

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН
POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

УДК 662.711.4

Поступила в редакцию 25.08.2016
Received 25.08.2016

С. В. Василевич, М. В. Малько, В. Н. Богач, Д. В. Дегтеров, А. Н. Асадчий

Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ДРЕВЕСНОГО УГЛЯ
ПУТЕМ ПИРОЛИЗА ПОД ДАВЛЕНИЕМ**

Аннотация. Описаны предварительные результаты экспериментального исследования влияния давления на образование древесного угля в процессе пиролиза березовой щепы. Экспериментальное исследование выполнено при давлениях 0,1, 0,3, 0,5, 0,7 МПа и скорости нагрева порядка 1 °С/мин. Исходная влажность щепы составляла 14,2 % вес., а размеры – 17×8×6 мм. Для исследования влияния давления на процесс пиролиза был разработан и сконструирован лабораторный стенд. Установлено, что повышение давления от 0,1 до 0,7 МПа увеличивает выход древесного угля от 25,1 до 32,4 % вес. (по отношению к сухой массе исходного вещества) и содержание углерода от 89,1 % вес. при 0,1 МПа до 96,4 % вес. при 0,7 МПа. Теплотворная способность древесного угля при этом снижается от 34,86 МДж/кг при давлении 0,1 МПа до 30,23 МДж/кг при давлении 0,7 МПа. Это обусловлено выходом из пористой структуры угля кислородосодержащих компонентов, обладающих более высокой теплотворной способностью по сравнению с чистым углеродом. Снижение теплоты сгорания древесного угля при уменьшении количества кислородсодержащих компонентов подтверждает то, что их теплотворная способность превышает теплотворную способность чистого углерода.

Ключевые слова: пиролиз, березовая щепа, давление, древесный уголь

Для цитирования. Исследование процесса получения древесного угля путем пиролиза под давлением / С. В. Василевич [и др.] // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2017. – № 3. – С. 64–71.

S. V. Vasilevich, M. V. Malko, U. N. Bahach, D. V. Degterov, A. N. Asadchyi

Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

STUDY OF THE PROCESS OF CHARCOAL PRODUCING BY PYROLYSIS UNDER PRESSURE

Abstract. The preliminary results of an experimental study of the effect of pressure on the formation of charcoal in the pyrolysis of birch chips are described. The experimental investigation was carried out at pressures of 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 MPa and at heating rate of the order of 1 °C/min. The initial moisture content of the chips was 14.2 % by weight, and the dimensions – 17×8×6 mm. To investigate the effect of pressure on the pyrolysis process, a laboratory bench was designed and constructed. It was found that increasing the pressure from 0.1 to 0.7 MPa increases the yield of charcoal from 25.1 to 32.4 % by weight (relative to the dry weight of the starting material) and the carbon content from 89.1 % by weight at 0.1 MPa to 96.4 % by weight at 0.7 MPa. The calorific value of charcoal decreases from 34.86 MJ/kg at a pressure of 0.1 MPa to 30.23 MJ/kg at a pressure of 0.7 MPa. This is due to release of oxygen-containing components from the porous coal structure, which have higher calorific value than pure carbon. Reduction of charcoal heat combustion with decrease in the amount of oxygen-containing components confirms conclusion that their calorific value exceeds the calorific value of pure carbon.

Keywords: pyrolysis, birch chips, pressure, laboratory reactor, charcoal

For citation. Vasilevich S. V., Malko M. V., Bahach U. N., Degterov D. V., Asadchyi A. N. Study of the process of charcoal producing by pyrolysis under pressure. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2017, no. 3, pp. 64–71 (in Russian).

Введение. Древесный уголь – твердый пористый продукт пиролиза (термохимическая конверсия древесины при отсутствии окисляющего агента), образующийся наряду с жидкими продуктами (смолами) и горючими газами [1].

Этот продукт имеет разнообразное применение [1–3]. Он используется в качестве топлива в домашнем хозяйстве и производстве железа и стали, при получении ряда других металлов, а также технического кремния и материалов для электродов, для производства углеродных сорбентов, применяемых для адсорбционной очистки и разделения сложных и жидких смесей, а также для решения иных задач.

