпературной адсорбции-десорбции N₂ и метода Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ) определили порометрические характеристики АУ МеКС-О (табл.1).

АУ МеКС-О характеризуется развитой микропористой поверхностной структурой, состоящей из элементарных микрокристаллов графита, сложенных вместе в произвольном порядке и большим числом поверхностных функциональных групп (рис.1). Такие как $-\text{OH}$ (пик на ИК-спектре, 3400 см⁻¹), $>\text{C}=\text{O}$ (1699, 1614 см⁻¹) и $-\text{CH}$ (2922 см⁻¹) [12], которые создают на

Таблица 1. Порометрические характеристики АУ МеКС-О: $n=5$, $P=0.95$; $S^2=0.0019 \div 0.010$; $S=0.04 \div 0.11$; $S_r=0.07 \div 0.11$; $\delta c=4 \div 9\%$

Table 1. Porometric characteristics of AU MeKS-O: $n=5$, $P=0.95$; $S^2=0.0019 \div 0.010$; $S=0.04 \div 0.11$; $S_r=0.07 \div 0.11$; $\delta c=4 \div 9\%$

АУ	Удельная поверхность по ВЕТ, м ² /г	Удельная поверхность переходных пор, м ² /г	Удельная поверхность микропор, м ² /г	Объем микропор V_{min} , см ³ /г	Суммарный объем пор V_t , см ³ /г	Соотношение V_{min}/V_t , %
МеКС-О	1220±90	90±5	1130±80	0.645±0.005	0.695±0.05	95±5

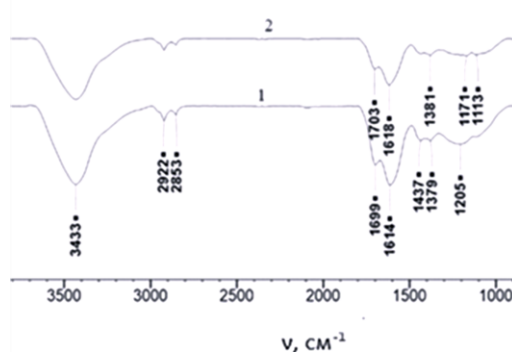


Рис.1 ИК-спектры образца МеКС-О до (1) и после (2) адсорбции фенола из водных растворов

Fig. 1 IR spectra of the MeKS-O sample before (1) and after (2) adsorption of phenol from aqueous solutions

поверхности микропор АУ МеКС-О локальные активные центры, участвующие в процессе адсорбции фенолов.

Адсорбция фенолов на поверхности микропор АУ МеКС-О определяется следующими специфическими взаимодействиями [13], суммарный вклад которых описывается как:

- дисперсионное, возникающее в результате делокализации π -электронов в базисных плоскостях углерода и ароматических ядер фенола и его гидроксизамещенных. Чем больше молекулярная масса адсорбата, тем сильнее проявляются дисперсионные взаимодействия;
- электростатическое – образуется между локальными зарядами на поверхности микропор АУ МеКС-О с полярными ОН-группами адсорбатов;
- образование водородных связей между функциональными группами на поверхности микропор АУ МеКС-О и ОН-группами адсорбатов через «мостик из молекул воды» подтверждается наличием уширения пиков в области

1614÷3400 см⁻¹ на ИК-спектре МеКС-О с адсорбированным фенолом(рис.1) [14].

В соответствии с теорией объемного заполнения микропор (ТОЗМ) в процессе адсорбции фенолов на АУ МеКС-О происходит не покрытие поверхности микропор, а их объемное заполнение [15].

Экспериментальная часть

Реактивы: этанол, раствор для наружного применения и приготовления лекарственных форм с концентрацией 95 об.%(ПХФК ОАО «Медхимпром»), ацетонитрил хром. чистый, муравьиная кислота х.ч., исследуемые фенолы: фенол, резорцин, пирокатехин, гидрохинон, пирогаллол, гидрокси-гидрохинон, флороглюцин квалификации ч.д.а.; гидроксид калия х.ч., сорбент МеКС-О (ТУ 2568-302-04838763-2007) изготовлен на АО ЭНПО «Неорганика» г. Электросталь, Московской обл., Ø частиц сорбента 1-2 мм.

