



УДК 662.71+630*867.5

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.4.140

ПАРОГАЗОВАЯ АКТИВАЦИЯ ДРЕВЕСНОГО УГЛЯ ИЗ БАМБУКА**К.Н. Чу¹, асп.****А.А. Спицын¹, канд. техн. наук, доц.****К.А. Романенко², асп.****Д.А. Пономарев¹, д-р хим. наук, проф.**

¹Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, литер У, Санкт-Петербург, Россия, 194021; e-mail: songnghich19a@gmail.com, spitsyn.andrey@gmail.com, dponomarev1@mail.ru

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: kristinaromanenko@yandex.ru

Исследован пиролиз стеблей бамбука (*Bambos bambusa*) в целях установления сохранения им исходной структуры в получаемом угле-сырце. Кусочки бамбука подвергались медленному пиролизу по периодической схеме в 4-литровом реакторе из нержавеющей стали, снабженном внешним электрическим нагревателем. Активация угля-сырца проводилась перегретым водяным паром при температуре 970 °С. Для полученного монолитного наноструктурного углеродного материала определены адсорбционная активность по иоду, удельная площадь поверхности, объем пор и их распределение по размеру. Анализ изотерм сорбции-десорбции для полученного материала и диаграмм распределения пор по размерам показал, что этот материал имеет микропористую структуру. Объем микропор, установленный различными методами, составляет 0,26...0,29 см³/г и практически не зависит от метода определения. Микропоры вносят основной вклад в пористую структуру угля, занимая 85 % общего объема.

Ключевые слова: бамбук, парогазовая активация, активированный уголь, монолитный углерод, пиролиз.

Введение

В настоящее время активированный уголь используется во многих процессах химической промышленности для очистки различных газов и сточных вод, а также в пищевой промышленности и медицине. Его применение позволяет удовлетворять постоянно возрастающие требования к чистоте питьевой воды. Большой интерес представляют расширение сырьевой базы для получения активированного угля и улучшение его сорбционной способности.

Сырьем для получения этого ценного продукта могут служить различные растительные материалы: древесина, бамбук, торф, скорлупа орехов, фруктовые косточки и др.

Для цитирования: Чу К.Н., Спицын А.А., Романенко К.А., Пономарев Д.А. Парогазовая активация древесного угля из бамбука // Лесн. журн. 2018. № 4. С. 140–149. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.4.140

Процесс производства активированного угля состоит из двух этапов: пиролиза (карбонизации) и активации, которая осуществляется как химическими, так и физическими (парогазовыми) методами. При химической активации получают уголь с высокой активностью, но содержащий различные неорганические примеси, поэтому он требует дорогостоящей стадии очистки. С использованием парогазовых методов получают чистый, не нуждающийся в дополнительной обработке, продукт, но имеющий меньшую удельную площадь поверхности.

Выбор бамбука обусловлен тем, что получаемый из него активированный уголь отличается относительно высокой механической прочностью и очень тонкими порами, что позволяет применять его для медицинских, пищевых и других целей. При этом решается проблема рационального использования отходов переработки бамбука, которые в большом количестве образуются на территориях стран с тропическим климатом. Эти отходы представляют собой удобное для переработки вторичное сырье низкой себестоимости.

Высокотемпературный пиролиз бамбука в токе азота и водяного пара был изучен авторами работ [7, 11, 12, 15–17], где доказана возможность получения угля, пригодного для дальнейшей активации. Результаты химической активации угля из бамбука показали принципиальную возможность производства продукта с хорошими сорбционными свойствами [3, 4, 8–10, 14, 18]. Бамбуковый активированный уголь выпускают в виде тонкодисперсного порошка, что, безусловно, повышает удельную площадь поверхности, но уничтожает естественную «нативную» структуру бамбука. Однако физико-химических исследований активированного угля как наноструктурированного материала с сохраненной структурой «нативного» бамбука выполнено не было.

Цель настоящего исследования – осуществление пиролиза стеблей бамбука (*Bambos bambusa*) с сохранением его исходной структуры в полученном угле-сырце и проведение его дальнейшей активации водяным паром с определением сорбционных свойств пористого материала.

