

specified in article 23 of the Forest code of the Russian Federation» [Registered 29.12.2016 No. 45041]. – URL: [http:// docs.cntd.ru/document/420377910](http://docs.cntd.ru/document/420377910) (accessed: 09.02.2020).

8. The order of Ministry of Russia from 15.01.2019 N 10 «On approval of the order of conducting state forest register and modification of the List, forms and procedure of preparation of documents on the basis of which the entering documented information into the state forest register and its change, approved by the Ministry of Russia dated 11 November 2013 N 496» [Registered at the Ministry of justice 04.04.2019 N 54270]. – URL: [http:// rosleshoz.gov.ru/doc/%D0%BF%D0%BC%D0%BF_%E2%84%9610_2019.01.15](http://rosleshoz.gov.ru/doc/%D0%BF%D0%BC%D0%BF_%E2%84%9610_2019.01.15) (date accessed: 18.01.2020).

УДК 661.183.2

DOI: 10.51318/FRET.2020.20.46.005

ПИРОЛИЗ СПЕЛОЙ И ТОНКОМЕРНОЙ ОСИНОВОЙ ДРЕВЕСИНЫ

Е. В. ЕВДОКИМОВА – инженер кафедры технологий
целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров;
ORCID ID: 0000-0002-8817-7593;
e-mail: yevdokimovaekaterina@gmail.com*

И. К. ГИНДУЛИН – кандидат технических наук, доцент кафедры
химической технологии древесины, биотехнологии и наноматериалов;
ORCID ID: 0000-0003-3249-3228;
e-mail: tradeek@mail.ru*

Ю. Л. ЮРЬЕВ – доктор технических наук,
заведующий кафедрой химической технологии древесины,
биотехнологии и наноматериалов;
ORCID ID: 0000-0002-1187-7401;
e-mail: charekat@mail.ru*

* ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»,
620100, Россия, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37

Рецензент: Сафин Р. Р., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Казанский научно-исследовательский технологический университет.

Ключевые слова: пиролиз древесины, выход древесного угля, осина, осиновый уголь.

Изучен процесс пиролиза спелой и тонкомерной осиновой древесины в диапазоне конечной температуры пиролиза 400–700 °С. Определены зависимости выхода древесного угля (ДУ) от температуры продолжительности пиролиза. Получены уравнения регрессии для основных показателей качества ДУ из осины, таких как содержание нелетучего углерода, суммарный объем пор, кажущаяся плотность и активность по йоду. Показано, что ДУ, полученный из спелой осиновой древесины при температуре не менее 600 °С, имеет сформированную углеродную матрицу и вполне пригоден для получения активных углей.

PYROLYSIS OF RIPE AND THIN ASPEN WOOD

E. V. EVDOKIMOVA – Engineer of the Department of Technologies of Pulp and Paper Production and Polymer Processing;

I. K. GINDULIN – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemical Technology of Wood, Biotechnology and Nanomaterials;

Y. L. YURYEV – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Chemical Technology of Wood, Biotechnology and Nanomaterials;

* FSBE HE «The Ural state forest Engineering University», 620100, Russia, Yekaterinburg, Siberian tract, 37

Reviewer: Safin R. R., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department, Kazan scientific research technological university.

Keywords: wood pyrolysis, charcoal yield, aspen, aspen coal.

The process of ripe and thin aspen wood pyrolysis in the range of the final pyrolysis temperature of 400–700 °C is studied. The dependences of the charcoal yield on the temperature and duration of pyrolysis are determined. Regression equations for the main indicators of the aspen charcoal quality, such as content of non-volatile carbon, total pore volume, apparent density, and iodine activity are obtained. It is shown that the charcoal obtained from ripe aspen wood at a temperature of at least 600 °C has a formed carbon matrix and is quite suitable for the production of active carbons.

Введение

Наблюдаемый в России ежегодный прирост площадей, занимаемых осиною, обеспечивается в основном за счет территорий в хорошо освоенных регионах с развитой транспортной инфраструктурой, где заготовка древесины наиболее рентабельна [1]. Вместе с тем применение древесины осины за последние десятилетия резко возросло во всем мире за счет использования как традиционных, так и новых технологий [2].