Оборудование: перемешивание в статических условиях осуществляли на вибросмесителе Vortex для пробирок V-1

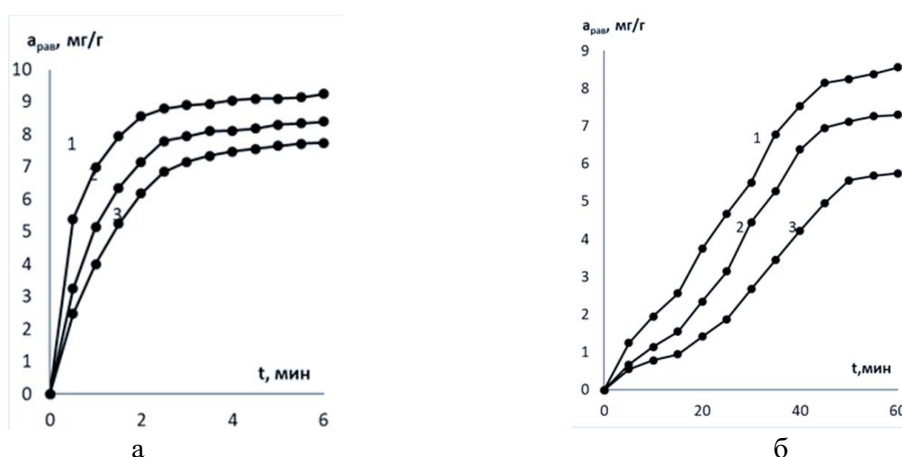


Рис. 2. Кинетическая кривая адсорбции фенола (1), пирокатехина (2), пирогаллolla (3) на АУ МеКС-О в статических (а) и динамических (б) условиях

Fig.2 a Kinetic curve of adsorption of phenol (1), pyrocatechol (2), pyrogallol (3) on AU MeKS-O under static (a) and dynamic (б) conditions

plus/V32; количественное определение фенолов осуществляли на жидкостном хроматографе с УФ-детектором; условия хроматографирования: хроматографическая колонка Dionex Acclaim OA, 4 × 250 мм; ПФ: ацетонитрил : 0.1% водный раствор муравьиной кислоты (88 : 12 в объемном соотношении); скорость потока – 0.6 см³/мин; объем анализируемой пробы – 20 мкл; аналитическая длина волны 270-290 нм; время анализа – 6 мин. ИК-спектры поглощения были записаны на Фурье-спектрометре Bruker Vertex 70.

Адсорбцию гидроксibenзолов проводили в статических и динамических условиях, режим перемешивания ламинарный [16]. Статические условия сорбции осуществляли по методике, описанной в [9]. Кинетические кривые адсорбции фенолов в статических условиях в микропорах АУ МеКС-О представлены на рис.2 (а).

Теоретические основы динамических процессов адсорбции из водных растворов разработаны российскими учеными Самсоновым, Елькиным и Меленевским [17,18]. Согласно формуле(1), приведенной в [19,20], длина мини-колонки (λ , см), высота слоя сорбента (x , см), скорость проведения процесса сорбции (v , см³/(с×см²)), адсорбционная способность фенолов по отношению к АУ МеКС-О

(R ,%) влияют на время проведения процесса сорбции (t , мин) и форму кинетических кривых.

$$\lambda = \frac{3 \times (1 - \varepsilon) \times K_d \times D \times x}{l^2 \times v} \quad (1)$$

Адсорбционную способность фенолов по отношению к АУ МеКС-О оценивали по степени извлечения (R , %) (2):

$$R = \frac{c_{исх} - c_{рав}}{c_{исх}} \times 100\% \quad (2)$$

Коэффициент разделения K_L формула (3), позволяет оценить характер адсорбционного процесса, зависит от константы (K) адсорбционного равновесия в уравнении Ленгмюра, см³/мг.

