
**REPORTS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN**
ISSN 2224-5227

Volume 2, Number 300 (2015), 91 – 97

Sorption of phenol by lignocellulosic ion-exchangers**Chopabayeva N.N.**nazch@mail.ru

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

Key words: sawdust, epoxy resin, ion-exchanger, sorption, phenol

Abstract. Sorption of phenol by novel lignocellulosic ion-exchangers based on sawdust in comparison with untreated samples and Polyphexanum has been studied. It is established that sorption and kinetic properties of ion-exchangers depend on their chemical composition, texture and phenol extraction conditions. The nature of alkylation and amination agents effects on sorption capacity of ionites, which increases according to this order: epichlorohydrin oligomer > epichlorohydrin > ED-20, polyethylenepolyamine > polyethyleneimine > 2-vinylpyridine. Phenol sorption mechanisms at various pH of the medium have been suggested. It is shown that dependence of sorption capacity of weak-basic ion-exchangers on pH has extreme character with an absorption maximum at pH 8,0-8,5. The sorption proceeds with formation of molecular complexes stabilized by Van-der-Vaals and H-bonds. Shift of phenol adsorption maximum to acidic region at extraction with natural sorbents is caused by ionization of carboxyl groups at $\text{pH} \geq 6$. It leads to decrease of sorption efficacy due to increase of electrostatic repulsion forces between phenolate and carboxylate ions. The quantitative removal of phenol by high-basic pyridine ion-exchangers at wide pH range is caused by polyvariant mechanism of extraction, including molecular sorption of phenol in acidic and neutral solutions with formation π -complexes and H-bonds and ion-exchange sorption of phenolate ions in alkaline solutions. In contrary to natural sorbents synthesized ion-exchangers reduce high concentration of phenol in solutions (0,1-0,4 g/L) to the MCL level. It testifies to high efficacy of sorbents for purification of waste waters of various chemical productions.

УДК 547.992

Сорбция фенола лигноцеллюлозными ионитами**Чопабаева Н.Н.**nazch@mail.ru

Казахский национальный университет имени аль-Фараби

Ключевые слова: отходы древесины, эпоксидные смолы, иониты, сорбция, фенол

Аннотация. Изучена сорбция фенола ионитами на основе отходов древесины в сравнении с сорбентом Полифепан и исходными древесными опилками. Установлено, что сорбционные и кинетические свойства ионитов зависят от химического состава, текстуры сорбентов и условий извлечения субстрата. В зависимости от природы алкилирующего и аминирующего агентов емкость ионитов возрастает в ряду ОЭХГ < ЭХГ < ЭД-20, ПЭПА < ПЭИ < 2-ВП. Предложены механизмы сорбции фенола при различных кислотностях среды. Показано, что зависимость сорбционной емкости среднеосновных ионитов от pH имеет экстремальный характер с максимумом поглощения при pH 8,0-8,5. Сорбция протекает с образованием молекулярных комплексов, стабилизированных Ван-дер-Ваальсовыми и H-связями. Смещение максимума поглощения в кислую область при извлечении фенола природными сорбентами обусловлено ионизацией карбоксильных групп при $\text{pH} \geq 6$ и увеличением сил электростатического отталкивания между фенолят- и карбоксилат-ионами. Количественное поглощение фенола высокоосновными пиридиниевыми ионообменниками в широкой области pH среды обусловлено поливариантностью процесса извлечения: молекулярной сорбцией фенола с образованием π -комплексов и H-связей в кислой и нейтральной области и ионообменным связыванием фенолят-ионов в щелочных растворах. При высоком содержании фенола в растворах (0,1-0,4 г/л) иониты в отличие от природных сорбентов снижают концентрацию субстрата до уровня ПДК, что свидетельствует об эффективности их использования для очистки фенолсодержащих сточных вод различных химических производств.

Извлечение фенола и его производных из питьевых и сточных вод коксо-, угле- и нефтехимических производств является актуальной проблемой экологии и промышленности. Отсутствие должной специфичности и способности к полному улавливанию фенола известными синтетическими ионообменниками [1-3] и углеродными адсорбентами [4-7] требует разработки новых видов поглотителей на основе доступного и дешевого сырья. Значительный интерес представляют природные материалы растительного происхождения [8-10], неисчерпаемость, доступность и экологическая чистота которых привлекают к ним особый интерес. В данной работе исследованы сорбционные свойства ионитов из отходов древесины (Др) по отношению к фенолу.

