

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 662.711.4

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-341-348>

Поступила в редакцию 11.03.2020

Received 11.03.2020

С. В. Василевич¹, М. В. Малько², Д. В. Дегтеров², А. Н. Асадчий²¹*Белорусская государственная академия авиации, Минск, Республика Беларусь*²*Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь***ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ НА ОБРАЗОВАНИЕ ДРЕВЕСНОГО УГЛЯ В ПРОЦЕССЕ ПИРОЛИЗА РАСТИТЕЛЬНОЙ БИОМАССЫ**

Аннотация. Приводятся результаты экспериментального исследования влияния давления на образование древесного угля в процессе пиролиза древесины, осуществленного на лабораторном стенде при давлениях 1, 3, 5, 7 атм и температуре 400 °С. В качестве исходного сырья использована березовая древесина в виде щепы размером частиц 17×8×6 мм. Влажность сырья составляла 14,2 мас.%, плотность – 506,4 кг/м³, зольность – 0,23 мас.%. Установлено, что повышение давления от 1 до 7 атм приводит к увеличению выхода древесного угля от ~ 25 мас.% до ~ 32 мас.%. Содержание углерода при этом возрастает от 89,1 до 96,4 мас.%. Также экспериментально исследовано влияние искусственного ухудшения условий выхода летучих компонентов парогазовой смеси из реакционной зоны на образование древесного угля и содержание углерода. Полученные данные позволяют предположить, что ухудшение условия выхода из реакционной зоны летучих компонентов приводит к их разложению с образованием углерода, отлагающегося в порах пиролизуемого материала и на его внешней поверхности. Представлены экспериментальные данные, свидетельствующие о том, что компоненты пиролизной смолы разлагаются в присутствии древесного угля с отложением образующегося углерода на его поверхности. На протекание этого процесса указывает различие в массах одинаковых образцов древесного угля, выдерживаемых при температуре 600 °С при отсутствии и наличии пиролизной смолы: конечная масса образца, выдерживаемого в присутствии пиролизной смолы, превышает массу образца, выдерживаемого при ее отсутствии. Эти результаты дают косвенное доказательство правильности предположения о разложении компонентов пиролизной смолы в порах и на поверхности пиролизуемого материала при задержке выхода продуктов пиролиза из реакционной зоны. Результаты настоящего исследования представляют интерес для специалистов, разрабатывающих пиролизное оборудование.

Ключевые слова: пиролиз, давление, древесный уголь, содержание углерода, вторичные процессы

Для цитирования: Влияние давления газовой среды на образование древесного угля в процессе пиролиза растительной биомассы / С. В. Василевич [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №3. – С. 341–348. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-341-348>

Siarhei V. Vasilevich¹, Mikhail V. Malko², Dmitry V. Degterov², Andrei N. Asadchyi²¹*Belarusian State Academy of Aviation, Minsk, Republic of Belarus*²*Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***INFLUENCE OF GASES PRESSURE ON THE FORMATION OF CHARCOAL IN THE PROCESS OF PYROLYSIS OF PLANT BIOMASS**

Abstract. The article discusses the results of an experimental study of the effect of pressure on the formation of charcoal during the pyrolysis of wood, carried out on a laboratory bench at pressures of 1, 3, 5, 7 atm and a temperature of 400 °C. Birch wood in the form of wood chips with a particle size of 17×8×6 mm was used as feedstock. Its moisture content was 14.2 % by weight, its density was 506.4 kg/m³, and its ash content was 0.23 % by weight. It was found that an increase in pressure from 1 atm to 7 atm leads to an increase in the yield of charcoal from about 25 % weight. up to about 32 % weight. The carbon content in this case increases from 89.1 % by weight to 96.4 % by weight. The work also experimentally investigated the effect of artificial deterioration of the conditions for the exit of volatile pyrolysis components from the reaction zone on the formation of charcoal and carbon content. The data obtained suggest that the deterioration of the exit conditions of volatile components from the reaction zone leads to their decomposition with the formation of carbon deposited in the pores of the pyrolyzable material and on its outer surface. Experimental data are also presented showing that components of the pyrolysis tar decompose in the presence of charcoal with the deposition of the formed carbon on its surface. The presence of such process is indicated by the difference in masses of identical charcoal samples studied at a temperature of 600 °C in the absence and presence of pyrolysis tar. The final mass of the sample, investigated in the presence of pyrolysis resin, as established in the work, exceeds the mass of the sample, studied in its absence. These results provide indirect evidence of the correctness of the assumption about the decomposition of the pyrolysis components in the pores and on the surface of the pyrolyzable material by a delay in the release of the pyrolysis components from the reaction zone. The results of this study are of interest to specialists developing pyrolysis equipment.