$$K_L = \frac{1}{1 + K \times c_{исх}} \quad (3)$$

Динамические условия адсорбции осуществляли методом тонкого слоя (МТС) на мини-колонках[19]: стеклянная колонка Ø 6 мм, высота слоя сорбента 1.3 см, масса навески АУ МеКС-О 0.0250 г; через тонкий слой АУ МеКС-О непрерывно пропускали раствор фенола с исходной концентрацией 0.1 мг/см³ и линейной скоростью 680 см/мин. В таких условиях создается поток, обеспечивающий «доставку» молекул фенола к внешней границе «вязкого» слоя и происходит насыщение поверхности АУ МеКС-О фенолом до равновесия с раствором (скорость адсорбции фенола осуществляется только за счет внутридиффузионного массопереноса). Равновесную величину

Таблица 2. Времена достижения (t , мин) сорбционного равновесия и величина степени сорбции R , % фенолов на АУ МеКС-О, в различных условиях: $n=5$, $P=0.95$; $S^2=0.0019-0.010$; $S=0.04-0.11$; $S_r=0.04-0.11$; $\delta c=4-9\%$

Table 2. Time to reach sorption equilibrium (t , min) and the degree of sorption R , % of phenols on АУ МеКС-О, under different conditions: $n=5$, $P=0.95$; $S^2=0.0019-0.010$; $S=0.04-0.11$; $S_r=0.04-0.11$; $\delta c=4-9\%$

статические					динамические				
фенолы	t	$R, \%$	t	$R, \%$	фенолы	t	$R, \%$	t	$R, \%$
фенол	4 мин	98.3 ± 1.3	6 мин	99.3 ± 1.1	фенол	40 минут	97.5 ± 1.1	60 минут	98.1 ± 1.2
пирокатехин		97.4 ± 1.2		98.6 ± 1.2	пирокатехин		96.1 ± 1.2		97.2 ± 1.4
резорцин		96.6 ± 1.1		97.7 ± 1.2	резорцин		95.2 ± 1.3		96.4 ± 1.2
гидрохинон		97.3 ± 1.4		98.5 ± 0.9	гидрохинон		96.0 ± 1.2		97.5 ± 1.3
пирогаллол		96.4 ± 1.2		97.6 ± 1.1	пирогаллол		95.1 ± 1.1		96.1 ± 1.2
флороглюцин		96.5 ± 1.5		97.7 ± 1.3	флороглюцин		95.2 ± 1.2		96.2 ± 1.3
гидрокси-гидрохинон		96.7 ± 1.4		97.8 ± 1.2	гидрокси-гидрохинон		95.3 ± 1.1		96.3 ± 1.2

адсорбции фенола ($a_{\text{рав}}$, мг/г) в тонком слое АУ МеКС-О в фиксированное время сорбции определяли методом выходных кинетических кривых (рис.2б).

Десорбцию гидроксibenзолов осуществляли в динамических условиях МТС на мини-колонке по методике, описанной выше. Равновесную концентрацию фенолов в контактных растворах по двум методам адсорбции (статический и динамический режим) и десорбции (динамический режим) определяли методом ВЭЖХ с УФ-детектором. Полученные экспериментальные данные статистически обрабатывали с помощью программы Statsoft Statistica v7.0.61.0 EN.

Для описания процессов адсорбции фенолов микропористым АУ МеКС-О использованы теория объемного заполнения микропор (модифицированное уравнение Дубинина-Радushkevicha) и теория мономолекулярной адсорбции (уравнение Ленгмюра) [21,22].

Обсуждение результатов

Впервые изучена адсорбция фенолов из водных растворов на АУ МеКС-О в статических и динамических условиях.