Сорбенты получены химической модификацией древесных опилок эпоксидно-диановой смолой ЭД-20, эпихлоргидрином (ЭХГ) и его олигомером (ОЭХГ) с последующим аминированием хлор- и α -оксидных производных полиэтиленамином (ПЭИ), полиэтиленполиамином (ПЭПА) и 2-винилпиридином (2-ВП). Ионообменные, адсорбционно-структурные свойства и состав ионитов указаны в таблице. Сорбцию проводили в статических условиях при соотношении ионит: раствор, равном 1:600. Концентрацию фенола в растворах определяли согласно [11].

Таблица - Состав и адсорбционно-структурные характеристики сорбентов

Сорбент	СОЕ по 0,1 н р-ру HCl, мг-экв/г	Содержание азота, %		$S_{уд}$, м ² /г	$\Sigma V_{пор}$, мл/г
		N _{титр}	N _{эле}		
Древесина	-	-	-	3,3	0,358
Пф	-	-	-	>20 [12]	0,8-1,3 [12]
Др-ЭД-20-ПЭИ	5,86	8,20	11,48	6,2	0,182
Др-ЭД-20-ПЭПА	4,30	6,02	7,61	8,8	0,176
Др-ЭД-20-2-ВП	3,00	4,20	5,59	4,7	0,094
Др-ОЭХГ-ПЭИ	7,50	10,50	13,38	7,5	0,180
Др-ОЭХГ-ПЭПА	5,30	7,42	11,70	10,7	0,172
Др-ОЭХГ-2-ВП	3,45	4,83	6,17	5,5	0,090
Др-ЭХГ-ПЭИ	7,80	10,92	12,45	8,2	0,180
Др-ЭХГ-ПЭПА	6,60	9,24	11,25	11,2	0,168
Др-ЭХГ-2-ВП	4,40	6,16	6,90	5,2	0,090

Сорбционные свойства и селективность ионитов определяются их химической природой, текстурой (пористая структура, удельная поверхность) и условиями извлечения (концентрация раствора, pH среды, продолжительность поглощения, наличие примесей и т.д.) [4-6]. Основные сведения о сорбенте могут быть получены из изотерм сорбции, устанавливающих зависимость поглотительной способности сорбента от концентрации извлекаемого компонента при постоянной температуре.

На рисунке 1 представлены изотермы поглощения фенола ионитами в сравнении с исходной древесиной и сорбентом Полифепан на основе лигнина. Характер кривых свидетельствует о различной селективности и емкости сорбентов, что обусловлено их различным химическим составом и текстурой. Наибольшей избирательностью и емкостью (300-420 мг/г) обладают иониты с группами ЭД-20. Резкий подъем изотерм при малых равновесных концентрациях субстрата свидетельствует о количественном извлечении фенола при $C_{исх}=0,1-0,4$ г/л. Аниониты на основе ЭХГ и его олигомера высокоспецифичны в более разбавленных растворах ($C_{исх} = 0,1-0,2$ г/л) и обладают меньшей емкостью в растворах с концентрацией фенола $>0,2$ г/л. Самыми низкоемкими из всех исследованных являются природные сорбенты Др (85 мг/г) и Полифепан (105 мг/г).