Выход и качество древесного угля и других продуктов пиролиза биомассы зависит от многих факторов, и прежде всего от природы исходного материала, его влажности, размеров пиролизуемых образцов, а также от условий проведения процесса термохимической конверсии (скорость нагрева, температура, давление, наличие добавок различных химических веществ и т. д.).

В настоящей работе дано описание предварительных результатов изучения в ходе эксперимента влияния давления на образование древесного угля в процессе пиролиза березовой щепы. Исследование было проведено на лабораторном стенде Института энергетики Национальной академии наук Беларуси.

Методика экспериментального исследования. Для определения влияния давления на процесс пиролиза был разработан и сконструирован лабораторный стенд, основным элементом которого является лабораторный реактор. Схема реактора и общий вид стенда показаны на рис. 1.

Конструкция реактора позволяет проводить пиролиз биомассы как при атмосферном, так и при избыточном давлении. Для этого штуцер 5 заглушали, а к штуцеру 6 вместо термопары крепили регулируемый предохранительный клапан, срабатывающий при давлении 0,3–0,7 МПа.

Экспериментальное исследование влияния давления на процесс образования древесного угля в настоящей работе выполнено при давлениях 0,1, 0,3, 0,5, 0,7 МПа. Каждый эксперимент проводился по следующей методике. Примерно 4 кг исходного материала загружались в реактор, после чего включался электрический нагреватель, работающий на постоянной мощности, которая контролировалась на основе непрерывных замеров силы и напряжения подводимого электрического тока.

В качестве исходного сырья была использована березовая древесина в виде щепы размером частиц 17×8×6 мм. Влажность исходной древесины составляла 14,2 % вес., плотность – 506,4 кг/м³, зольность – 0,23 % вес.

Влажность древесины определялась с помощью влагомера ФАУНА-М (изготовитель ООО «Лента», РФ).

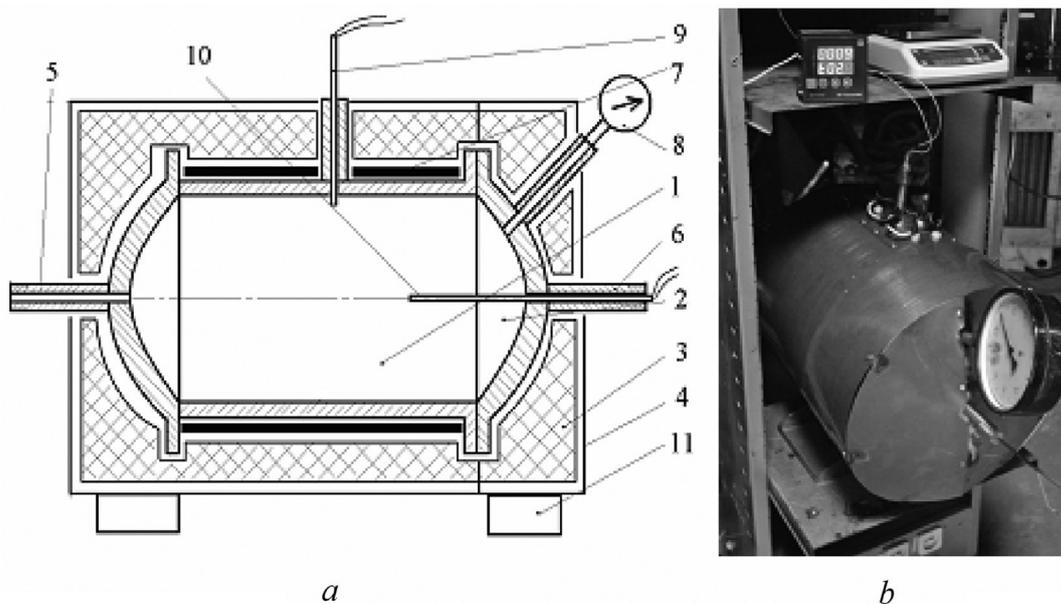


Рис. 1. Схема (а) и общий вид (б) лабораторного реактора: 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – тепловая изоляция; 4 – кожух; 5, 6 – штуцеры; 7 – электрический нагреватель; 8 – манометр; 9, 10 – термопары; 11 – опорные стойки