Экспериментально получено, что адсорбционное равновесие в системе вода – фенол – АУ МеКС-О в статических условиях достигается уже при 4-6 мин, а динамических – 60 мин. В табл.2 приведены экспериментально определенные времена достижения адсорбционного равновесия и степени сорбции фенолов на АУ МеКС-О.

Кинетические кривые адсорбции фенолов в статических условиях (рис.2 а) относятся к типу L, что подтверждает молекулярную адсорбцию фенолов на микропористом сорбенте. В динамических же условиях кривые адсорбции можно отнести к типу S (рис.2б) и предположить, что адсорбция фенолов на АУ МеКС-О описывается полимолекулярной адсорбцией [23]. Однако, фенолы в водных растворах гидратируются и адсорбируются на активных центрах АУ МеКС-О через «мостики из молекул воды». При этом увеличивается площадь молекул адсорбата и создается так называемый «псевдополимолекулярный» слой[14].

Для выяснения механизма адсорбции фенолов построены изотермы адсорбции

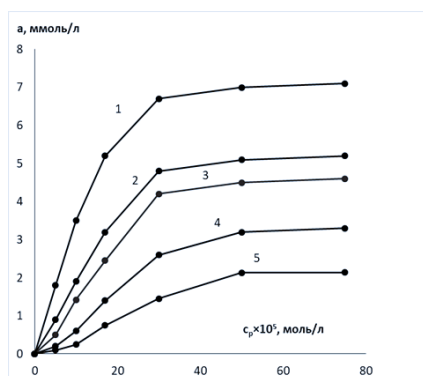


Рис.3. Изотерма адсорбции фенола (1), гидрохинона (2), резорцина(3), флороглюцина (4), пирогаллола (5)

Fig.3. Adsorption isotherm of phenol (1), hydroquinone (2), resorcin (3), floroglucin (4), and pyrogallol (5)

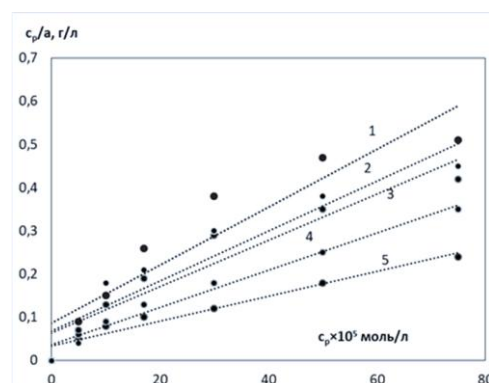


Рис.4. Спрямление изотермы адсорбции фенола (1), гидрохинона (2), резорцина (3), флороглюцина (4), пирогаллола (5) в координатах уравнения Ленгмюра (статический режим адсорбции)

Fig. 4 Straightening of the adsorption isotherm of phenol (1), hydroquinone (2), resorcin (3), floroglucin (4), and pyrogallol (5) in the coordinates of the Langmuir equation (static adsorption mode)

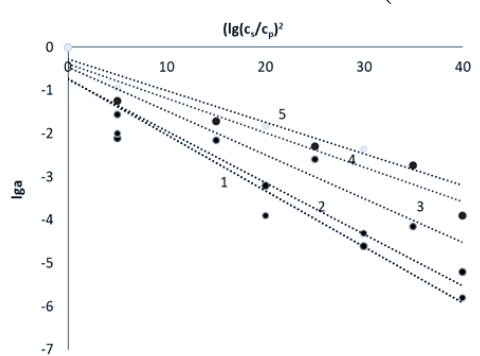


Рис.5 Спрямленные изотермы адсорбции фенола (1), гидрохинона (2), резорцина (3), пирогаллола (4), флороглюцина (5) в координатах Дубинина – Радужкевича (статический режим адсорбции).

Fig. 5 Straightened isotherms of phenol (1), hydroquinone (2), resorcin (3), pyrogallol (4), and floroglucin (5) adsorption in Dubinin-Radushkevich coordinates (static adsorption mode).