Структура и свойства березовой и осиновой древесины существенно различаются [3], но это не может быть непреодолимым препятствием для развития производства как собственно осинового угля [4], так и перспективных продуктов его переработки,

таких как древесноугольные брикеты и активный уголь разных марок [5, 6]. Соответствующие технологии разработаны, в том числе с нашим участием [7, 8].

Изучение пиролиза осиновой древесины и дальнейшая переработка получаемого угля для России имеет высокую актуальность в связи с огромными, но слабо используемыми запасами осиновой древесины.

Цель, задачи, методика и объекты исследования

В нашей работе приводятся результаты экспериментальных исследований по пиролизу тонкомерной и спелой древесины, изучается влияние качества сырья и технологических факторов на выход и технические характеристики получаемого осинового угля.

Так как основной объем промышленного ДУ производится в интервале конечной температуры пиролиза 500–600 °C, особое внимание было уделено именно этому диапазону, но включены и соседние диапазоны температур – 400–500 °C и 600–700 °C. Для исследования брались образцы спелой и тонкомерной осиновой древесины.

В качестве функций отклика были приняты следующие:

- Y_1 – выход угля, %;
- Y_2 – содержание нелетучего углерода, %;
- Y_3 – суммарный объем пор, см³/г;
- Y_4 – кажущаяся плотность, г/см³;
- Y_5 – активность по йоду, %.

В каждом опыте определялась и зольность полученного угля.

Результаты исследований и их обсуждение

Таблица 1
Table 1

Обработка данных позволила получить адекватные модели процесса пиролиза. В табл. 1 приведены технические характеристики древесных углей, полученных из тонкомерной осиновой древесины.

После обработки данных были найдены коэффициенты уравнений регрессии, которые проверялись на значимость с помощью критерия Стьюдента. Затем были получены и проверены на адекватность регрессионные уравнения.

В табл. 2 приведены технические характеристики ДУ, полученных из спелой осиновой древесины. После обработки полученных данных были найдены и проверены на значимость коэффициенты уравнений регрессии. Далее были получены и проверены на адекватность регрессионные уравнения и построены зависимости выхода осинового ДУ и адсорбционной активности по йоду (рис. 1 и 2).

Тонкомерная древесина является сравнительно рыхлой, что делает ее матрицу менее устойчивой к действию температуры. Выяснено, что открытая микропористость ДУ из тонкомера развита лучше, чем в ДУ из спелой осиновой древесины.

У обоих образцов в интервале температур 600–700 °С отмечается стабилизация показателя «адсорбционная активность по йоду», и дальнейшее увеличение его возможно только за счет проведения активации.

Характеристики ДУ из осинового тонкомера
Characteristics of the charcoal from the thin aspen

| Факторы пиролиза Factors of pyrolysis | | Показатели Indicators | | | | |
|--|--|--------------------------|--|--|---|---|
| Температура, °С Temperature, °C | Продолжительность, мин Duration, min | Выход, % Yield, % | Содержание НУ, % Content of non-volatile carbon, % | Суммарный объем пор, см ³ /г Total pore volume, cm ³ /g | Кажущаяся плотность, г/см ³ Apparent density, g/cm ³ | Активность по йоду, % Iodine activity, % |
| X1 | X2 | Y1 | Y2 | Y3 | Y4 | Y5 |
| 400 | 20 | 26,1 | 74 | 2,8 | 0,29 | 4 |
| 400 | 40 | 24 | 77 | 2,5 | 0,28 | 4 |
| 500 | 20 | 21,9 | 82 | 3,5 | 0,24 | 10 |
| 500 | 40 | 20,7 | 84 | 3,1 | 0,23 | 11 |
| 600 | 20 | 19,1 | 85 | 3,4 | 0,23 | 18 |
| 600 | 40 | 18,6 | 87 | 2,9 | 0,22 | 18 |
| 700 | 20 | 17,8 | 87 | 2,8 | 0,25 | 18 |
| 700 | 40 | 17 | 88 | 2,1 | 0,25 | 18 |

