

ФОСФОРИЛИРОВАННЫЙ УГЛЕРОДНЫЙ СОРБЕНТ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

А. П. ХОХОТВА^{1*}, К. А. МАЛЫХИНА¹, П. В. ЛИШТВА¹, Я. А. ФЕДОРОВ²

¹ кафедра экологии и технологии растительных полимеров, инженерно-химический факультет, Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", Киев, УКРАИНА

² кафедра экобиотехнологии и биоэнергетики, факультет биотехнологии, Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", Киев, УКРАИНА

*email: khokhotva@bigmir.net

АННОТАЦИЯ Синтезирован фосфорсодержащий углеродный сорбент путем термической обработки (при 170°C) сосновых опилок, предварительно пропитанных растворами $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ различной концентрации. Исследовано влияние коэффициента пропитки и длительности карбонизации на эффективность извлечения $\text{Cu}(\text{II})$ из модельных растворов. По сорбции метиленового синего установлено, что отмывка сорбента после карбонизации кипячением заметно увеличивает удельную сорбционную площадь и способствует росту удельной емкости сорбента по меди. Процесс сорбции $\text{Cu}(\text{II})$ лимитируется диффузией металла в микропорах.

Ключевые слова: сосновые опилки; фосфорилирование; фосфат аммония; тяжелые металлы; адсорбция

PHOSPHORYLATED CARBON SORBENT FOR THE REMOVAL OF HEAVY METALS FROM WATER

O. KHOKHOTVA¹, K. MALYKHINA¹, P. LYSHTVA¹, Y. FEDOROK²

¹ Department of Ecology and Technology of Plant Polymers, Faculty of Chemical Engineering, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

² Department of environmental biotechnology and bioenergy, Faculty of Biotechnology and Biotechnics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT Phosphorus-containing carbon sorbent was synthesized by heat treatment at 170 °C of pine sawdust, pre-impregnated with $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ solutions of various concentrations. The ammonium salt decomposed, releasing phosphoric acid, having dehydrating properties and capable of forming of acidic ethers of lignin and cellulose. This lead to introduction of P-atom into functional groups of the carbon sorbent, that in turn had positive impact on sorption properties of the material to heavy metals. The effect of the impregnation rate and duration of carbonization on the efficiency of $\text{Cu}(\text{II})$ extraction from model solutions was studied. The best results were obtained at impregnation rate 0,7-1,0 and carbonization time 1-2 hours. The extension of carbonization time to 5 hours significantly – at more than 3 times – worsened the sorption properties of obtained materials. As found by sorption of methylene blue, boiling of the sorbent after carbonization considerably increased the specific sorption area and contributed to the growth of specific sorbent capacity on copper due to better dissolving and washing out of tar and other products of carbonization of lignocellulosic material from pore volume. Predominant mechanism of copper sorption is chelation and only 8-11% of the metal was removed due to cation exchange. Kinetic studies revealed that concentration of $\text{Cu}(\text{II})$ dropped at two times during 30 min of sorption process. The most rapid decrease was observed during first 10 min that corresponded to the metal sorption in meso- and macropores. The process of $\text{Cu}(\text{II})$ sorption was limited by diffusion of metal in the micropores. Thus, phosphorus-containing carbon sorbent obtained by heat treatment of pine sawdust, soaked with $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$, is a new material with largely improved sorption properties to heavy metals, compared to traditional carbon sorbents.

Key words: pine sawdust; phosphorylation; ammonium phosphate; heavy metals; adsorption

Введение

Активированный уголь широко используется в практике очистки природных и сточных вод. Так, уголь марки БАУ применяют для удаления из воды ионов тяжелых металлов [1]. Традиционным способом получения углей является высокотемпературный – при температурах 800-1000 °C – пиролиз сырья, в частности, лигноцеллюлозных материалов.