Keywords: pyrolysis, pressure, charcoal, carbon content, secondary processes

For citation: Vasilevich S. V., Malko M. V., Degterov D. V., Asadchyi A. N. Influence of gases pressure on the formation of charcoal in the process of pyrolysis of plant biomass. *Vesti Natsyonal'noi akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 3, pp. 341–348 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-341-348>

Введение. Экспериментальное исследование влияния различных параметров на образование древесного угля в процессе пиролиза древесины является важным этапом на пути разработки эффективной технологии получения этого важного продукта, который широко используется в различных секторах народного хозяйства. Давление, при котором осуществляется пиролиз биомассы, относится к числу важнейших параметров, влияющих на качество и выход древесного угля в процессе термохимической конверсии биомассы.

При изучении пиролиза целлюлозы и древесной биомассы при температуре 400 °С было установлено, что образование древесного угля обусловлено протеканием первичных и вторичных химических процессов [1, 2]. В результате протекания первичных процессов происходит образование древесного угля и большого количества различных углеводородов, которые затем разлагаются с образованием древесного угля и летучих компонентов CO₂, CO, H₂ и др. С ростом давления, при котором происходит пиролиз, выход древесного угля повышается. Результаты работ [1, 2] позднее были подтверждены в исследованиях пиролиза различных типов биомассы при различных условиях осуществления этого процесса [3–5].

Физические и химические процессы, оказывающие влияние на образование древесного угля в процессе пиролиза древесной биомассы, не выяснены до настоящего времени. Возможной причиной положительного влияния давления на выход древесного угля может быть разложение компонентов пиролизной смолы внутри пор образующегося угля. Разумно предположить, что диффузионный выход этих компонентов из пор замедляется с ростом давления, при котором осуществляется пиролиз. Это должно приводить к повышению доли первичных продуктов пиролиза, разлагающихся внутри пор, и, следовательно, к повышению образования массы древесного угля.

К увеличению выхода древесного угля с ростом давления в зоне пиролиза, очевидно, могут приводить и затруднения в диффузионном выходе продуктов пиролиза из реакционной зоны.

Отмеченные обстоятельства указывают на важность проведения дополнительных исследований влияния давления на повышение выхода древесного угля и содержания углерода в нем с целью уточнения условия возникновения этих эффектов. Целью экспериментального исследования пиролиза древесной биомассы, описанного в настоящей работе, явилось углубление понимания этих эффектов давления. Предварительные результаты исследования влияния давления на процесс термохимической конверсии биомассы, выполненного в Институте энергетики Национальной академии наук Беларуси, описаны в работе [6].

Методы и результаты исследования. Исследования пиролиза биомассы проводились на стенде, основным элементом которого является лабораторный реактор, описанный в работе [6].

Основные результаты были получены при давлениях 0,1, 0,3, 0,5, 0,7 МПа и температуре 400 °С.

В каждом эксперименте исследование проводилось 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 использована березовая древесина в виде щепы размером частиц 17×8×6 мм. Влажность исходной древесины составляла 14,2 мас.%, плотность – 506,4 кг/м³, зольность – 0,23 мас.%.

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

Более подробно методика проведения экспериментов (температура нагрева, время выдержки при постоянных условиях, начальная газовая атмосфера и т.д.) приведена в работе [6].

В результате выполненных исследований было установлено, что с ростом давления, при котором осуществлялся пиролиз, происходило увеличение выхода древесного угля, а также

увеличение содержания углерода в образовавшемся угле. Так, по данным опытов, в диапазоне давлений 1–7 атм выход древесного угля по отношению к сухой исходной биомассе изменялся от 25 до 29,4 мас.%, а содержание углерода увеличивалось от 89,1 до 96,4 мас.% (таблица).