Объекты и методы исследования

Стебли бамбука возрастом 5 лет были заготовлены во Вьетнаме и разрезаны на куски размером 10×5×3 см. Физические параметры исходного материала, такие как влажность и зольность, определяли по методикам [2]. Влажность воздушно-сухого сырья составляла 14,5 %, зольность в расчете на абсолютно сухое вещество – 1,3 %.

Для получения угля-сырца куски бамбука подвергали медленному пиролизу на стенде периодического действия в 4-литровом из нержавеющей стали реакторе, снабженном внешним электрическим нагревателем. Нагрев контролировали пропорционально-интегрально-дифференцирующим (ПИД) регулятором. Для сбора и обработки экспериментальных данных использовали систему OpenScada, установленную на персональном компьютере под управлением операционной системы Debian 8. Температуру измеряли на внешней стенке муфельной печи, внутри сырья, в воде, входящей в конденсатор-холодильник и выходящей из него, а также в отходящих из реактора парагазах. Термопару, расположенную на внешней стенке муфельной печи и не подключенную к SCADA, использовали для контроля нагрева ПИД-регулятора. Скорость нагрева до температуры 800 °С в среднем составляла 2 °С/мин.

Далее содержимое реактора охлаждали в атмосфере газов пиролиза. Сконденсированные жидкие продукты пиролиза взвешивали. Схема установки для проведения пиролиза представлена на рис. 1.

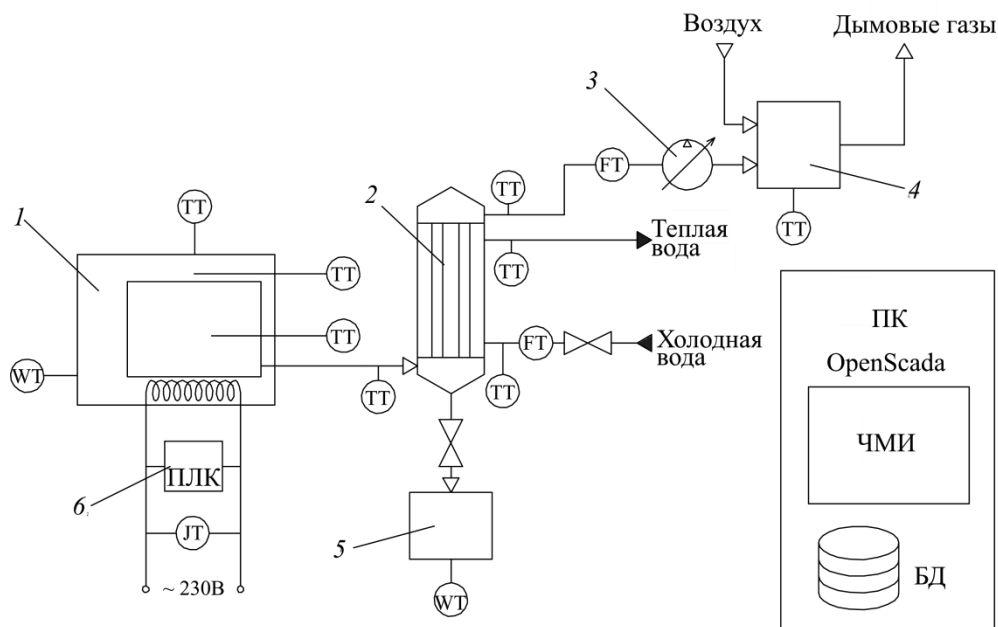


Рис. 1. Схема стандовой установки для проведения пиролиза: 1 – реактор; 2 – конденсатор-холодильник; 3 – насос; 4 – топочная камера; 5 – приемная емкость; 6 – программируемый логический контроллер (ПЛК); ТТ – измеритель температуры; ЛТ – измеритель мощности; WT – датчик веса; FT – измеритель расхода потока

Для дальнейшей активации образец угля-сырца распиливали на пластинки толщиной 1...2 мм перпендикулярно волокнам. Пластинку угля-сырца массой 0,3 г помещали в трубчатый реактор с сетчатой перегородкой, вращающийся со скоростью 1 об./мин. В реактор подавали водяной пар. Продолжительность активации при температуре 970 °С в опытах составляла 5, 15, 20 и 25 мин. По окончании эксперимента подачу пара прекращали. После полного охлаждения реактора активированный уголь взвешивали и определяли потерю массы при активации (степень обгара).

Стандовая установка для проведения активации изображена на рис. 2.