Fig. 1. Scheme (a) and general view (b) of the laboratory reactor: 1 – housing; 2 – cover; 3 – thermal insulation; 4 – casing; 5, 6 – unions; 7 – electric heater; 8 – manometer; 9, 10 – thermocouples; 11 – support racks

Температура в реакционной зоне измерялась с помощью термопары, помещаемой внутри слоя щепы.

Опыты при каждом давлении длились до установления постоянной температуры в зоне пиролиза, что достигалось в течение 600 мин (10 ч). Эта температура оказалась зависящей от давления, при котором происходил пиролиз березовой щепы. Так, в условиях опытов, проводимых при давлении 0,1 МПа, температура на плато составляла примерно 400 °С. С ростом давления она повышалась и при давлении 0,7 МПа достигала около 550 °С.

По окончании процесса пиролиза электронагреватель отключали и полученный древесный уголь охлаждался.

Как известно, в процессе пиролиза биомассы происходит выделение парообразных и газообразных продуктов, что приводит к повышению давления в замкнутом объеме. Для обеспечения постоянного давления в реакторе в ходе опытов при давлении 0,1 МПа осуществлялся непрерывный отвод таких продуктов из реакционной зоны. В экспериментах, выполненных при других давлениях, газообразные компоненты выводились через штуцер *б*, к которому крепился клапан, предварительно отрегулированный на определенное давление (0,3 МПа, 0,5 и 0,7 МПа).

В соответствии с выполненными измерениями количество энергии, затраченной на пиролиз при различных давлениях, оказалось одинаковым и составило 34,89 МДж.

Результаты исследования. Внешний вид древесного угля, полученного в обсуждаемых экспериментах, представлен на рис. 2.

Как следует из рис. 2, образовавшийся древесный уголь имеет блестящую черную окраску и в основном сохраняет исходную форму. Вместе с тем наблюдается незначительное количество деформированных образцов. Причиной этой деформации является растрескивание вследствие выхода паров воды и газообразных продуктов пиролиза.

На рис. 3, *a* и *b* показаны температурные зависимости пиролиза березовой щепы при давлениях 0,1 и 0,7 МПа соответственно.

Как следует из сравнения данных, представленных на рис. 3, давление оказывает существенное влияние на ход процесса пиролиза. Так, в случае пиролиза березовой щепы при нормальном давлении на протяжении примерно 500 мин происходило непрерывное повышение температуры с практически постоянной скоростью и с выходом на плато в районе 400 °С.

Характер роста температуры существенно изменялся при более высоких давлениях. Как можно видеть на рис. 3, *b*, в случае пиролиза при давлении 0,7 МПа просматриваются три различные зоны на кривой зависимости температуры от времени пребывания пиролизуемого материала в реакционной зоне. Они расположены в областях температуры от комнатной до примерно 200 °С, от 200 до 500 °С и от 500 до 600 °С.

Другой особенностью пиролиза щепы при давлении 0,7 МПа является то, что выход на плато завершается при температуре порядка 600 °С, что на 200 градусов превышает температуру соответствующего участка при давлении 0,1 МПа.



Рис. 2. Древесный уголь, полученный в опытах по пиролизу березовой щепы

Fig. 2. Charcoal obtained in experiments on the pyrolysis of birch chips

Отмеченный сдвиг температурной зависимости наблюдается и при других изученных давлениях. При этом рост температуры платообразного участка практически пропорционален давлению, при котором осуществлялся пиролиз. В ходе экспериментов было определено, что при атмосферном давлении эта температура равна 409 °С, при давлении 0,3 МПа – 556 °С, при давлении 0,5 МПа – 570 °С, при давлении 0,7 МПа – 604 °С.