Элементный состав древесного угля определялся методом рентгеноспектрального микроанализа с помощью энергодисперсионного анализатора Oxford Instruments X-MaxN, работающего совместно с растровым электронным микроскопом LEO1455VP с чувствительностью 0,1 ат.%. Данное оборудование не позволяет распознавать водород, поэтому в таблице отсутствует информация о содержании данного химического элемента в образцах древесного угля. В то же время таблица содержит данные по компонентам Si, Al, Ca, K, Mg, Mn, P, Fe, которые изменяются случайным образом в связи с разбросом содержаний этих элементов в исходном сырье. Содержание серы и азота в сырой древесине и древесном угле не было зафиксировано.

Как уже отмечалось, увеличение выхода углерода с ростом давления, при котором происходит пиролиз древесной биомассы, возможно, обусловлено замедлением диффузионного выхода компонентов, образовавшихся в порах в процессе разложения древесной массы и диффузионного выхода таких компонентов из реакционной зоны.

С целью проверки этой гипотезы в настоящей работе были выполнены эксперименты с установлением искусственной преграды для затруднения диффузионного выхода компонентов парогазовой смеси из пор образующегося древесного угля и реакционной зоны. Для проведения таких экспериментов была изготовлена керамическая емкость, схема и общий вид которой представлен на рис. 1.

Емкость представляет собой два керамических тигля (наружный 1 и внутренний 2), между которыми находится опорная часть. Диаметр наружного тигля составлял 75 мм, диаметр внутреннего тигля – 50 мм. В дне внутреннего тигля просверливается отверстие диаметром

Элементный состав образцов древесного угля, полученного при различных давлениях
Elemental composition of raw materials and charcoal obtained at different pressures

Элемент	Сырая древесина, %	Уголь, полученный при давлении, %			
		1 атм	3 атм	5 атм	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	0,10	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	–	–
Fe	–	–	0,04	–	–
S	–	–	–	–	–
N	–	–	–	–	–

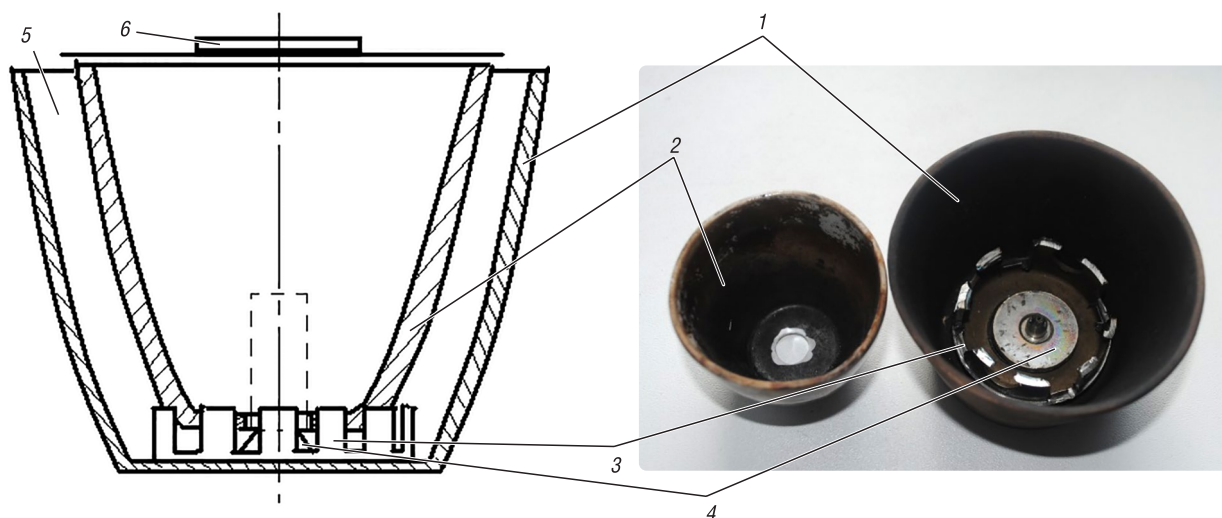


Рис. 1. Керамическая емкость для изучения условий выхода продуктов первичных процессов пиролиза
Fig. 1. Ceramic container for studying output conditions of products of the primary pyrolysis



Рис. 2. Расположение древесной частицы в тигле
Fig. 2. Location of the wood particle in the crucible

11 мм. Опорная часть состоит из опорного кольца 3 с отверстиями и шипа 4. Также в комплект емкости входит сетка 5 из нержавеющей стали и круглые асбестовые пластины 6 разного диаметра (25 мм, 35 мм, 43 мм, 45 мм) для частичного перекрытия верхней части тиглей.