Определение адсорбционной активности образцов активированного угля по иоду было проведено в соответствии с ГОСТ 6217–74. Навеску угля (около 1 г) помещали в коническую колбу вместимостью 250 см³, добавляли 100 см³ 0,1 н. раствора иода в иодистом калии и вручную взбалтывали в течение 30 мин. Затем раствору давали отстояться и пипеткой (чтобы не попали частички угля) отбирали 10 см³ раствора, эту пробу помещали в коническую колбу вместимостью 50 см³ и титровали раствором тиосульфата натрия в присутствии крахмала до исчезновения синей окраски. Параллельно проводили контрольный опыт с раствором иода в иодистом калии.

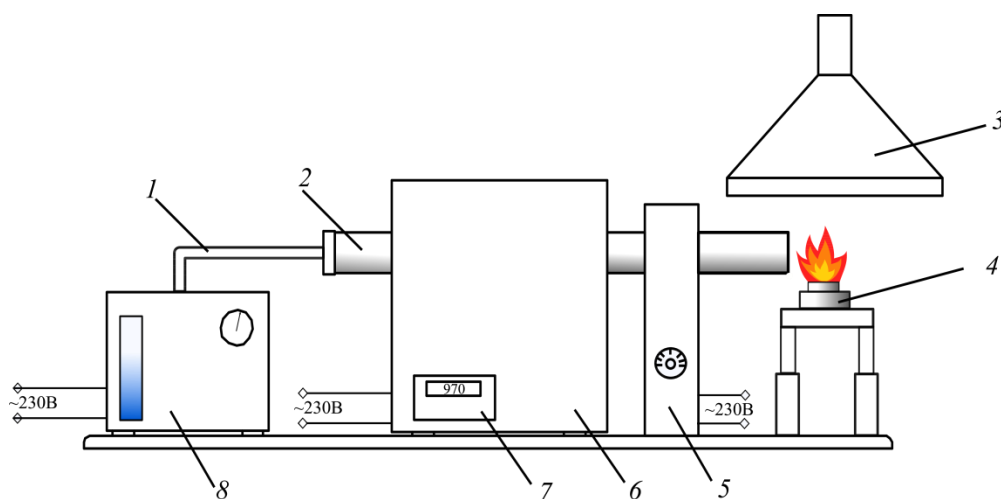


Рис. 2. Схема стендовой установки для активации угля-сырца: 1 – паропровод; 2 – реактор; 3 – вытяжной конус; 4 – горелка; 5 – редуктор; 6 – трубчатая печь; 7 – терморегулятор; 8 – парогенератор

Адсорбционную активность угля по иоду (X , %) вычисляли по следующей формуле:

$$X = \frac{(V_1 - V_2)0,0127 \cdot 100 \cdot 100}{10m},$$

где V_1 – объем раствора тиосульфата натрия концентрацией 0,1 моль/дм³ (0,1 н.), израсходованный на титрование 10 см³ раствора иода в иодистом калии до обработки углем, см³;

V_2 – объем раствора тиосульфата натрия концентрацией 0,1 моль/дм³ (0,1 н.), израсходованный на титрование 10 см³ раствора иода в иодистом калии после обработки углем, см³;

0,0127 – масса иода, соответствующая 1 см³ раствора тиосульфата натрия концентрацией 0,1 моль/дм³ (0,1 н.), г;

100 – объем раствора иода в иодистом калии, взятый для осветления углем, см³;

m – масса навески угля, г.

Общая площадь поверхности и объем пор образцов найдены измерением адсорбции азота при 77 К на автоматизированной системе ASAP-2020 («Micrometrics»). Для определения удельной площади поверхности $S_{\text{ВЕТ}}$ использована модель Браунауэра–Эмета–Теллера (ВЕТ). Объем ($V_{\text{пор}}$, см³/г) и диаметр ($D_{\text{пор}}$, нм) пор образцов вычислены методами соответственно Баррета–Джойнера–Халенда (ВН) и t-анализа.

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе пиролиза было получено 53,8 г угля-сырца (35,6% от абс. сухого сырья (а.с.с.)); 72,8 г жидких (31,1% от а.с.с.) и 50,4 г газообразных (33,3% от а.с.с.) продуктов. Выход продуктов хорошо согласуется с литературными данными [5, 6]. Итог пиролиза – углеродный материал, сохраняющий природную пористость, присущую бамбуку.