Уголь, полученный карбонизацией углеводородного сырья без добавления веществ-

активаторов, имеет сравнительно небольшую адсорбционную способность, поскольку его удельная поверхность небольшая, и поры заполнены преимущественно смолами и продуктами неполного сгорания, образующиеся при пиролизе. Активация угля заключается в термической обработке, в результате которой его удельная поверхность увеличивается. При этом продукты неполного сгорания частично сгорают и испаряются. Активированный уголь является неселективным адсорбентом, поэтому для повышения селективности

используют различные способы модифицирования, что приводит к его удорожанию.

Для увеличения пористости, прочности, сорбционной способности, выхода активированного угля, снижения температуры карбонизации исходные материалы пропитывают пиролитическими добавками, наиболее часто из которых применяют фосфорную кислоту в концентрации 60-85% [2-5]. В результате карбонизации в присутствии активатора в структуру углеродной поверхности внедряется гетероатом фосфора, вследствие чего полученный уголь приобретает выраженные ионообменные свойства.

Применение фосфорной кислоты в качестве активатора имеет существенный недостаток – это агрессивная жидкость, требующая при обращении с ней повышенных мер безопасности. Указанного недостатка лишены аммонийные соли этой кислоты.

Цель работы

Актуальным является получение и модификация угля в одну стадию из отходов переработки сырья сельского хозяйства или деревообрабатывающей промышленности (лигнин). Данная работа посвящена исследованию сорбционных свойств углеродных сорбентов, полученных из лигноцеллюлозного сырья с применением $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ в качестве активатора карбонизации.

Методики проведения эксперимента

В экспериментах в качестве исходного сырья для получения углеродного сорбента использовали опилки сосны *Pinus sylvestris*. Навески опилок пропитывали растворами $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ (соотношение опилки: раствор = 1:6, коэффициент пропитки 0,1-1) в течение 24 часов, после чего образцы высушивали при 105 °С и подвергали термической обработке при 170 °С 1-5 часов. После охлаждения образцы отмывали дистиллированной водой до нейтральной pH и отсутствия фосфатов в промывных водах, высушивали при 105 °С и хранили в эксикаторе. Отмывку проводили: а) холодной (20 °С) водой; б) горячей (60-70 °С) водой; в) кипятили в дистиллированной воде 2 часа с последующей промывкой горячей водой.

Величину удельной сорбционной площади полученных образцов (преимущественно мезопор) углеродного сорбента рассчитывали из изотермы адсорбции метиленового синего (МС). Изотермы были построены в диапазоне концентраций МС 20 – 400 мг/л. Для этого образцы коры 1 г перемешивали в колбах с 100 мл раствора МС при pH 6,5-7,5 в течение 24 часов при постоянном перемешивании механической мешалкой. Остаточное содержание красителя в надосадочной жидкости определяли фотометрически при длине волны 660 нм. Удельная

площадь поверхности S была рассчитана с помощью следующего уравнения:

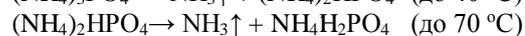
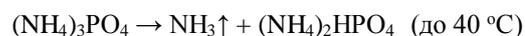
$$S = N_A \cdot \frac{a}{M_r(\text{MC})} \cdot A_m, \quad (1)$$

где $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ молекул/моль – число Авогадро; a , г/г – удельная адсорбционная емкость коры к МС; $M_r(\text{MC}) = 373,9$ г/моль – относительная молекулярная масса МС; $A_m = 1,3$ нм²/на одну молекулу – площадь, занимаемая одной молекулой МС. Размеры молекулы МС 1,7 x 0,76 x 0,325 нм [6]. В случае горизонтальной ориентации молекула МС занимает площадь 1,35 нм², при вертикальной ориентации – 0,75 нм². Величина 1,3 нм² взята как наиболее часто встречающаяся в публикациях [7-9]

Для исследования сорбционных свойств полученный углеродных материалов к навескам углей по 1 г приливали модельные растворы Cu(II) объемом 100 мл с концентрацией 153-166 мг/л и перемешивали 2 ч, после чего растворы отфильтровывали и определяли остаточную концентрацию меди в фильтрате фотометрическим методом с диэтилдитиокарбаматом Na [10], а также измеряли pH. На основе полученных данных рассчитывали величину удельной сорбции (мг/г)..