Одна из причин, объясняющих данный рост температур, следующая. Как отмечалось выше, заданный уровень давления пиролиза в обсуждаемой работе осуществлялся путем вывода парообразных и газообразных компо-

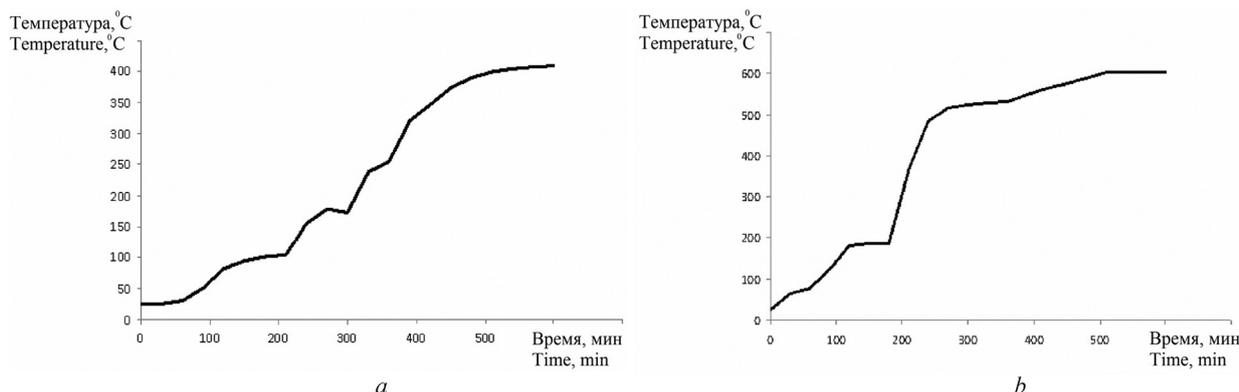


Рис. 3. Изменение температуры в слое щепы, пиролизуемой при давлении 0,1 МПа (а) и 0,7 МПа (b)
 Fig. 3. Temperature change in the chip layer pyrolyzed at a pressure of 0.1 MPa (a) and of 0.7 MPa (b)

нентов из реактора. Максимальный вывод таких компонентов имел место при давлении 0,1 МПа, а минимальный – при давлении 0,7 МПа.

Вывод парообразных и газообразных продуктов из реактора обуславливал потерю тепловой энергии, а следовательно, и снижение температуры пиролизуемого материала. Это снижение было максимальным при давлении 0,1 МПа и минимальным при давлении 0,7 МПа. Соответственно минимальная температура платообразного участка устанавливалась при давлении 0,1 МПа, а максимальная – при 0,7 МПа.

Таким образом, методика проведения экспериментов, принятая в настоящей работе, при переходе в область более высоких давлений обусловила смещение пиролиза березовой щепы в область более высоких температур.

Такое смещение оказало существенное влияние на выход древесного угля и его свойства.

Было определено, что повышение давления, при котором осуществлялся пиролиз березовой щепы, от 0,1 до 0,7 МПа приводит к увеличению выхода древесного угля X_c в расчете на сухой вес от примерно 25 % вес. при давлении 0,1 МПа до примерно 32 % вес. при давлении 0,7 МПа.

Значение величины X_c определялось по формуле

$$X_c = \frac{M_c \cdot 100}{M_0 \cdot \left(1 - \frac{W}{100}\right)},$$

где M_c – масса угля, г; M_0 – масса исходного сырья, г; W – влажность исходного сырья, %.

На рис. 4 представлены значения массового выхода древесного угля, установленные в настоящей работе.

Сплошная линия на рис. 4 рассчитана по аппроксимационному выражению

$$X_c = \frac{33,82}{1 + 0,5162 \cdot \exp(-3,826 \cdot P)}$$

Точность аппроксимации определяется следующими величинами: $R^2 = 0,985$; $p = 0,099$.