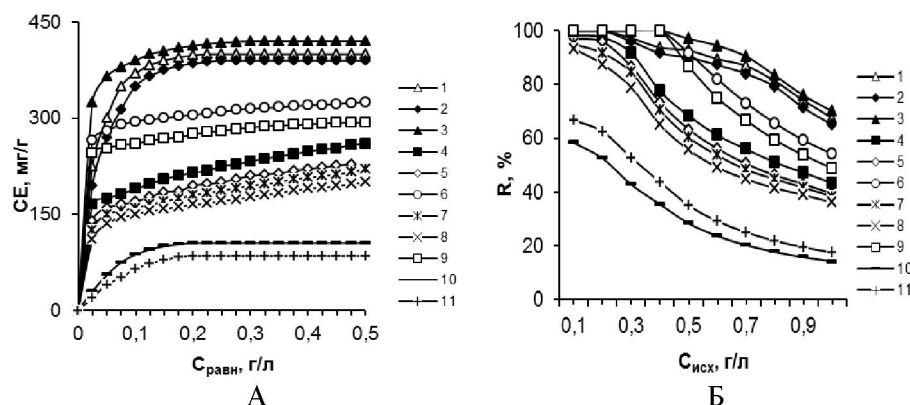


Рисунок 1. Равновесные изотермы сорбции (А) и степени извлечения фенола (Б) лигноцеллюлозными ионитами: 1 – Др-ЭД-20-ПЭИ, 2–Др-ЭД-20-ПЭПА, 3–Др-ЭД-20-2ВП, 4– Др-ЭХГ-ПЭИ, 5– Др-ЭХГ-ПЭПА, 6– Др-ЭХГ-2ВП, 7–Др-ОЭХГ-ПЭИ, 8–Др-ОЭХГ-ПЭПА, 9–Др-ОЭХГ-2ВП, 10–Др и 11–Полифепан.

Условия сорбции: pH=6,0, m_c=0,05 г, V=30 мл. То же для рис. 2.

Состояние предельного насыщения всех способных к сорбции активных групп ионитов с группами ЭД-20 достигается при C_{равн} ~ 0,15 г/л, остальных ионитов при ~0,23 г/л. Иониты на основе древесины, этерифицированной ЭД-20, ЭХГ и ОЭХГ, снижают концентрацию фенола до уровня ПДК в растворах с концентрацией фенола 0,3; 0,2 и 0,1 г/л соответственно. Степень извлечения (R) при этом варьируется от 90 до 97%. Высокая извлекающая способность ионитов и природных сорбентов характерна в сильно разбавленных растворах 1-10 мг/л (R=99,9%). В концентрированных растворах эффективность сорбции природными сорбентами по сравнению с их модифицированными аналогами значительно понижается (C_{исх}=0,1-1,0 г/л, R=60-15%).

Полученные результаты свидетельствуют, что сорбционная емкость (CE) ионитов зависит от природы алкилирующего и аминирующего агентов и возрастает в ряду: ОЭХГ < ЭХГ < ЭД-20, ПЭПА < ПЭИ < 2-ВП. Увеличение сорбционной способности при переходе от алифатических групп к ароматическим обусловлено наличием сродства фенола к последним. Из этого следует, что в адсорбционном взаимодействии участвуют не только ОН-группы, но и π -электроны ароматического кольца за счет реализации дисперсионных π - π -взаимодействий. При приблизительно одинаковых текстурных характеристиках сорбционная способность ионитов определяется природой и концентрацией введенных функциональных групп, тогда как сорбция природными сорбентами зависит не только от специфических особенностей их состава, но и адсорбционно-структурных свойств (таблица). Известно [12], что основным сорбирующим началом в Полифепане является лигнин, сложность химического строения которого обусловлена широким набором функциональных групп. Полифепан, так же как и древесина, характеризуется макропористостью и соответственно низкой величиной удельной поверхности (S_{уд} до 20 м²/г). Данные ртутной порометрии [12] свидетельствуют о наличии в нем мезо- и макропор радиусом 3-10, 100-150 и 500-5000 нм, что позволяет с высокой эффективностью сорбировать как низко-, так и высокомолекулярные субстраты. Суммарный объем пор составляет 0,8-1,3 мл/г, однако это отнюдь не сорбционные микропоры, а макропоры с радиусами порядка 10⁶ нм, что и обуславливает низкую удельную сорбционную поверхность этого материала.

В отличие от Полифепана в связывании фенола древесиной участвуют не только химически активные группы лигнина, но и целлюлоз и гемицеллюлоз, входящие в состав лигноцеллюлозного комплекса. При этом большая сорбционная способность Полифепана по сравнению с древесными опилками, по-видимому, обусловлена значительным содержанием ароматических групп, большим значением S_{БЭТ} и более низкой величиной суммарного объема пор, предполагающих присутствие меньшего, чем в древесине транспортных макропор и большего количества сорбирующих мезопор.

Важное влияние на сорбционную способность ионитов оказывает pH среды, от которой зависит степень ионизации фенола и поверхностный заряд сорбента, являющиеся функцией кислотности раствора (рисунок 2).