Обсуждение результатов

В зависимости от концентрации фосфата аммония, полученные опилки имели черный цвет или вкрапления частиц черного цвета в результате обугливания древесины, поскольку высушивание пропитанной опилок сопровождалось термическим разложением аммонийных солей с образованием кислых солей (гидрофосфатов, дигидрофосфатов) и фосфорной кислоты, которая имеет водоотнимающие свойства. Указанные процессы описываются следующими реакциями:



Основное действие H_3PO_4 сводится к катализу реакции дегидратации, протекающей как по внутримолекулярному механизму, так и на межмолекулярном уровне. Кроме того, H_3PO_4 может вступать в реакцию этерификации с частью гидроксильных групп с образованием кислых эфиров [11]. Формированию пор, очевидно, способствует образование газообразных продуктов разложения $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$.

Фосфорилирование лигноцеллюлозного материала приводит к образованию в его структуре одно-, двух- и трёхзамещённых фосфатных групп, вследствие чего полученный углеродный сорбент приобретает явно выраженные катионообменные свойства.

После термической обработки, синтезированный сорбент необходимо отмыть от непрореагировавших остатков активатора. Температура промывной воды существенно влияет на развитие пористости углеродного сорбента. Это видно из изотермы сорбции красителя метиленового синего, имеющей вид Ленгмюровской – мономолекулярной с насыщением сорбента в монослое (рис. 1). Так, для сорбента, полученного при коэффициенте пропитки 0,7 и времени карбонизации 2 часа удельная сорбция, а, следовательно, и удельная сорбционная площадь, возросла с увеличением температуры воды при промывке (табл. 1). Кипячение не только повышало эффективность отмытки сорбента от фосфатов и позволяло уменьшить расход воды на промывку, но и облегчало вымывание из пористого пространства продуктов пиролиза древесины, что способствовало развитию пористой структуры фосфорсодержащего сорбента. В свою очередь, увеличение пористости и, как следствие, рост удельной поверхности сорбента приводили к снижению остаточной концентрации Cu(II) (росту удельной сорбции). Поэтому все полученные в данной работе сорбенты после карбонизации промывали по третьему способу.

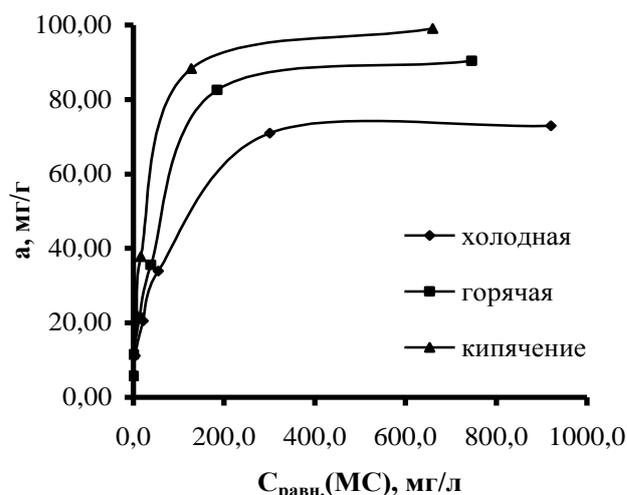


Рис. 1 – Изотермы сорбции метиленового синего (МС) фосфорилированным углеродным сорбентом при различных способах промывки

Таблица 1 – Влияние температуры промывной воды на свойства углеродного сорбента ($C(\text{Cu(II)})_{\text{нач.}} = 100 \text{ мг/л}$)

Промывка	Свойства углеродного сорбента			
	удельная сорбция метиленового синего, мг/г	удельная поверхность, м ² /г	остаточная концентрация Cu(II), мг/л	удельная сорбция Cu(II), мг/г
холодная	72,95	153	61,2	5,04
горячая	90,39	189	59,5	5,21
кипячение + горячая промывка	99,02	207	53,0	5,86

С увеличением коэффициента пропитки и при непродолжительной карбонизации сорбционные свойства фосфорсодержащего углеродного материала возрастают (рис. 2). Длительная карбонизация, даже без увеличения температуры выше 170 °С, по видимому, оказывает значительное деструктивное воздействие пористую структуру и состав функциональных групп, вследствие чего вне зависимости от коэффициента пропитки сорбционная емкость остается практически неизменной.