Результаты настоящей работы качественно согласуются с результатами автора [4], который исследовал образование древесного угля в области давлений от 0,06 до 0,5 МПа. Согласно данным [4], повышение давления

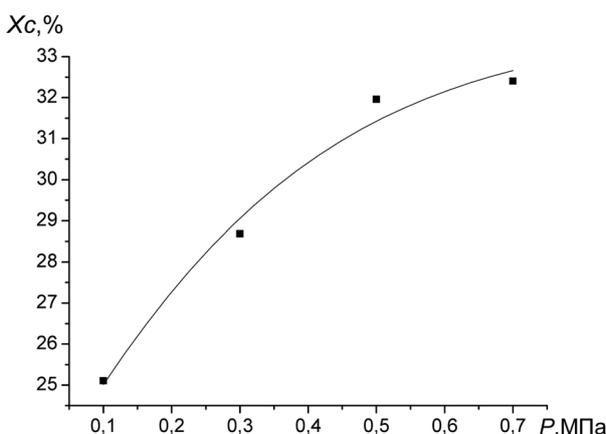


Рис. 4. Зависимость массового выхода древесного угля от давления в реакторе

Fig. 4. The dependence of the mass yield of charcoal on the pressure in the reactor

в зоне пиролиза от 0,06 до 0,5 МПа приводит к увеличению массы древесного угля примерно на 70 %.

Это согласие является дополнительным аргументом в пользу вывода о достаточной надежности результатов, установленных в ходе описанного в настоящей работе экспериментального исследования.

Также были определены значения теплотворной способности древесного угля, полученного при различных давлениях. Теплотворная способность определялась с помощью калориметра В-08МА «К».

Измерения показали, что с увеличением давления в реакторе теплотворная способность получаемого древесного угля уменьшается. При атмосферном давлении теплотворная способность равна 34,86 МДж/кг, при давлении 0,3 МПа – 33,69 МДж/кг, при давлении 0,5 МПа – 31,04 МДж/кг, при давлении 0,7 МПа – 30,23 МДж/кг. Этот эффект объясняется различием количества смолы, адсорбированной древесным углем. На это указывают данные наших исследований элементного анализа древесного угля, образовавшегося при различных давлениях.

На рис. 5 представлена микрофотография использованной древесины и график элементного состава.

В таблице приведены данные элементного состава для древесных углей, полученных при различных давлениях. Элементный состав определялся методом рентгеноспектрального микро-

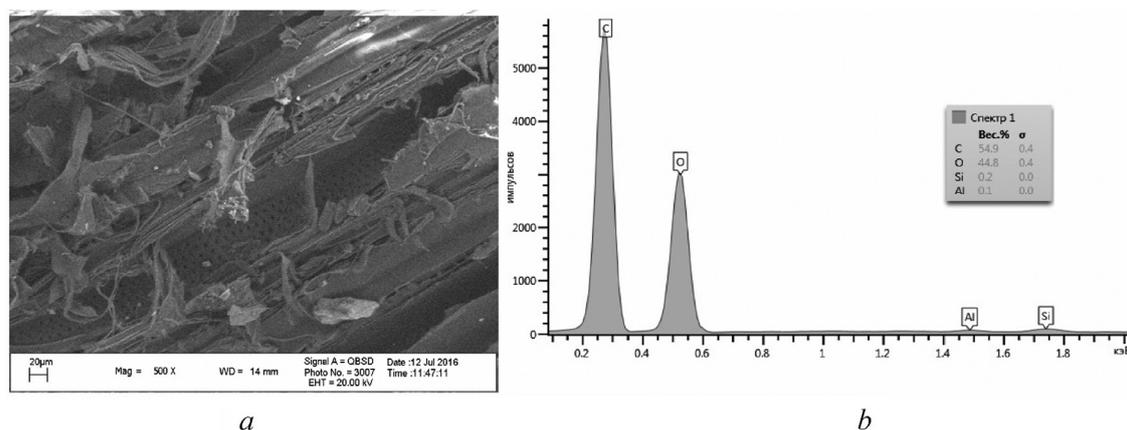


Рис. 5. Микрофотография использованной древесины (а) и график элементного состава (b)

Fig. 5. A photomicrograph of the wood used (a) and a graph of the elemental composition (b)

Данные элементного состава для древесных углей, полученных при различных давлениях, %
Elemental composition of raw materials and charcoal obtained at different pressures, %