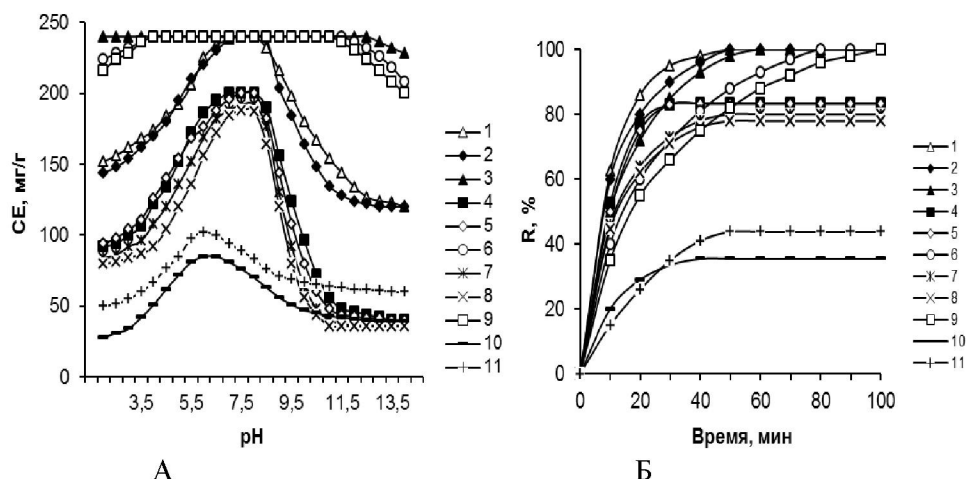
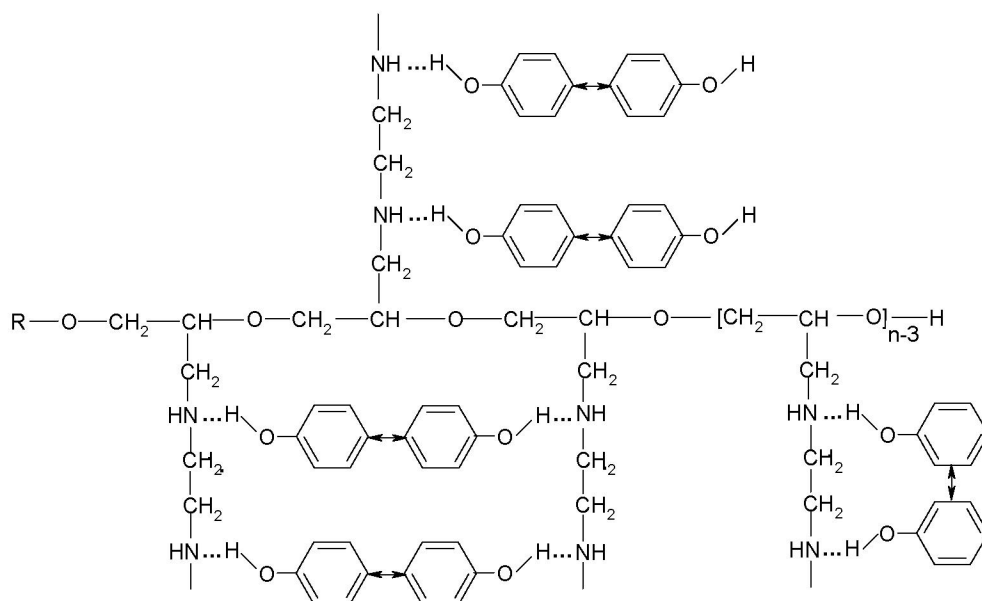