(рис.3) и спрямленные изотермы адсорбции в координатах уравнения Ленгмюра (теория ТМА) (рис.4) и в координатах Дубинина-Радужкевича (теория ТОЗМ) (рис.5).

Адсорбция всех изученных фенолов протекает по механизму физической адсорбции и соответствует изотермам Ленгмюра: начальные участки изотерм прямолинейны, а при увеличении концентрации наблюдается эффект насыщения [24]. При сравнении изотерм адсорбции (рис.3) фенола, ди- и тригидроксibenзолов было получено, что если OH-

группы располагаются в пара- или мета-положениях (гидрохинон, пирокатехин и флороглюцин), то они лучше адсорбируются, чем гидроксibenзолы OH- группы которых находятся в орто-положениях (резорцин, пирогаллол, гидроксигидрохинон). Пара- и мета-положение OH- групп в молекулах фенола исключает образование внутримолекулярной водородной связи, которая способствует экранированию активных центров в молекулах адсорбтива. Таким образом, доступ адсорбтива с заместителями в орто- и мета-положениях для ди- и тригидроксibenзолов в

Таблица 3. Адсорбционные параметры фенолов на АУ МеКС-О, рассчитанные по уравнениям Ленгмюра и Дубинина-Радushkevicha

Table 3. Adsorption parameters of phenols on AU MeKS-O, calculated using the Langmuir and Dubinin-Radushkevich equations

сорбат	$-\Delta G$, кДж/моль	a_m , ммоль/г	K	$K_L \times 10^{-3}$	r^2	E, кДж/моль	a_∞ , ммоль/г
фенол	25±2	3.5±0.2	6190	1.6	0.99	17.8±0.5	7.3±0.2
резорцин	21±1	3.1±0.1	5985	1.7	0.98	19.3±0.6	4.8±0.1
пирокатехин	23±1	3.3±0.2	6140	1.6	0.98	20.6±0.5	4.9±0.2
гидрохинон	24±2	3.4±0.2	6150	1.6	0.99	21.3±0.2	5.1±0.1
пирогаллол	26±2	3.8±0.2	6520	1.5	0.98	22.5±0.4	2.5±0.1
флороглюцин	28±1	4.3±0.2	6640	1.5	0.99	24.4±0.3	3.5±0.2
гидроксигидрохинон	24±2	4.1±0.2	6570	1.5	0.98	23.1±0.2	3.1±0.1

Таблица 4. Метрологические характеристики разработанной адсорбционно-хроматографического определения фенолов в воде

Table 4. Metrological characteristics of the developed adsorption-chromatographic determination of phenols in water

смесь	X_{cp}	$S^2 \times 10^{-4}$	$S \times 10^{-2}$	P	$t(P, f)$	$\Delta X \times 10^{-2}$	Δ , %
№1							
фенол	1.98	1.27	0.8	0.95	2.57	2	1.5
гидрохинон	1.95	1.28	0.9	0.95	2.57	4	1.0
пирокатехин	1.96	1.23	0.7	0.95	2.57	3	1.7
№2							
фенол	1.98	1.27	0.8	0.95	2.57	2	1.5
резорцин	1.93	1.25	0.7	0.95	2.57	3	1.6
флороглюцин	1.95	1.28	0.8	0.95	2.57	2	1.8
№3							
фенол	1.98	1.27	0.8	0.95	2.57	2	1.5
пирогаллол	1.94	1.26	0.7	0.95	2.57	3	1.8
гидроксигидрохинон	1.95	1.23	0.8	0.95	2.57	3	1.6

микропоры АУ лимитируется внутримолекулярным стерическим фактором [25].

На основании полученных уравнений прямых рассчитаны параметры адсорбции фенолов (табл.3). Изменение энергии Гиббса имеет отрицательное значение, что свидетельствует о самопроизвольной физической адсорбции фенолов в микропорах АУ МеКС-О; максимальной емкостью моно слоя характеризуется флороглюцин. На основании проведенного исследования можно заключить, что между

локальными активными центрами АУ МеКС-О и гидратированными молекулами фенолов образуются достаточно прочные водородные связи.