Элемент	Сырая древесина	Уголь			
		при 1 атм	при 3 атм	при 5 атм	при 7 атм
C	54,9	89,1	94,02	95,3	96,4
O	44,8	8,4	5,66	4,0	2,9
Si	0,2	0,2	0,01	0,1	–
Al	0,1	–	0,03	–	–
Ca	–	1,3	0,1	0,4	0,3
K	–	0,3	0,03	0,1	0,2
Mg	–	0,2	0,03	–	0,1
Mn	–	0,2	0,05	–	–
P	–	0,1	0,02	–	–
S	–	–	–	–	–
Fe	–	–	0,04	–	–

анализа с помощью энергодисперсионного анализатора Oxford Instruments X-MaxN, работающего совместно с растровым электронным микроскопом LEO1455VP с чувствительностью 0,1 атм.%.

Как следует из таблицы, масса минерального зольного остатка варьирует при изменении давления, при котором осуществлялся процесс пиролиза. Можно предположить несколько причин этого эффекта. Во-первых, несхожесть в массе зольного остатка древесного угля, полученного при различных давлениях пиролиза, может быть обусловлена разнородностью таких элементов, как Al, Ca, K, Mg, Mn, P, в исходном материале, пиролизованном при разных значениях давления. Как известно, любое растение имеет особенности в распределении подобных элементов по различным его частям. В случае многолетних растений распределение Al, Ca, K, Mg, Mn, P зависит и от скорости годового прироста древесной массы, который в значительной степени определяется климатическими условиями произрастания растения. Во-вторых, обсуждаемое различие может быть обусловлено особенностями в выходе соединений, содержащих такие элементы, как Al, Ca, K, Mg, Mn, P, вследствие изменения кинетики и механизма образования древесного угля с изменением температуры и давления пиролиза. Возможны и другие причины. На рис. 6 представлены микрофотографии (слева) и графики элементного состава (справа) древесного угля, полученного при давлении 0,1 МПа (*a, b*), 0,3 МПа (*c, d*), 0,7 МПа (*e, f*).

Согласно установленным данным, с ростом давления от 0,1 до 0,7 МПа содержание кислорода в древесном угле снижается от 8,4 до 2,9 % вес. При этом содержание углерода повышается от 89,1 до 96,4 % вес. В составе древесного угля, полученном при давлении 0,1 МПа, имеются аморфные смолистые включения (рис. 6, *a*). При давлении 0,3 МПа включения отсутствуют (рис. 6, *c*). При давлении 0,7 МПа общий вид угля под микроскопом совпадает с древесиной (рис 5, *a*; 6, *e*). Это указывает на полное сохранение ячеистой структуры древесины при ее пиролизе под давлением 0,7 МПа.