Для образцов с длительностью карбонизации 1 час рН растворов Cu(II) после сорбции снижается с 5,35 до 3,8-3,5 в зависимости от коэффициента пропитки. Поскольку в процессе извлечения ионов меди задействованы несколько механизмов, основными из которых являются ионный обмен и комплексообразование, по снижению рН в процессе сорбции можно определить, что при $X = 0,14$ на ионный обмен приходится 8% сорбированной меди и с увеличением X эта доля возрастает до 11,4 % при $X = 1$. При длительности пропитки 5 часов рН после сорбции практически не зависела от X и составляла

3,7-3,76. Принимая также во внимание достаточно низкую емкость сорбента, подвергшегося длительной карбонизации, можно сделать вывод, что медь удалялась на карбоксильных и фосфатных катионообменных группах, а доля комплексообразования в этом процессе была минимальна.

Изучение кинетики сорбционного извлечения меди показало, что концентрация меди в течение 30 мин уменьшается в два раза, после чего изменяется незначительно (рис. 3).

Из обработки результатов согласно диффузионной модели Вебера-Морриса, которая в линейной форме имеет вид

$$q_t = k_{id}t^{0.5} + c, \quad (2)$$

где q_t – количество меди, адсорбированной в момент времени t , мг/г; k_{id} – коэффициент диффузии внутри зерен сорбента, мг/г мин; t – время сорбции; c – константа, связанная с толщиной диффузионного слоя, видно (рис. 4), что первые 10 мин, которым

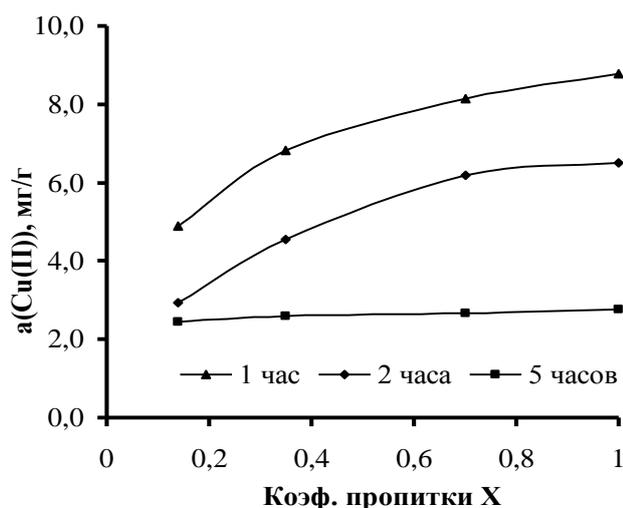


Рис. 2 – Зависимость удельной сорбции Cu(II) от коэффициента пропитки фосфоросодержащего углеродного материала

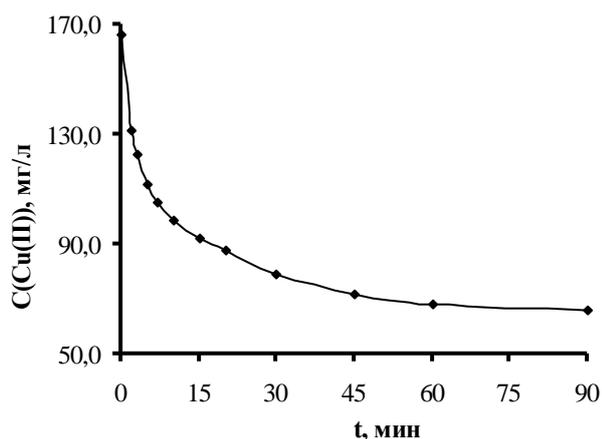


Рис. 3 – Изменение концентрации Cu(II) от времени сорбции.