При десорбции фенолов в статических условиях наблюдается существенное замедление процесса диффузии элюента внутрь полости микропор МеКС-О и снижается обновление элюента вблизи адсорбата. Кроме того, в статическом режиме десорбции практи

Таблица 5. Сравнительная характеристика разработанной адсорбционно-хроматографической методики определения фенолов в воде с известными методиками

Table 5. Comparative characteristics of the developed adsorption-chromatographic method for determining phenols in water with known methods

операции	Разработанная методика	методика, описанная в [4]	методика, описанная в [5]
подготовка пробы к анализу	адсорбция фенолов на активном угле МеКС-О	предварительная отгонка с водяным паром жидкостно-жидкостная экстракция бутилацетатом	перевод фенола в трибромфенол; жидкостно-жидкостная экстракция трибромфенола гексаном
	десорбция фенолов спиртовым раствором КОН	реэкстракция водным раствором КОН	реэкстракция водным раствором КОН
метод определения	раздельное определение фенолов методом ВЭЖХ с УФ-детектором	перевод фенолов в окрашенное соединение с 4-аминоантипирином; суммарное определение на спектрофотометре в видимой части спектра	раздельное определение бромпроизводных фенолов методом газожидкостной хроматографией

чески отсутствует динамическое давление жидкости вытесняющие молекулы адсорбата из пористой структуры. Поэтому десорбцию фенолов из АУ МеКС-О осуществляли в динамических условиях МТС на мини-колонке[26]. В качестве элюента применяли спиртовой раствор щелочи (0.004 моль/дм³ КОН в этиловом спирте). Выход фенолов составляет 80-82%, время элюирования 90 мин.

На основании проведенных экспериментальных исследований разработана адсорбционно-хроматографическая методика определения фенолов в водных растворах. Методика адсорбционно-хроматографического определения фенолов в водных растворах: навеску (0.0250±0.002 г) АУ МеКС-О помещали в центрифужную пробирку или в мини-колонку, затем приливали исследуемую смесь фенолов и адсорбировали в статических или динамических условиях. По истечении времени АУ МеКС-О, содержащий адсорбтив, отделяли, высушивали и осуществляли десорбцию в динамических условиях. Полученный элюат

нейтрализовали до pH 6÷7 и хроматографировали методом ВЭЖХ с УФ-детектором. Количественное содержание фенолов в смесях рассчитывали по формуле, приведенной в [11], В табл. 4 приведены метрологические характеристики разработанной методики адсорбционно-хроматографического определения фенолов в воде. Продолжительность единичного анализа 120 мин в статических условиях, 180 мин – динамических условиях адсорбции; предел обнаружения фенолов 0.1 ПДК (в пересчете на фенол).

В табл.5 приведена сравнительная характеристика разработанной и известных методик определения фенолов. Разработанная методика характеризуется более безопасными условиями проведения анализа. Так стадия концентрирования осуществляется без перевода фенола в бромпроизводное; концентрирование фенолов осуществляется АУ МеКС-О, а не умеренно токсичными растворителями (гексан или бутилацетат); раздельное определение фенолов осуществляли на ВЭЖХ с УФ-детектором, который по точности

определения не уступает методу газожидкостной хроматографии. Согласно нормативному документу [3] все методики позволяют определять фенолы ниже ПДК фенола в воде.

Заключение

Таким образом, показано, что АУ МеКС-О является эффективным адсорбентом для извлечения фенолов из водного раствора в статических или динамических условиях. При этом реализуется физический механизм сорбции (изотермы Ленгмюра). С помощью ИК-спектроскопии подтверждено, что фенолы адсорбируются в микропорах АУ МеКС-О в гидратированном виде. Взаимодействие фенолов с активными центрами АУ осуществляется через «мостик из молекул воды». С помощью уравнений

Ленгмюра (ТМА) и Дубинина-Радушкевича (ТОЗМ) подтверждено, что микропоры АУ МеКС-О заполняются аналогично капиллярной конденсации. Десорбцию фенолов осуществляли в динамических условиях, элюент спиртовой раствор щелочи, степень десорбции 80-82%. Разработанная адсорбционно-хроматографическая методика определения фенолов в водных растворах апробирована на искусственно приготовленных смесях фенолов, ошибка определения не превышает 2%.