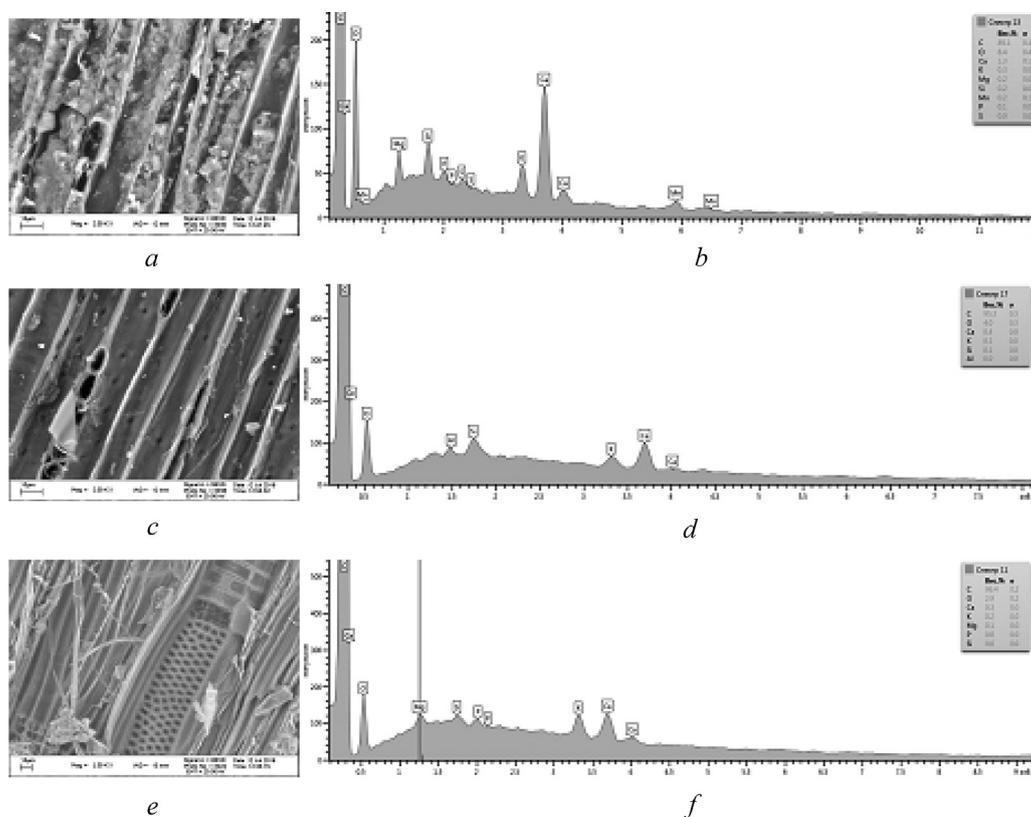


Рис. 6. Микрофотографии (слева) и графики элементного состава (справа) древесного угля, полученного при давлении 0,1 МПа (*a, b*), 0,3 МПа (*c, d*), 0,7 МПа (*e, f*)

Fig. 6. Micrographs (left) and graphs of the elemental composition (on the right) of charcoal obtained at a pressure of 0.1 MPa (*a, b*), 0.3 MPa (*c, d*), 0.7 MPa (*e, f*)

Как уже отмечалось, в случае проведения пиролиза березовой щепы при более высоких давлениях выход температуры в слое щепы на платообразный участок достигается в области более высоких температур. Повышение температуры в слое щепы способствует протеканию процесса десорбции кислородсодержащих компонентов из пор образующегося древесного угля и увеличению содержания углерода в нем. При этом происходит приближение теплотворной способности образующегося древесного угля к теплотворной способности гумусовых углей на стадии метаморфозы IX–X, равной 33,9–33,5 МДж/кг [5, с. 413].

Отмеченное изменение свойства древесного угля, происходящее при переходе в область более высоких давлений и температур, обусловлено особенностями пиролиза древесной массы. Согласно [6], суммарный процесс пиролиза древесины включает следующие стадии. При повышении температуры древесных образцов до примерно 160 °С происходит практически полная потеря влаги (дегидратация). В области температур 200–280 °С протекает процесс термического разложения гемицеллюлозы с образованием летучих продуктов (CO₂, CO) и паров воды. В области температур 280–500 °С разлагается целлюлоза с образованием также в основном летучих продуктов. При температуре выше 320 °С происходит разложение лигнина. Последний процесс обуславливает существенный прирост углерода в остаточном твердом материале.

Первые две стадии суммарного процесса пиролиза древесины (потеря влаги и разложение гемицеллюлозы) являются эндотермическими процессами. В области температур выше 280 °С происходит бурный распад древесины с выделением тепла, который в основном заканчивается при температуре выше 400 °С.

В области более высоких температур происходит прокалка угля. Это эндотермический процесс, в результате которого выделяются небольшое количество жидких продуктов и значительное количество газообразных продуктов. На стадии прокалки угля [1] имеет место практически полное разложение кислородсодержащих продуктов, адсорбированных образовавшимся древесным углем.

Снижение теплоты сгорания древесного угля при уменьшении количества кислородсодержащих компонентов указывает на то, что их теплотворная способность превышает теплотворную способность чистого углерода.