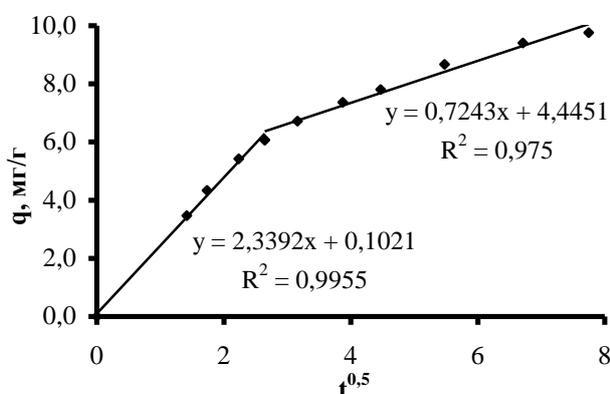


Рис. 4 – Модель Вебера-Морриса для сорбции Cu(II) фосфорилированным углеродным сорбентом

соответствует наиболее быстрое снижение концентрации Cu(II) , сорбция протекает в мезо- и макропорах (начальный линейный участок с наибольшим углом наклона).

Далее происходит диффузия ионов металла вглубь микропор с последующим установлением в гетерофазной системе адсорбционного равновесия (небольшой угол наклона второго участка), коэффициент диффузии внутри зерен падает в 3,2 раза.

Выводы

Пропитка древесных опилок раствором фосфата аммония с их последующей температурной обработкой позволяет проводить процесс карбонизации при гораздо более низких температурах и получить сорбционный материал, обладающий повышенной емкостью к тяжелым металлам.

С увеличением коэффициента пропитки сырья раствором фосфата аммония при одной и той же длительности карбонизации сорбционная емкость увеличивалась. Увеличение времени карбонизации приводило к заметному ухудшению сорбционных свойств полученного материала. Преимущественным механизмом извлечения Cu(II) было комплексообразование с поверхностными функциональными группами; на ионный обмен, в зависимости от коэффициента пропитки, приходилось 8-11% удаляемого металла.

Извлечение ионов меди происходило преимущественно в мезо- и макропорах; сорбционный процесс лимитируется диффузией металла в микропорах.

Список литературы

1. Гимаева, А. Р. Сорбция ионов тяжелых металлов из воды активированными углеродными адсорбентами / А. Р. Гимаева, Э. Р. Валинурова, Ф. Х. Кудашева, Д. К. Игдавлетова // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2011. – Т.П. – № 3. – С. 350 – 356.
2. Toles, C. A. Phosphoric Acid Activation of Nutshells for Metal and Organic Remediation: Process Optimization / C. A. Toles, W. E. Marshall, M. M. Johns // Chem. Technol. Biotechnol. – 1998. – № 72. – P. 255 – 263. – doi: 10.1002/(SICI)1097-4660(199807)72:3<255::AID-JCTB890>3.0.CO;2-P.
3. Aggarwal, P. The Production of Active Carbon from Corn Cob by Chemical Activation / P. Aggarwal, D. Dollimore // Thermal Anal. – 1997. – № 50. – P. 525 – 531. – doi: 10.1007/BF01979025.
4. Abdel-Nasser, A. Adsorption characteristics of activated carbons obtained from corncobs / A. Abdel-Nasser, El-Hendavy, S.E. Samra, B. S. Girgis // Colloids and Surfaces A: Physicochem. and Eng. Aspects. – 2001. – № 180. – P. 209 – 221. – doi: 10.1016/S0927-7757(00)00682-8.
5. Puziy, A. M. Surface chemistry of phosphorus-containing carbons of lignocellulosic origin / A. M. Puziy, O. I. Poddubnaya, A. Martinez-Alonso, F. Suárez-García,