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. Rusina I.F., Veprintsev T.L., Vasiliev R.F. *Chemical Physics*, 2022; 41(2): 12-19 <https://doi.org/10.31857/S0207401X22020108>
2. Chepeleva A.D., Grobov A.M., Sirik A.V., Pliss E.M. *Russ. Zh. Physical Chemistry*, 2021; 95(5): 818-821 <https://doi.org/10.31857/S004453721050071> (In Russ.)
3. SanPiN 1.2.3685-21 "Hygienic standards and requiress of environmental factors for humans" Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation of 01/28/2021 No. 2 (as amended on 03/17/2025), 914 p. <https://mru31.fmba.gov.ru/upload/iblock/af2/4hmu5d3mz9ggzmlhgdhd4wbb547147/3685.pdf> (In Russ.)
4. RD 52.24.488.2022 Total mass concentration of volatile phenols in waters. Measurement technique by the extraction-photometric method with 4-aminoantipyrine after steam distillation. Rostov-on-Don, 2022. https://mgmtmo.ru/edumat/rd/52.24.488_2022.pdf (In Russ.)
5. MUK 4.1.646 – 4.1.660 – 96 Methodological guidelines for determining the concentrations of chemicals in water from centralized domestic and drinking water supply systems: Collection of methodological guidelines. M: Information and Publishing Center of the Ministry of Health of Russia, 1997, 112 p. (In Russ.)

6. Podolina E. A. Determination of phenols in condensed media using hydrophobic and hydrophilic extraction systems: specialty 02.00.02 "Analytical Chemistry": dissertation for the degree of Doctor of Chemical Sciences. Voronezh. 2013, 362 p. (In Russ.)
7. Churilina E.V., Sukhanov P.T., Shatalov G.V., Korenman Ya.I. *Vestnik of VSU, Series: Chemistry. Biology. Pharmacy*, 2012; 2: 101-105. (In Russ.)
8. Podolina E.A., Khanina M.A., Mukhin V.M., Rudakov O.B., Nebolsin A.E., Kozlov A.T. *Sorbtionnye I Khromatograficheskie Protssesy*. 2018; 18(6): 905-913 <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2018.18/619> (In Russ.)
9. Podolina E.A., Khanina M.A., Mukhin V.M., Lezhnina M.G., Kuznetsova Yu.A., Nebolsin A.E. *Sorbtionnye I Khromatograficheskie Protssesy*. 2020; 20(2): 240-248. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2020.20/2778> (In Russ.)
10. Podolina E.A., Mukhin V.M., Khanina M.A., Lezhnina M.G., Kuznetsova Yu.A. *Sorbtionnye I Khromatograficheskie Protssesy*. 2022; 22(5): 673-683 <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/10713> (In Russ.)
11. Activated carbons. Elastic sorbents. Catalysts, desiccants A43 and chemical absorbers based on them: Catalogue / Under the general



editorship of V. M. Mukhin. Moscow: Publishing house "Ore and metals". 2003, 280 p. (In Russ.)

12. IR spectra of the main classes of organic compounds. Reference materials. M., 2012, 55 p. (In Russ.)

13. Fazylova G.F., Vanurova E.R., Khatmulina R.M., Kudasheva F.Kh. Sorbtsionnye i Khromatograficheskie Protsessy. 2013; 13(5): 728-735. (In Russ.)

14. Abaydullina D.I. IR spectroscopy and thermochemistry of intramolecular and intermolecular hydrogen bonds of substituted phenols: specialty 02.00.04 "Physical Chemistry": dissertation for the degree of candidate of chemical sciences. Kazan, 2011, 229 p. (In Russ.)