Таблица 2
Table 2

Характеристики ДУ из спелой древесины осины
Characteristics of the charcoal from the ripe aspen wood

| Факторы пиролиза Factors of pyrolysis | | Показатели Indicators | | | | |
|--|--|------------------------------------|--|------------------------------------|--|------------------------------------|
| Температура, °С Temperature, °C | Продолжительность, мин Duration, min | Температура, °С Temperature, °C | Продолжительность, мин Duration, min | Температура, °С Temperature, °C | Продолжительность, мин Duration, min | Температура, °С Temperature, °C |
| X ₁ | X ₂ | Y ₁ | Y ₂ | Y ₃ | Y ₄ | Y ₅ |
| 400 | 20 | 30,4 | 76 | 1,4 | 0,22 | 3 |
| 400 | 40 | 25,9 | 79 | 1,4 | 0,22 | 5 |
| 500 | 20 | 24 | 82 | 1,8 | 0,18 | 8 |
| 500 | 40 | 21,2 | 85 | 1,6 | 0,2 | 8 |
| 600 | 20 | 20,1 | 87 | 1,7 | 0,19 | 13 |
| 600 | 40 | 18,9 | 89 | 1,5 | 0,21 | 13 |
| 700 | 20 | 17,8 | 90 | 1,2 | 0,23 | 14 |
| 700 | 40 | 17,3 | 92 | 1,1 | 0,25 | 14 |

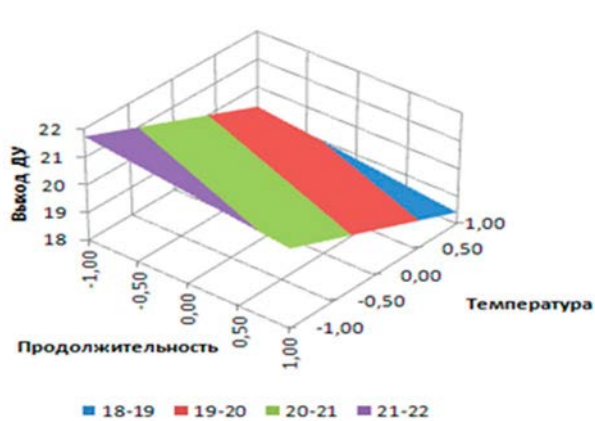


Рис. 1. Зависимость выхода ДУ от продолжительности и температуры пиролиза (500–600 °С)
Fig. 1 Dependence of the charcoal yield on the duration and temperature of pyrolysis (500–600 °C)

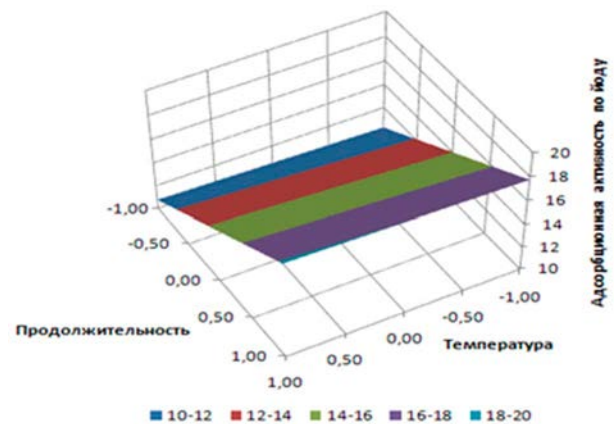


Рис. 2. Зависимость адсорбционной активности по йоду от продолжительности и температуры пиролиза (500–600 °С)
Fig. 2. Dependence of the adsorption activity of iodine on the duration and temperature of pyrolysis (500–600 °C)

Сходная картина влияния температуры и продолжительности процесса на свойства ДУ также выявлена для обоих образцов. Выход ДУ падает с увеличением температуры (рис. 3), содержание нелетучего углерода и зольность увеличиваются. Такие показатели, как суммарный объем пор и кажущаяся плотность, имеют экстремальные значения в диапазоне конечных температур 500–550 °С. С повышением температуры суммарный объем

увеличивается вплоть до температуры 500 °С. При дальнейшем повышении температуры наблюдается некоторое уменьшение объема пор.

Полученные уравнения регрессии использовались для определения оптимальных параметров режима пиролиза. Задачи оптимизации формулировались с учетом требований, предъявляемых к древесным углям марки Б. Выявлено, что ДУ из тонкомера не соответствует тре-

бованиям стандарта по показателям «кажущаяся плотность» и «зольность». Для ДУ из спелой древесины в исследуемом диапазоне находились значения переменных, обеспечивающие максимизацию выхода ДУ (Y_1), при ограничениях, накладываемых техническими требованиями на содержание нелетучего углерода (Y_2) > 90 % и на кажущуюся плотность (Y_4) > 0,37 г/см³. Если целью является получение ДУ как сырья для активации, то содержание нелетучего углерода и кажущаяся плотность имеют второстепенное значение по сравнению с потенциалом развития пористой структуры. Из полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что организация процесса пиролиза спелой осинового древесины при конечной температуре пиролиза 600 °С и продолжительности 40 мин обеспечивает вполне приемлемый выход ДУ при максимально высоком суммарном объеме пор и хорошо развитой микропористости.