- Juan M. D. Tascón** // *Carbon*. – 2005. – № 43 (14). – P. 2857 – 2868. – doi: 10.1016/j.carbon.2005.06.014.
6. **Yukselen, Y.** Suitability of the methylene blue test for surface area, cation exchange capacity and swell potential determination of clayey soils / **Y. Yukselen, A. Kaya** // *Engineering Geology*. – 2008. – 102. – P. 38 – 45. – doi: 10.1016/j.enggeo.2008.07.002.
 7. **Santamarina, J. C.** Specific surface: determination and relevance / **J. C. Santamarina, K. A. Klein, Y. H. Wang, E. Prencke** // *Canadian Geotechnical Journal*. – 2002. – 39, № 1. – P. 233 – 241. – doi: 10.1139/T01-077.
 8. **Attia, A. A.** Capacity of activated carbon derived from pistachio shells by H_3PO_4 in the removal of dyes and phenol / **A. A. Attia, B. S. Girgis, S. A. Khedr** // *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. – 2003. – 78, № 6. – P. 611 – 619. – doi: 10.1002/jctb.743.
 9. **Aringhieri, R.** Testing a simple methylene blue method for surface area estimation in soils / **R. Aringhieri, G. Pardini, M. Gispert, A. Sole** // *Agrochimica*. – 1992, 36, № 3. – P. 224 – 232.
 10. **Хохотва, О. П.** Видалення з води іонів міді модифікованим феритним сорбентом / **О. П. Хохотва, Ю. І. Аветисян** // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки*. – 2014, – № 23, – С. 133 – 136.
 11. **Никитин, Н. И.** Химия древесины и целлюлозы / **Н. И. Никитин, М-Л: Изд-во академии НАУК СССР, 1962, 711 с.**
- 10.1002/(SICI)1097-4660(199807)72:3<255::AID-JCTB890>3.0.CO;2-P.
 3. **Aggarwal, P., Dollimore, D.** The Production of Active Carbon from Corn Cob by Chemical Activation, *Thermal Anal.* 1997, № 50, 525 - 531, doi: 10.1007/BF01979025.
 4. **Abdel-Nasser, A., Hendavy, El., Samra, S.E., Girgis, B. S.** Adsorption characteristics of activated carbons obtained from corncobs, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. and Eng. Aspects*, 2001, № 180, 209 - 221, doi: 10.1016/S0927-7757(00)00682-8.
 5. **Puziy, A. M., Poddubnaya, O. I., Martinez-Alonso, A., Suárez-García, F., Juan, M. D. Tascón** Surface chemistry of phosphorus-containing carbons of lignocellulosic origin, *Carbon*, 2005, № 43 (14), 2857 - 2868, doi: 10.1016/j.carbon.2005.06.014.
 6. **Yukselen, Y., Kaya, A.** Suitability of the methylene blue test for surface area, cation exchange capacity and swell potential determination of clayey soils, *Engineering Geology*, 2008, 102, 38 - 45, doi: 10.1016/j.enggeo.2008.07.002.
 7. **Santamarina, J. C., Klein, K. A., Wang, Y. H., Prencke, E.** Specific surface: determination and relevance/ // *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39, № 1, 233 - 241, doi: 10.1139/T01-077.
 8. **Attia, A. A., Girgis, B. S., Khedr, S. A.** Capacity of activated carbon derived from pistachio shells by H_3PO_4 in the removal of dyes and phenol, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2003, 78, № 6, 611 - 619, doi: 10.1002/jctb.743.
 9. **Aringhieri, R., Pardini, G., Gispert, M., Sole, A.** Testing a simple methylene blue method for surface area estimation in soils, *Agrochimica*, 1992, 36, № 3, 224-232.
 10. **Khokhotva, O. P., Avetisyan, Y. I.** Vydalennya z vody ioniv midi modyfikovanym ferytnym sorbentom, *Problemy vodopostachannya, vodovidvedennya ta hidravliky*, 2014, № 23, 133 - 136.
 11. **Nikitin, N. I.** Himija drevesiny i celljulozy. *M-L: Izd-vo akademii nauk SSSR, 1962, 711 s.*