После активации были получены активные угли (АУ) с различной степенью обгара.

Установлено, что увеличение продолжительности обработки приводит к повышению степени обгара, сильный разброс значений которого можно объяснить механическими потерями и другими, пока не выявленными причинами. О степени термохимической обработки конечного материала следует судить по степени обгара, а не по продолжительности активации.

Адсорбционная активность по иоду представляет собой один из важнейших показателей АУ и характеризует их микропористую структуру [1]. Влияние степени обгара на адсорбционную активность углей представлено на рис. 3.

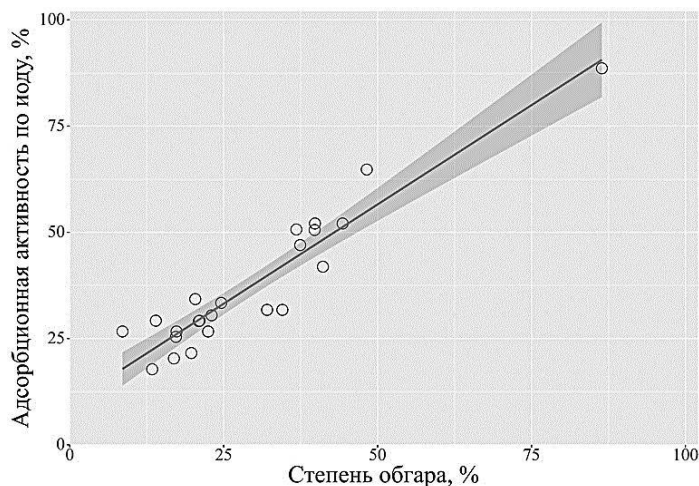


Рис. 3. Адсорбционная активность АУ из бамбука по иоду

Как видно из рис. 3, адсорбционная активность полученных углей изменяется от 20 до 60% и приближается к активности промышленных активированных углей из березы БАУ-А (60%). Увеличение продолжительности активации и, соответственно, степени обгара приводит к развитию пористой структуры, что, как и ожидалось, способствует росту адсорбционной активности АУ.

Согласно классификации IUPAC изотерма адсорбции-десорбции азота для полученного АУ при продолжительности обработки 15 и 25 мин (рис. 4) может быть отнесена к изотерме типа I [13].