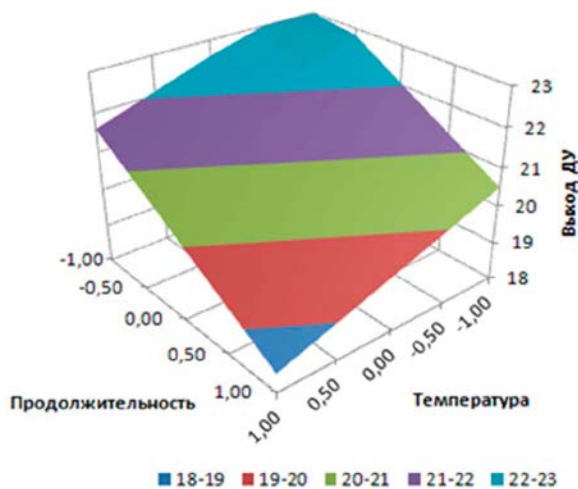


Рис. 3. Зависимость выхода ДУ от продолжительности и температуры пиролиза (500–600 °С)
Fig. 3. Dependence of the charcoal yield on the duration and temperature of pyrolysis (500–600 °C)

Выводы

По результатам исследования процесса пиролиза можно сделать вывод, что ДУ, полученный из спелой осиновой древесины при температуре не менее 600 °С, имеет сформированную углеродную матрицу и может использоваться в качестве сырья для активации.

При пиролизе осины может образоваться большое количество фракции угля размером менее 12 мм. В этой связи целесообразно организовывать производство древесноугольных брикетов, которые выгодно отличаются от стандартного ДУ существенно более высокими прочностью, плотностью и логистикой.

Сравнивая выход и свойства ДУ, полученного из тонкомерной

и спелой осиновой древесины, можно увидеть некоторые различия. Выход угля из спелой древесины выше, чем из тонкомера, однако при конечной температуре пиролиза выше 600 °С это различие сглаживается. Содержание нелетучего углерода в осиновом угле из спелой древесины примерно на 2–3 % выше, чем в угле из тонкомера. Суммарный объем пор осинового угля на основе тонкомерной древесины примерно на 1 см³/г выше, чем угля на основе спелой осиновой древесины.

Кажущаяся плотность угля из спелой осиновой древесины выше, чем угля из тонкомера, но после конечной температуры пиролиза 600 °С это различие

сглаживается. Суммарный объем пор и кажущаяся плотность осинового угля имеют экстремальные значения в интервале конечной температуры пиролиза 500–550 °С (объем пор – максимум, кажущаяся плотность – минимум). Этот факт можно объяснить трансформацией структуры угля, а именно переходом углеродной матрицы в более упорядоченное состояние.

Активность осинового угля по йоду при невысокой конечной температуре пиролиза примерно на 4 % выше при использовании тонкомера, чем спелой древесины. После достижения конечной температуры пиролиза 600 °С этот показатель практически не растёт.