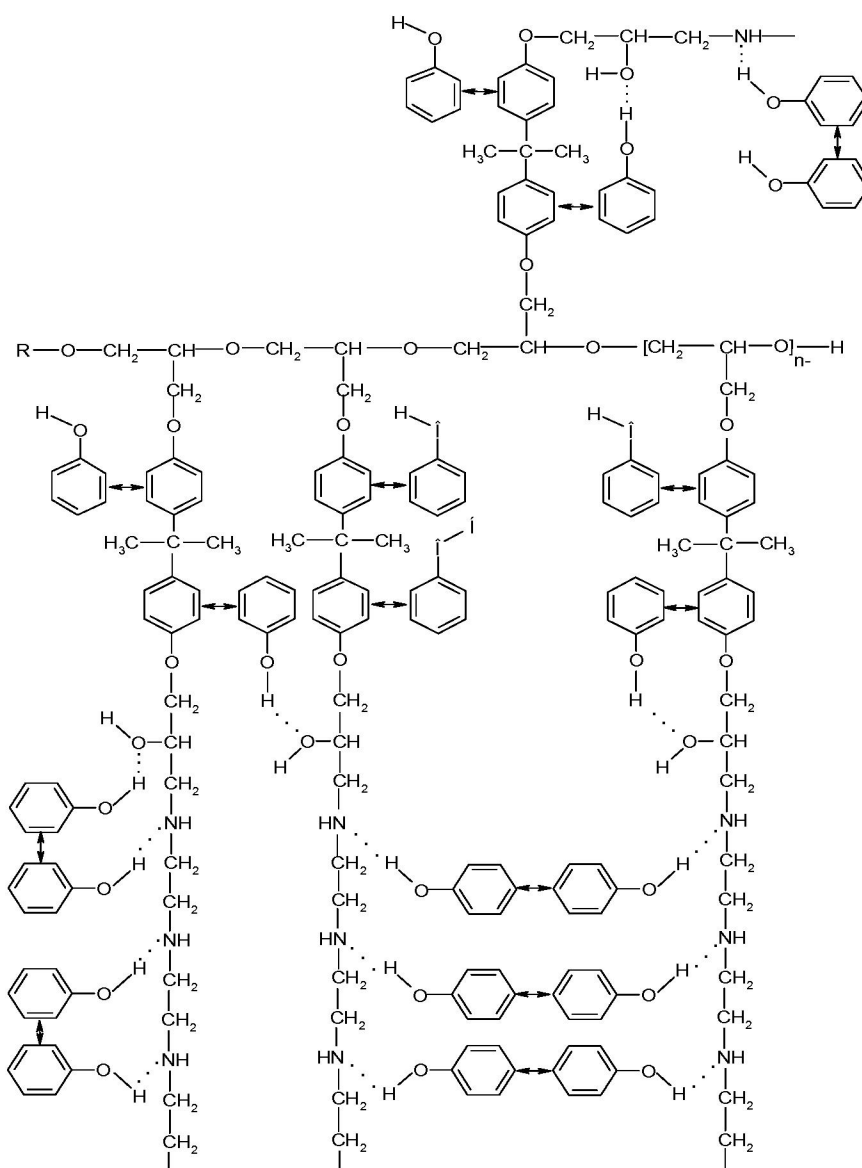
Рисунок 2. Влияние pH среды (А) и продолжительности извлечения фенола (Б) на СЕ природных сорбентов и ионитов при $C_{исх}=0,4\text{ г/л}$, pH=8,0 (1-9Б), 6,0 (10,11Б)

Из рисунка 2 видно, что для всех ионитов, кроме пиридиниевых, зависимость СЕ от pH имеет экстремальный характер. Положение максимума определяется природой функциональных групп сорбентов. Для среднеосновных анионитов с группами ПЭИ и ПЭПА увеличение СЕ при повышении pH среды от 2,0 до 8,0-8,5 связано с постепенным депротонированием атомов азота. При этом в растворе доминируют молекулярные формы фенола и их поглощение обусловлено возникновением различных типов Ван-дер-Ваальсовых взаимодействий и водородных связей с участием ароматических, карбонильных, гидроксильных и депротонированных аминогрупп ионитов:



Уменьшение сорбционной способности в сильнокислых растворах связано с конкурентной сорбцией кислоты и подавлением сорбции фенола. Снижение емкости в щелочной среде объясняется диссоциацией фенола при $\text{pH} \geq \text{pK}_\alpha$ и сложностью извлечения фенолят-ионов по типу Н-связей с полярными кислород-, азотсодержащими группами ионитов. Сорбция осуществляется посредством дисперсионных взаимодействий π -электронов ароматического кольца сорбентов и фенола. Смещение максимума поглощения в кислую область при извлечении природными сорбентами обусловлено ионизацией карбоксильных групп при $\text{pH} \geq 6$ ($\text{pK}_\alpha=5-6$) и увеличением сил электростатического отталкивания между фенолят- и карбоксилат-ионами, что приводит к снижению сорбции фенола.