15. Dubinin M.M., Radushkevich L.A. Report of the USSR Academy of Sciences 1947; 55(4): 331-334. (In Russ.)

16. Helmholtz G. Fundamentals of vortex theory. M.: IKI, 2002, 82 p. (In Russ.)

17. Belyaeva J.V., Krasnova T.A., Anikina A.V. Chemistry for Sustainable Development. 2010; 18; 669-673. (In Russ.)

18. Spivakova L.G. Bulletin of the Kuzbass Technical University, 2007; 2(60): 94-96. (In Russ.)

19. Fetti J., Sontheimer H. Journal of Environmental Engineering. 1987; 113(4): 764-779.

20. Kennedy J. L., Vijaya J. J., Kayalvizhi K., Sekaran G. Chem. Eng. 2007; 132: 279-287.

21. Dubinin M.M. Progress in surface and membrane science. New York: Academic Press, 1975, 9: 1-70.

22. Tobin Yu.K. Molecular theory of adsorption in porous bodies M.: Fizmatlit, 2013, 624 p. (In Russ.)

23. Yagodovsky V.D. Adsorption. Moscow: BINOM. Knowledge Laboratory, 2015, 219 p. <https://studylib.ru/doc/6254756/v.-d.-ya-godovskij-adsorbciya-2015>

24. Dabrowski A. Advances in Colloid and Interface Science. 2001; 93: 135-224. (In Russ.)

25. Timofeeva T.V., Shubina E.S., Krylov A.N., Epshtein L.M. Russian Chemical Bulletin. 1995; 44(10): 1845-1847. (In Russ.)

26. Greg S., Singh K. Adsorption, specific surface, porosity. Moscow: Mir, 1984, 306 p. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Е.А. Подолина – профессор кафедры машиностроительных и металлургических технологий, д. хим. н., доцент, почетный профессор Московского политехнического университета, Московский политехнический университет (филиал в г. Электросталь), Электросталь, Россия, e-mail: podolina70@mail.ru

Н.Г. Синельникова – и.о. заведующей кафедры машиностроительных и металлургических технологий, к.т.н., доцент, Московский государственный университет (филиал в г. Электросталь), Электросталь, Россия, e-mail: sinelnikova.mmt.epi@yandex.ru

В.М. Мухин – начальник лаборатории АУЭСИК, д. тех. наук, профессор, Научно-производственное объединение «Неорганика», Электросталь, Россия victormukhin@yandex.ru

М.А. Ханина – заведующая кафедрой химии, д. фарм.н., профессор, Государственный гуманитарно-технологический университет г. Орехово-Зуево, Россия, e-mail: khanina06@mail.ru

E.A. Podolina – Professor Department of Mechanical Engineering and Metallurgical Technologies, Doctor of Chemistry, associate professor, Honorary Professor at Moscow Polytechnic University, Moscow Polytechnic University (branch in Elektrostal), Elektrostal, Russian Federation. e-mail: podolina70@mail.ru

N.G. Sinelnikova – Acting Head of the Department of Mechanical Engineering and Metallurgical Technologies, PhD, Associate Professor, Moscow State University (branch in Elektrostal), Russian Federation, e-mail: sinelnikova.mmt.epi@yandex.ru

V.M. Mukhin – Head of the Laboratory of active carbons, elastic sorbents and catalysts, D. Tech. Sci., Professor, Scientific Production Association "Neorganika". Elektrostal, Russia, victormukhin@yandex.ru

M.A. Khanina – professor and the Head of the Chemistry Chair, Doctor of the Pharmaceuticals Sciences, Humanity-Technological State University, Orekhovo-Zuyevo, Russian Federation, e-mail: khanina06@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27.06.2025; одобрена после рецензирования 12.11.2025; принята к публикации 19.11.2025.

The article was submitted 27.06.2025; approved after reviewing 12.11.2025; accepted for publication 19.11.2025.