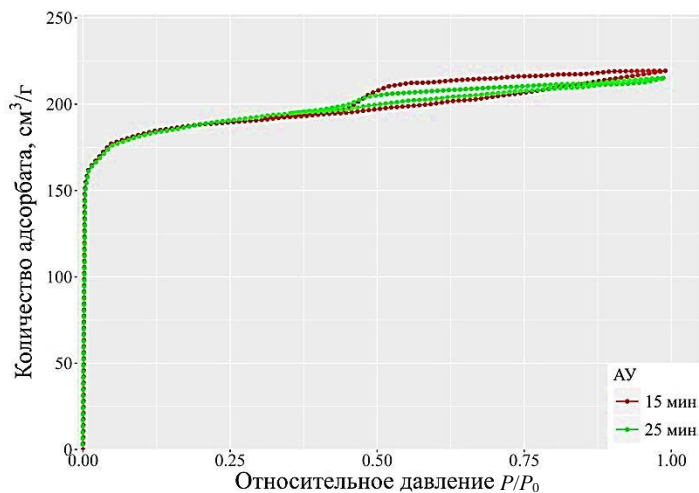
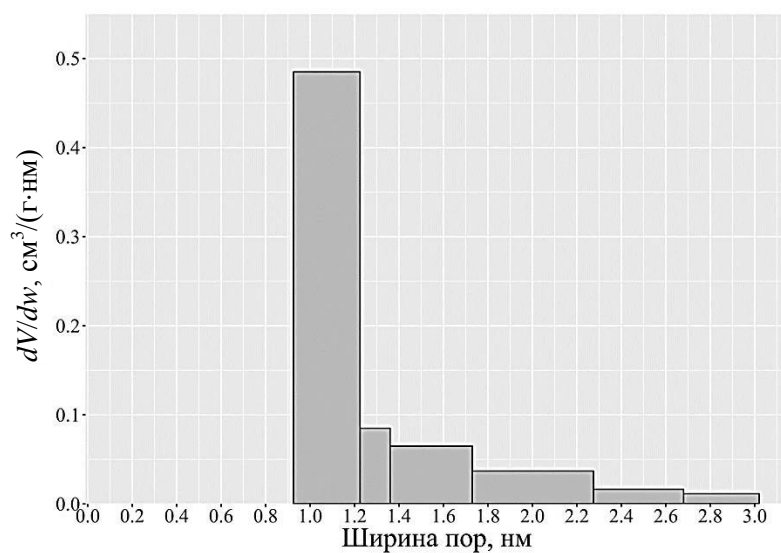
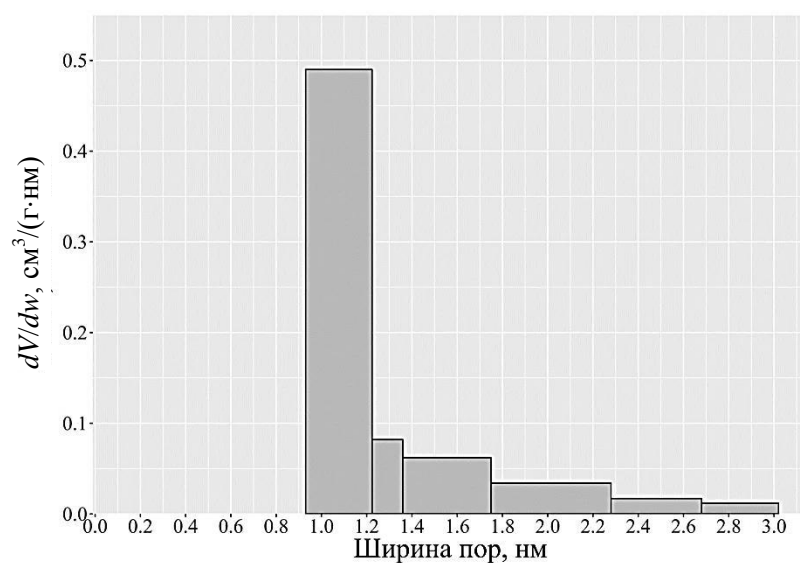


Рис. 4. Изотермы адсорбции АУ из бамбука

Такой вид изотермы указывает на то, что полученный наноструктурный материал имеет в основном микропористую структуру. Диаграммы распределения пор по размерам, представленные на рис. 5, подтверждают это предположение.



a



б

Рис. 5. Распределение пор по ширине для АУ из бамбука при разной продолжительности активации: *a* – 15 мин; *б* – 25 мин

Средняя ширина пор и объем микропор приведены в табл. 1, характеристики удельной поверхности, объем мезо- и микропор для полученного АУ – в табл. 2.

Таблица 1

Характеристики пористости АУ, полученного из бамбука

Продолжительность обработки, мин	Средняя ширина пор (по методу Хорвата–Кавазое), нм	Удельная поверхность, м ² /г, по методу		
		ВЕТ (суммарная)	t-анализ	
			мезо- и макропор	микропор
15	1,13	540,3	80,8	459,6
25	1,13	535,9	65,3	470,6

Таблица 2

Объем пор АУ, полученного из бамбука

Продолжительность обработки, мин	Суммарный объем пор (ВЕТ), см ³ /г	Объем мезопор (1,7...50,0 нм) (ВЛН), см ³ /г	Объем микропор, см ³ /г, по методу			
			ВЕТ	t-анализ	Хорвата–Кавазое	Дубинина–Радушкевича
15	0,33	0,05	0,28	0,26	0,28	0,28
25	0,34	0,06	0,29	0,26	0,29	0,29

В соответствии с принятой методологией рассмотрению подвергались данные в диапазонах относительных давлений $P/P_0 < 0,05$ (табл. 1) и $P/P_0 = 0,05...1,00$ (табл. 2).

Из сравнения данных для образцов АУ с продолжительностью активации 15 и 25 мин видно, что увеличение продолжительности не влияет на характеристики микропористой структуры полученных материалов. Объем микропор колеблется от 0,26 до 0,29 см³/г и практически не зависит от метода определения. Микропоры вносят основной вклад в пористую структуру угля, их объем составляет 85 % от общего объема. Эти данные находятся в соответствии с предыдущим выводом, полученным при рассмотрении изотерм адсорбции, которые характеризуют полученный АУ как микропористый материал.