Постоянство емкости в кислой и нейтральной области обусловлено молекулярной сорбцией фенола с образованием π -комплексов и Н-связей. Суммарная емкость за счет ионного обмена и молекулярной сорбции не меняется в интервале рН от 4 до 12. Некоторое снижение СЕ при рН > 12 обусловлено конкурентным поглощением ОН⁻-ионов на оиевых центрах анионитов. Конкурентная сорбция кислоты или щелочи в растворах с низким (<4) или высоким значением рН (>12) особенно заметна на примере пиридиниевых ионитов с группами ЭХГ и ОЭХГ. Ионит с группами ЭД-20, напротив, проявляет одинаковую емкость во всей исследованной области рН, что, по-видимому, связано с наличием сорбционно-активных ароматических групп в алкиларильном звене ЭД-20, участвующих в поглощении:



= 95 =

молекулой фенола [1]. Согласно [1,13], адсорбированные на поверхности ионитов молекулы фенола могут образовывать второй адсорбционный слой за счет π - π взаимодействий между бензольными кольцами как свободных, так и сорбированных молекул фенола. Отмечается, что сила притяжения между ароматическими ядрами в два раза больше, чем между молекулами воды и в четыре раза больше, чем между молекулами воды и бензола. По данным [14], вполне вероятен донорно-акцепторный механизм сорбции с участием С=О-групп сорбентов, выступающих в качестве электронодоноров, и ароматических групп фенола в качестве акцепторов.

Повышенные сорбционные свойства ионитов свидетельствуют о целесообразности изучения их кинетических свойств. Исследования проводили при рН максимального поглощения фенола. Кривые на рисунке 3 свидетельствуют о том, что иониты обладают высокими кинетическими характеристиками при извлечении фенола из концентрированных сред, где они склонны к образованию ассоциатов с низкой подвижностью. Состояние равновесия достигается в течение 30-100 мин. Концентрация адсорбированных молекул на всех образцах линейно возрастает в первые минуты контакта. При этом более половины от их общего количества извлекается в течение 10-20 мин. Концентрация фенола достигает равновесных значений в течение 30, 40, 50 мин при сорбции среднеосновными ионитами, алкилированными ЭХГ, ОЭХГ, ЭД-20, и 70, 80, 100 мин при поглощении пиридиниевыми образцами, этерифицированными ЭХГ, ОЭХГ и ЭД-20 соответственно. Из этого следует, что кинетические свойства ионитов определяются механизмом сорбции, зависящим от природы функциональных групп сорбентов. Иониты на основе хлорпроизводных древесины, аминированных ПЭИ и ПЭПА, при рН 8 поглощают преимущественно за счет Н-связей, образование которых согласно [1,15,16] является динамическим процессом, уступающим по скорости только ионообменным реакциям ($\tau = 0,2 \cdot 10^{-12}$ сек). Иониты на основе ЭД-20 извлекают так же посредством дисперсионных π - π -взаимодействий, скорость которых на несколько порядков ниже скорости образования Н-связей. Поэтому иониты с эпоксидно-диановыми и пиридиниевыми группами обладают несколько замедленной кинетикой поглощения фенола по сравнению с образцами на основе ЭХГ, ОЭХГ и полиаминов.

Природные сорбенты, являющиеся по природе слабокислотными карбоксильными катионитами, по кинетическим свойствам аналогичны среднеосновным ионообменникам. Наличие большего количества макропор в древесине ($\tau_p=40$ мин), чем в Полифепане ($\tau_p=50$ мин) обеспечивает ускоренный транспорт фенола к активным центрам адсорбента. Следует отметить, что бурые угли [13], порошкообразные и гранулированные углеродные адсорбенты из растительного сырья [7-9] несмотря на развитую $S_{уд}$ (от 5-180 до 440-1000 м²/г) извлекают фенол в течение 10, 48 и 50 ч соответственно из разбавленных растворов, где подвижность частиц сорбтива довольно высока, в количествах, сравнимых с древесиной и Полифепаном.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что растительное сырье является перспективным источником для синтеза ионитов с комплексом улучшенных сорбционных свойств по отношению к фенолу в сравнении с известными материалами минерального и синтетического происхождения. Модификация отходов древесины реакционноспособными эпоксидными соединениями и аминами позволяет повысить параметры очистки фенолсодержащих растворов до требуемых норм качества. Доступность, экологичность и экономичность природных сорбентов создают дополнительные преимущества их использования для очистки сточных вод угле-, нефте-, коксохимических, фармацевтических и бумажных производств.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Caetano M., Valderrama C., Farran A., Cortina J.L. Phenol removal from aqueous solution by adsorption and ion exchange mechanisms onto polymeric resins // J Colloid and Interface Sci. – 2009. – Vol. 338, №2. – P. 402-409.
- [2] Ming Zh.W., Long Ch.J., Cai P.B., Xing Zh.Q., Zhang B. Synergetic adsorption of phenol from aqueous solution onto polymeric adsorbents // J. Hazardous Mater. – 2006. – Vol. 128, № 2-3. – P. 123-129.
- [3] Ku Y., Lee K-Ch. Removal of phenols from aqueous solution by XAD-4 resin // J. Hazardous Mater. – 2000. – Vol. 80, № 1-3. – P. 59-68.
- [4] Zhang J., Jin XJ., Gao J.M., Zhang X.D. Phenol adsorption on carbon // Bioresources. – 2014. – Vol.9, №1. – P. 969 - 983.
- [5] Mondal N.K., Bhattacharyya S., Bhaumik R., Das B., Roy P., Datta J.K. Neural network model and isotherm study for removal of phenol from aqueous solution by orange peel ash // Appl. Water Sci. – 2014. – №2. – P. 1-12.
- [6] Dabrowski A., Podkościelny P., Hubicki Z., Barczak M. Adsorption of phenolic compounds by activated carbon: A critical review // Chemosphere. – 2005. – Vol. 58, №8. – P. 1049-1070.