Библиографический список

1. Елисеев С. Г. Технические и эксплуатационные свойства древесины морфологических форм осины : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Елисеев С. Г. – Красноярск, 2010.
2. Царев А. П. Многообразие использования древесины тополей // Лесн. жур. – 2018. – № 5. – С. 48–64.
3. Боровиков А. М., Уголев Б. Н. Справочник по древесине : справочник / под ред. Б. Н. Уголева. – М. : Лесн. пром-сть, 1989. – 296 с.
4. Пат. 76644 Российская Федерация, МПК8 С 10 В 1/02. Реторта / Самойленко С. А., Юрьев Ю. Л., Мехренцев А. В., Жевлаков А. Н. ; заявитель и патентообладатель Самойленко С. А. – № 2008114950/22 ; заявл. 16.04.08 ; опубл. 27.09.08, Бюл. № 27. – 3 с.
5. Юрьев Ю. Л., Гиндулин И. К., Дроздова Н. А. Варианты переработки низкосортной древесины на углеродные материалы // Изв. вузов. Лесн. жур. – 2017. – № 5. – С. 139–149.
6. Юрьев Ю. Л., Панова Т. М. Основные направления производства и переработки древесного угля // Химия и химическая технология переработки растительного сырья: матер. докл. Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения В. М. Резникова / Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2018. – С. 20–22.
7. Пат. 118960 Российская Федерация, МПК9 С 10 В 53/00. Установка для производства древесного угля и шихты / Пономарев О. С., Юрьев Ю. Л. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет». – № 2012106263/04 ; заявл. 21.02.12; опубл. 10.08.12, Бюл. № 22. – 2 с.
8. Пат. 2051097 Российская Федерация, МПК6 С 01 В 31/10, С 23 С 8/00. Способ активации карбонизованных материалов / Панюта С. А., Юрьев Ю. Л., Стахровская Т. Е., Шишко И. И. ; заявитель и патентообладатель Уральский научно-исследовательский институт Научно-производственного объединения «Кристалл». – № 92008212/02 ; заявл. 25.11.92; опубл. 27.12.95, Бюл. № 12. – 3 с.

Bibliography

1. Eliseev S. G. Technical and operational properties of wood of aspen morphological forms : Abstract. diss. on competition of a scientific degree of candidate of technical sciences / Eliseev S. G. – Krasnoyarsk, 2010.
2. Tsarev A. P. The diversity of the poplar wood use // Forest magazine. – 2018. – № 5. – P. 48–64.
3. Borovikov A. M., Ugolev B. N. Reference book on wood : Reference book / Edited by B.N. Ugolev. – M. : Forest industry, 1989. – P. 296.
4. Patent № 76644, Russian Federation, IPC8 C 10 B 1/02. Retort / Samoilenko S. A., Yuryev Y. L., Mehren-tsev A. V., Zhevlakov A. N. ; applicant and patentee Samoilenko S. A. – № 2008114950/22 ; Appl. 16.04.08 ; publ. 27.09.08, bull. № 27. – 3 p.
5. Yuryev Y. L., Gindulin I. K., Drozdova N. A. Options for processing low-grade wood to carbon materials // News of Higher Educational Institutions. Forest magazine. – 2017. – № 5. – P. 139–149.
6. Yuryev Y. L., Panova T. M. Main directions of production and processing of charcoal // Chemistry and chemi-cal technology of vegetable raw materials processing: report materials. International scientific and technical conf., dedicated to the 100th anniversary of the birth of V. M. Reznikov / Belarusian state technological university. – Minsk, 2018. – P. 20–22.
7. Patent № 118960 Russian Federation, IPC9 C 10 B 53/00. Installation for the production of charcoal and charge / Ponomarev O. S., Yuryev Y. L. ; applicant and patentee the Ural state forestry university. – № 2012106263/04 ; applic. 21.02.12 ; publ. 10.08.12, bul. № 22. – 2 p.
8. Patent № 2051097 Russian Federation, IPC6 C 01 B 31/10, C 23 C 8/00. Method of carbonized materials activation / Panyuta S. A., Yuryev Y. L., Stakhrovskaya T. E., Shishko I. I. ; applicant and patentee Ural research scientific institute the Scientific and production association «Crystal». – No. 92008212/02 ; applic. 25.11.92 ; publ. 27.12.95, bul. № 12. – 3 p.

УДК 630*867.5

DOI: 10.51318/FRET.2020.71.78.006

АКТИВАЦИЯ ОСИНОВОГО УГЛЯ

Е. В. ЕВДОКИМОВА – инженер кафедры технологий
целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров;
ORCID ID: 0000-0002-8817-7593;
e-mail: yevdokimovaekaterina@gmail.com*

Г. И. МАЛЬЦЕВ – доктор технических наук,
профессор кафедры химической технологии древесины,
биотехнологии и наноматериалов;
ORCID ID: 0000-0002-0750-0070;
e-mail: mgi@elem.ru*

* ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»,
620100, Россия, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37

Рецензент: Сафин Р. Р., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Казанский научно-исследовательский технологический университет.

Ключевые слова: осина, осиновый уголь, режим активации, факторы активации.