Удельная площадь поверхности образцов $S_{\text{ВЕТ}}$ во всех экспериментах составляет 540 м²/г, в то время как ранее [14] для неактивированного угля из бамбука $S_{\text{ВЕТ}} = 23$ м²/г. Таким образом, применение парогазовой активации позволило увеличить удельную площадь поверхности по сравнению с приведенной выше работой.

Несмотря на то, что химическая активация с использованием КОН [18] позволила повысить $S_{\text{ВЕТ}}$ у порошкового АУ до 3208 м²/г, считаем, что полученный микропористый структурный материал обладает достаточной удельной площадью поверхности, чтобы его можно было использовать как матрицу для создания гетерогенных структур, которые найдут применение в электрохимических накопителях энергии.

Заключение

Активацией водяным паром впервые получен монолитный углеродный наноструктурный материал, для которого определены сорбционные характеристики, объем микропор, характеристики пористой структуры, удельная площадь поверхности. Четырьмя независимыми методами (Хорвата–Кавазое,

Дубинина–Радужкевича, ВЕТ, t-анализом) найден объем микропор (в среднем $0,28 \text{ см}^3/\text{г}$), который составляет 85 % от общего объема АУ.

Подобные материалы могут быть использованы как матрицы для создания гибридных углеродных структур с развитой подготовленной внутренней поверхностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джэйлс Ч., Инграм Б., Ключи Дж., Ликлема Я., Лейн Дж., Парфит Г., Рендалл Г., Рочестер К., Флир Г., Хесселинк Ф., Хоу Д. Адсорбция из растворов на поверхностях твердых тел / под ред. Г. Парфита, К. Рочестера. М.: Мир, 1986. 488 с.
2. Оболенская А.В., Ельницкая З.П., Леонович А.А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы. М.: Экология, 1991. 320 с.
3. Ademiluyi F.T., Braide O. Effectiveness of Nigerian Bamboo Activated with Different Activating Agents on the Adsorption of BTX // Journal of Applied Sciences and Environmental Management. 2012. Vol. 16, no. 3. Pp. 267–273.
4. Asada T., Ohkubo T., Kawata K., Oikawa K. Ammonia Adsorption on Bamboo Charcoal with Acid Treatment // Journal of Health Science. 2006. Vol. 52, no. 5. Pp. 585–589.
5. Chen D., Liu D., Zhang H., Chen Y., Li Q. Bamboo Pyrolysis Using TG-FTIR and a Lab-Scale Reactor: Analysis of Pyrolysis Behavior, Product Properties, and Carbon and Energy Yields // Fuel. 2015. Vol. 148. Pp. 79–86.
6. Chen D., Zhou J., Zhang Q. Effects of Heating Rate on Slow Pyrolysis Behavior, Kinetic Parameters and Products Properties of Moso Bamboo // Bioresource Technology. 2014. Vol. 169. Pp. 313–319.
7. González P.G., Pliego-Cuervo Y.B. Physicochemical and Microtextural Characterization of Activated Carbons Produced from Water Steam Activation of Three Bamboo Species // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2013. Vol. 99. Pp. 32–39.
8. Gu X., Wang Y., Lai Ch., Qiu J., Li Sh., Hou Y., Martens W., Mahmood N., Zhang Sh. Microporous Bamboo Biochar for Lithium-Sulfur Batteries // Nano Research. 2015. Vol. 8, no. 1. Pp. 129–139.
9. Hamzah F., Sarif M., Zulkifli F.N.Z., Ismail N.H., Manaf Sh.F.A., Idris A., Ibrahim W.A., Krishnan J. Microwave-Alkali Activation on the Morphology and Structure of Bamboo Activated Carbon // Applied Mechanics & Materials. 2014. Vol. 575. Pp. 154–159.
10. Hirunpraditkoon S., Tunthong N., Ruangchai A., Nuithitikul K. Adsorption Capacities of Activated Carbons Prepared from Bamboo by KOH Activation // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2011. Vol. 78. Pp. 711–715.
11. Kantarelis E., Liu J., Yang W., Blasiak W. Sustainable Valorization of Bamboo via High-Temperature Steam Pyrolysis for Energy Production and Added Value Materials // Energy & Fuels. 2010. Vol. 24, no. 11. Pp. 6142–6150.
12. Ma X., Yang H., Yu L., Chen Y., Li Y. Preparation, Surface and Pore Structure of High Surface Area Activated Carbon Fibers from Bamboo by Steam Activation // Materials. 2014. Vol. 7, no. 6. Pp. 4431–4441.
13. Sing K.S.W. Reporting Physisorption Data for Gas / Solid Systems with Special Reference to the Determination of the Surface Area and Porosity (Recommendations 1984) // Pure and Applied Chemistry. 1985. Vol. 57, no. 4. Pp. 603–619.
14. Tan Z., Qiu J., Zeng H., Liu H., Xiang J. Removal of Elemental Mercury by Bamboo Charcoal Impregnated with H_2O_2 // Fuel. 2011. Vol. 90, no. 4. Pp. 1471–1475.
15. Wang S.-Y., Tsai M.-H., Lo Sh.-F., Tsai M.-J. Effects of Manufacturing Conditions on the Adsorption Capacity of Heavy Metal Ions by Makino Bamboo Charcoal // Bioresource Technology. 2008. Vol. 99, iss. 15. Pp. 7027–7033.