- [7] Tancredi N., Medero N., Moller F., Piniz J., Plada C., Cordero T. Phenol adsorption onto powdered and granular activated carbon, prepared from Eucalyptus wood // *J. Colloid and Interface Sci.* – 2004. – Vol. 279, №2. – P. 357-363.
- [8] Gholizadeh A., Kermani M., Gholami M., Farzadkia M. Kinetic and isotherm studies of adsorption and biosorption processes in the removal of phenolic compounds from aqueous solutions: comparative study // *J Environ Health Sci Eng.* – 2013. – Vol. 11. – P. 29.
- [9] Girish C.R., Murty V.R. Adsorption of phenol from wastewater using locally available adsorbents. A review // *J Environ. Res. and Develop.* 2012. – Vol.6, №3A. – 763-772.
- [10] Girish C.R., Murty V.R. Adsorption of phenol from aqueous solution using *Lantana camara*, forest waste: kinetics, isotherm and thermodynamic studies. // *Int. Schol. Res. Notic.* – 2014. – Vol.1. – P. 1-16.
- [11] Лурье Ю.Ю., Рыбникова А.И. Химический анализ производственных сточных вод. – М.: Химия, 1966. – 280 с.
- [12] Леванова В.П. Лечебный лигнин. – СПб: Центр сорбционных технологий, 1992. – 195 с.
- [13] Polat H., Molva M., Polat M. Capacity and mechanism of phenol adsorption on lignite // *Int. J. Miner. Process.* – 2006. – Vol.79, №4. – P. 264-273.
- [14] Mattson J.S., Mark H.B., Malbin M.D., Weber W.J., Crittenden J.C. Surface chemistry of active carbon: specific adsorption of phenols. // *J. Colloid Interface. Sci.* – 1969. – Vol. 31. – P. 116-130.
- [15] Asbury J.B., Steinel T., Fayer M.D. Hydrogen Bond Networks: Structure and Evolution after Hydrogen Bond Breaking // *J. Phys. Chem.* – 2004. – Vol. 108B. – P. 6544-6554.
- [16] Пиментел Дж., Мак-Клееллан О. Водородная связь. – М.: Мир, 1964 – 462 с.