Заключение. Экспериментальное исследование пиролиза березовой щепы на лабораторном стенде в области давлений от 0,1 до 0,7 МПа показало, что повышение давления, при котором осуществляется пиролиз, способствует росту массового выхода древесного угля и увеличению содержания углерода в нем. При этом происходит снижение теплотворной способности образующегося древесного угля, что обусловлено выходом из пористой структуры угля кислородсодержащих компонентов, обладающих более высокой теплотворной способностью по сравнению с чистым углеродом.

Список использованных источников

1. Технологии лесохимических производств / В. А. Выродов [и др.]. – М.: Лесн. пром-сть, 1987. – 352 с.
2. Antal, M. J. The Art, Science, and Technology of Charcoal Production / M. J. Antal, Jr., M. Groenli // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2003. – Vol. 42, N 8. – P. 1619–1640.
3. Feliciano-Bruzual, C. Charcoal injection in blast furnaces (Bio-PCI): CO₂ reduction potential and economic prospects / C. Feliciano-Bruzual // *J. Mater. Res. Technol.* – 2014. – Vol. 3, N 3. – P. 233–243.
4. Сафин, Р. Р. Математическое моделирование процесса пиролиза древесины при регулировании давления / Р. Р. Сафин, И. А. Валеев, Р. Г. Сафин // *Лесн. вестн.* – 2005. – № 2. – С. 168–173.
5. Новый справочник химика и технолога. Сырье и продукты промышленных органических и неорганических веществ ММШ / под ред. Ю. В. Проконова, В. И. Страхова. – СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2002. – 1276 с.
6. Roberts, A. F. Problems Associated with the Theoretical Analysis of the Burning of Wood / A. F. Roberts // *Symposium (International) on Combustion.* – 1971. – Vol. 13, N 1. – P. 893–903.

References

1. Vyrodov V. A., Kislitzyn A. N., Gluchareva M. I. *Technologies of wood- and chemical production*. Moscow, Lesnaya promyshlennost Publ., 1987. 352 p. (in Russian).
2. Antal M. J., Jr., Groenli M. The Art, Science, and Technology of Charcoal Production. *Industrial & Engineering Chemical Research*, 2003, vol. 42, no. 8, pp. 1619–1640. Doi: 10.1021/ie0207919

3. Feliciano-Bruzual C. Charcoal injection in blast furnaces (Bio-PCI): CO₂ reduction potential and economic prospects. *Journal of Material Research and Technologies*, 2014, vol. 3, no. 3, pp. 233–243. Doi: 10.1016/j.jmrt.2014.06.001
4. Safin R. R., Valeev I. A., Safin R. G. Mathematical modeling of pyrolysis of wood process performed by regulation of pressure. *Lesnoi vestnik = Forestry bulletin*, 2005, no. 2, pp. 168–173 (in Russian).
5. Prokonov Yu., Strachov B. I. (eds.). *A new handbook of chemist and technologist. Raw materials and products of industrial organic and inorganic substances MMII*. Sankt-Peterburg, Professional Publ, 2002. 1276 p. (in Russian).
6. Roberts A. F. Problems Associated with the Theoretical Analysis of the Burning of Wood. *Symposium (International) on Combustion*, 1971, vol. 13, no. 1, pp. 893–903. Doi: 10.1016/s0082-0784(71)80090-5

Информация об авторах

Василевич Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: svasilevich@yandex.ru

Малько Михаил Владимирович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mikhailvm@bas-net.by

Богач Владимир Николаевич – научный сотрудник, Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bahach@gmail.com

Дегтеров Дмитрий Валентинович – старший научный сотрудник, Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ddegterov@mail.ru

Асадчий Андрей Николаевич – научный сотрудник, Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: asadchyi@tut.by

Information about the authors

Siarhei V. Vasilevich – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Head of Laboratory, Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (15, b. 2, Academicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: svasilevich@yandex.ru

Mikhail V. Malko – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (15, b. 2, Academicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mikhailvm@bas-net.by

Vladimir N. Bahach – Researcher, Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (15, b. 2, Academicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bahach@gmail.com

Dmitry V. Degterov – Senior Researcher, Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (15, b. 2, Academicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ddegterov@mail.ru

Andrei N. Asadchyi – Researcher, Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (15, b. 2, Academicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: asadchyi@tut.by