Bibliography (transliterated)

1. **Gimaeva, A. R., Valinurova, Je. R., Kudasheva, F. H., Igdavletova, D. K.** Sorbcija ionov tjazhelyh metallov iz vody aktivirovannymi uglerodnymi adsorbentami, *Sorbcionnye i hromatograficheskie processy*, 2011, Т.Р. № 3, 350 - 356.
2. **Toles, C. A., Marshall, W. E., Johns, M. M.** Phosphoric Acid Activation of Nutshells for Metal and Organic Remediation: Process Optimization, *Chem. Technol. Biotechnol.* 1998, № 72, 255 – 263, doi:

Сведения об авторах (About authors)

Хохотва Александр Петрович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт" им. И. Сикорского, доцент кафедры экологии и технологии растительных полимеров; г. Киев, Украина; e-mail: khokhotva@bigmir.net.

Oleksandr Khokhotva – Ph. D., Docent, Associate Professor, Department of Ecology and Technology of Plant Polymers, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; e-mail: khokhotva@bigmir.net.

Малыхина Карина Артуровна – аспирант кафедры экологии и технологии растительных полимеров, Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт" им. И. Сикорского; г. Киев, Украина; e-mail: malykhinakarina@gmail.com.

Karina Malykhina – graduate student of Department of Ecology and Technology of Plant Polymers, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; e-mail: malykhinakarina@gmail.com.

Лиштва Павел Валерьевич – студент кафедры экологии и технологии растительных полимеров, Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт" им. И. Сикорского, г. Киев, Украина; e-mail: pavell95ua@yahoo.com.

Pavlo Lyshtva – student of Department of Ecology and Technology of Plant Polymers, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; e-mail: pavell95ua@yahoo.com.

Федорок Яна Анатолієвна – студент кафедри екобіотехнології та біоенергетики, факультет біотехнології, Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт" им. И. Сикорского, г. Киев, Украина; e-mail: yana_fedorok@mail.ru.

Yana Fedorok – student of Department of environmental biotechnology and bioenergy, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; e-mail: yana_fedorok@mail.ru.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Хохотва, А. П. Фосфорилированный углеродный сорбент для очистки воды от тяжелых металлов / **А. П. Хохотва, К. А. Малыгина, П. В. Лиштва, Я. А. Федорок** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 205-210. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.29.

Please cite this article as:

Khokhotva, O., Malykhina, K., Lyshtva, P., Fedorok, Y. Phosphorylated carbon sorbent for the removal of heavy metals from water. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, 7 (1229), 205-210, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.29.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Хохотва, О. П. Фосфорильований вуглецевий сорбент для очистки води від важких металів / **О. П. Хохотва, К. А. Малыгина, П. В. Лиштва, Я. А. Федорок** // *Вісник НТУ «ХПИ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 205-210. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.29.

АНОТАЦІЯ Синтезовано фосфорсодержащий вуглецевый сорбент шляхом термічної обробки (при 170 °С) соснової тирси, попередньо просоченої розчинами $(\text{NH}_4)_2\text{PO}_4$ різної концентрації. Досліджено вплив коефіцієнта просочення і тривалості карбонізації на ефективність вилучення Cu(II) з модельних розчинів. За сорбцією метиленового синього встановлено, що відмивання сорбенту після карбонізації кип'ятінням помітно збільшує питому сорбційну поверхню і сприяє зростанню питомої ємності сорбенту по міді. Процес сорбції Cu(II) лімітується дифузійною металою в мікропорах.

Ключові слова: соснова тирса; фосфорилування; фосфат амонію; важкі метали; адсорбція

Поступила (received) 27.02.2017