REFERENCES

- [1] Caetano M., Valderrama C., Farran A., Cortina J.L. *J Colloid and Interface Sci.*, **2009**, 338, 402-409 (in Eng).
- [2] Ming Zh.W., Long Ch.J., Cai P.B., Xing Zh.Q., Zhang B. *J.Hazardous Mater.*, **2006**, 128, 123-129 (in Eng).
- [3] Ku Y., Lee K.-Ch. *J. Hazardous Mater.*, **2000**, 80, 59-68 (in Eng).
- [4] Zhang J., Jin X.J., Gao J.M., Zhang X.D. *Bioresources*, **2014**, 9, 969-983 (in Eng).
- [5] Mondal N.K., Bhattacharyya S., Bhaumik R., Das B., Roy P., Datta J.K. *Appl. Water Sci.*, **2014**, 2, 1-12 (in Eng).
- [6] Dabrowski A., Podkoscielny P., Hubicki Z., Barczak M. *Chemosphere*, **2005**, 58, 1049-1070 (in Eng).
- [7] Tancredi N., Medero N., Moller F., Piniz J., Plada C., Cordero T. *J. Colloid and Interface Sci.*, **2004**, 279, 357-363 (in Eng).
- [8] Gholizadeh A., Kermani M., Gholami M., Farzadkia M. *J Environ Health Sci Eng.*, **2013**, 11, 29 (in Eng).
- [9] Girish C.R., Murty V.R. *J Environ. Res. and Develop.*, **2012**, 6, 763-772 (in Eng).
- [10] Girish C.R., Murty V.R. *Int. Schol. Res. Notic.*, **2014**, 1, 1-16 (in Eng).
- [11] Lurye Yu.Yu., Rybnikova A.I. Chemical analysis of industrial waste water. M.: Himija, 1966. 280 p. (in Russ).
- [12] Levanova V.P. Medical lignine. St. Petersburg: Center of sorption technologies, 1992. 195 p (in Russ).
- [13] Polat H., Molva M., Polat M. *Int. J. Miner. Process.*, **2006**, 79, 264-273 (in Eng).
- [14] Mattson J.S., Mark H.B., Malbin M.D., Weber W.J., Crittenden J.C. *J. Colloid Interface. Sci.*, **1969**, 31, 116-130 (in Eng).
- [15] Asbury J.B., Steinel T., Fayer M.D. *J. Phys. Chem.*, **2004**, 108B, 6544-6554.
- [16] Pimentel G.C., McClellan A.L. The hydrogen bond. San Francisco: W.H. Freeman, 1960. 475p. (in Eng).

УДК 547.992

ФЕНОЛДЫ ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗДЫҚ ИОН АЛМАСТЫРҒЫШТАРМЕН СІҢІРУ

Н.Н. Чопабаева

әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті

Кілт сөздер: ағаш ұнтағы, эпоксидтік шайырлар, ион алмастырғыштар, сорбциялау, фенол.

Аннотация. Ағаш ұнтағы негізіндегі ион алмастырғыштардың фенолға қатысты сорбциялық қасиеттері бастапқы ағаш ұнтағы және полифепанмен салыстырмалы түрде зерттелінді. Ионидтердің сорбциялық және кинетикалық қасиеттері олардың химиялық құрамымен текстурасына және заттың сіңіру жағдайына тәуелділігі белгіленді. Алкилдеуші және аминдеуші агенттердің табиғатына қарай ионидтердің сорбциялық сымдылығы келесі қатарда өседі: ОЭХГ<ЭХГ<ЭД-20, ПЭПА<ПЭИ<2-ВП. Ерітіндінің әртүрлі рН-ында фенолды сорбциялау механизмдері ұсынылды. Орта негіздік ион алмастырғыштардың сорбциялық сымдылығының рН-қа тәуелділігі экстремалды екендігі және сіңіру максимумы рН 8,0-8,5 өңірінде орналасқандығы анықталды. Сорбциялаудағы түзілген молекулалық комплекстер Ван-дер-Ваальс және сутектік байланыстармен тұрақталынған. Табиғи сорбенттермен сіңіргенде фенолдың жұтылу максимумы қышқыл аймаққа ығысуы рН≥6 карбоксил топтардың иондануымен және түзілген фенолят және карбоксилат иондарының өзара электростатикалық тебуіне байланысты. Жоғары негіздік ион алмастырғыштардың фенолды рН-тың кең аймағында толық сіңіруі сорбциялау механизмінің поливарианттылығына байланысты. Қышқыл және бейтарап ортада π-комплекс және Н-байланыстар түзілу арқылы фенолдың молекулалық сорбциялау процесі өтеді. Сілтілі ортада фенолят-иондар ион алмасу арқылы сорбцияланады. Жоғары концентрациялық ерітінділерден (0,1-0,4г/л) ағаш ұнтағы негізіндегі ион алмастырғыштар фенолдың концентрациясын табиғи сорбенттерге қарағанда ПДК-ға дейін жеткізеді. Алынған нәтижелер ион алмастырғыштардың әртүрлі химиялық өндірістердің ағынды суларын фенолдан тазалау үшін жоғары эффективтілігін көрсетеді.

Поступила 23.02.2015 г.