16. Wu F.-Ch., Tseng R.-L., Juang R.-Sh. Preparation of Activated Carbons from Bamboo and Their Adsorption Abilities for Dyes and Phenol // *Journal of Environmental Science & Health. Part A*. 1999. Vol. 34, no. 9. Pp. 1753–1775.

17. Zhang Y.-J., Xing Z.-J., Duan Z.-K. Effects of Steam Activation on the Pore Structure and Surface Chemistry of Activated Carbon Derived from Bamboo Waste // *Applied Surface Science*. 2014. Vol. 315. Pp. 279–286.

18. Zhao W., Luo L., Wang H., Fan M. Synthesis of Bamboo-Based Activated Carbons with Super-High Specific Surface Area for Hydrogen Storage // *BioResources*. 2017. Vol. 12, iss. 1. Pp. 1246–1262.

Поступила 14.02.18

UDC 662.71+630*867.5

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.4.140

Steam Charcoal Activation from Bamboo

*Chu Cong Nghi*¹, Postgraduate Student

*A. A. Spitsyn*¹, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

*K. A. Romanenko*², Postgraduate Student

*D. A. Ponomarev*¹, Doctor of Chemical Sciences, Professor

¹Saint Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Y, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation;

e-mail: congngich19a@gmail.com, spitsyn.andrey@gmail.com, dponomarev1@mail.ru

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya

Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation;

e-mail: kristinaromanenko@yandex.ru

The paper studies the pyrolysis of bamboo stems (*Bambos bambusa*) to preserve the original structure in the resulting lump charcoal. Bamboo pieces are subjected to slow pyrolysis in a 4-liter stainless steel reactor equipped with an external electric heater according to the periodic scheme. Activation of lump charcoal is carried out by superheated steam at a temperature of 970 °C. The authors determine the adsorption activity for iodine, specific surface area, volume and pore size distribution for the obtained monolithic nanostructured carbon material. Analysis of sorption-desorption isotherms for the resulting material and pore size distribution diagrams indicate a microporous structure of the resulting material. The volume of micropores established by four different methods, is 0.26...0.29 cm³/g and is practically independent on the method of determination. Micropores make the main contribution to the porous structure of charcoal; their volume comprises the major part (85 %) of the total volume.

Keywords: bamboo, steam activation, active carbon, monolithic carbon, pyrolysis.

REFERENCES

1. Giles C., Ingram B., Clunie J., Lykema J., Lane J., Parfitt G., Rendall H., Rochester C.H., Fleeer G., Hesselink F., Hough D. *Adsorption From Solution at the Solid / Liquid Interface*. Ed. by G.D. Parfitt, C.H. Rochester. London, Academic Press, 1983. 416 p.

For citation: Chu Cong Nghi, Spitsyn A.A., Romanenko K.A., Ponomarev D.A. Steam Charcoal Activation from Bamboo. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2018, no. 4, pp. 140–149. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.4.140

2. Obolenskaya A.V., El'nitskaya Z.P., Leonovich A.A. *Laboratornye raboty po khimii drevesiny i tsellyulozy* [Laboratory Work on the Chemistry of Wood and Cellulose]. Moscow, Ekologiya Publ., 1991. 320 p. (In Russ.)
3. Ademiluyi F.T., Braide O. Effectiveness of Nigerian Bamboo Activated with Different Activating Agents on the Adsorption of BTX. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 2012, vol. 16, no. 3. pp. 267–273.
4. Asada T., Ohkubo T., Kawata K., Oikawa K. Ammonia Adsorption on Bamboo Charcoal with Acid Treatment. *Journal of Health Science*, 2006, vol. 52, no. 5, pp. 585–589.
5. Chen D., Liu D., Zhang H., Chen Y., Li Q. Bamboo Pyrolysis Using TG-FTIR and a Lab-Scale Reactor: Analysis of Pyrolysis Behavior, Product Properties, and Carbon and Energy Yields. *Fuel*, 2015, vol. 148, pp. 79–86.
6. Chen D., Zhou J., Zhang Q. Effects of Heating Rate on Slow Pyrolysis Behavior, Kinetic Parameters and Products Properties of Moso Bamboo. *Bioresource Technology*, 2014, vol. 169, pp. 313–319.
7. González P.G., Pliego-Cuervo Y.B. Physicochemical and Microtextural Characterization of Activated Carbons Produced from Water Steam Activation of Three Bamboo Species. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2013, vol. 99, pp. 32–39.
8. Gu X., Wang Y., Lai Ch., Qiu J., Li Sh., Hou Y., Martens W., Mahmood N., Zhang Sh. Microporous Bamboo Biochar for Lithium-Sulfur Batteries. *Nano Research*, 2015, vol. 8, no. 1, pp. 129–139.
9. Hamzah F., Sarif M., Zulkifli F.N.Z., Ismail N.H., Manaf Sh.F.A., Idris A., Ibrahim W.A., Krishnan J. Microwave-Alkali Activation on the Morphology and Structure of Bamboo Activated Carbon. *Applied Mechanics & Materials*, 2014, vol. 575, pp. 154–159.
10. Hirunpraditkoon S., Tunthong N., Ruangchai A., Nuthitikul K. Adsorption Capacities of Activated Carbons Prepared from Bamboo by KOH Activation. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2011, vol. 78, pp. 711–715.
11. Kantarelis E., Liu J., Yang W., Blasiak W. Sustainable Valorization of Bamboo via High-Temperature Steam Pyrolysis for Energy Production and Added Value Materials. *Energy & Fuels*, 2010, vol. 24, no. 11, pp. 6142–6150.
12. Ma X., Yang H., Yu L., Chen Y., Li Y. Preparation, Surface and Pore Structure of High Surface Area Activated Carbon Fibers from Bamboo by Steam Activation. *Materials*, 2014, vol. 7, no. 6, pp. 4431–4441.
13. Sing K.S.W. Reporting Physisorption Data for Gas / Solid Systems with Special Reference to the Determination of the Surface Area and Porosity (Recommendations 1984). *Pure and Applied Chemistry*, 1985, vol. 57, no. 4, pp. 603–619.
14. Tan Z., Qiu J., Zeng H., Liu H., Xiang J. Removal of Elemental Mercury by Bamboo Charcoal Impregnated with H₂O₂. *Fuel*, 2011, vol. 90, no. 4, pp. 1471–1475.
15. Wang S.-Y., Tsai M.-H., Lo Sh.-F., Tsai M.-J. Effects of Manufacturing Conditions on the Adsorption Capacity of Heavy Metal Ions by Makino Bamboo Charcoal. *Bioresource Technology*, 2008, vol. 99, no. 15, pp. 7027–7033.
16. Wu F.-Ch., Tseng R.-L., Juang R.-Sh. Preparation of Activated Carbons from Bamboo and Their Adsorption Abilities for Dyes and Phenol. *Journal of Environmental Science & Health, Part A*, 1999, vol. 34, no. 9, pp. 1753–1775.
17. Zhang Y.-J., Xing Z.-J., Duan Z.-K. Effects of Steam Activation on the Pore Structure and Surface Chemistry of Activated Carbon Derived from Bamboo Waste. *Applied Surface Science*, 2014, vol. 315, pp. 279–286.
18. Zhao W., Luo L., Wang H., Fan M. Synthesis of Bamboo-Based Activated Carbons with Super-High Specific Surface Area for Hydrogen Storage. *BioResources*, 2017, vol. 12, no. 1, pp. 1246–1262.

Received on February 14, 2018