В качестве исследуемых пиролизуемых образцов использовались древесные цилиндры диаметром 10 мм и длиной 25 мм (порода дуб, влажность 7,4 %, зольность 0,18 %). Была подготовлена серия таких древесных цилиндров, каждый из которых подвергался термической конверсии в течение определенного времени (3, 5, 6, 9, 12, 15, 20 мин).

Древесные цилиндры предварительно взвешивали и вставляли вертикально в отверстие внутреннего тигля, который опирался нижним торцом о шип (рис. 2).

Перед каждым экспериментом тигли заполняли углекислым газом для вытеснения воздуха. Сверху тигли накрывали сеткой, на которую помещали асбестовую пластину. После этого емкость помещали в разогретую муфельную печь на определенное время. Все опыты производились при температуре в муфельной печи равной 600 °С. Образцы выдерживались в муфельной печи в течение определенного времени. При этом происходило термическое разложение (пиролиз) древесной частицы и изменение его цвета от светло-коричневого при выдержке на протяжении нескольких минут до темного цвета при выдержке на протяжении 20 мин.

Основная часть газообразных продуктов пиролиза, в состав которых входят углеводороды и другие компоненты, выходила через торцы древесного цилиндра. В случае отсутствия частичного перекрытия газообразные продукты пиролиза быстро выходили из тиглей. При частичном перекрытии газообразные продукты задерживались как в пиролизуемом образце, так и во внутреннем тигле.

На рис. 3 представлен внешний вид древесных образцов после их выдерживания в муфельной печи на протяжении от нескольких минут до 20 мин.



Рис. 3. Внешний вид древесных образцов после их термической обработки
Fig. 3. Appearance of wood samples after their heat treatment

После проведения экспериментов устанавливались значения относительной массы каждого исследованного образца (отношение массы после термического разложения к начальной массе образца). Такие данные определялись для различной степени перекрытия внутреннего тигля, которая рассчитывалась как отношение квадрата диаметра асбестовой пластины перекрытия к квадрату диаметра внутреннего тигля.

На рис. 4 представлена зависимость выхода древесного угля от относительного перекрытия внутреннего тигля. Видно, что увеличение массы образца линейно зависит от степени перекрытия

тия внутреннего тигля. Практически аналогичные результаты были получены авторами работы [4]. Это подтверждает гипотезу о том, что роль повышенного давления, при котором происходит пиролиз биомассы, заключается в увеличении доли разложения первичных продуктов пиролиза во вторичных химических реакциях в результате затруднения выхода их из пор пиролизуемого вещества, а также из зоны, примыкающей к пиролизуемому образцу. Возможно, это разложение является гетерогенным процессом разложения продуктов пиролиза биомассы на стенках образовавшихся пор или комбинацией гетерогенного и гомогенного процессов как внутри пор, так и на внешней поверхности пиролизуемого материала, что и приводит к росту выхода древесного угля.

Точки на рис. 4. представляют экспериментальные величины, а сплошная линия – расчет по аппроксимационному выражению

$$Y = 0,45004 \cdot X + 21,50293; R^2 = 0,9687; p = 0,0066,$$

где Y – выход угля, мас.%; R^2 – константа детерминации; p – степень достоверности.

Как следует из приведенных данных, зависимость выхода угля от степени перекрытия области тигля имеет статистически достоверный характер.

Представленные данные экспериментов могут быть интерпретированы и как результат более существенного оседания смол на образце угля. В этом случае масса образца будет больше при увеличении относительного перекрытия (так как смолы дольше находятся в прилегающей к образцу области), однако процентное содержание углерода в образце должно снижаться.

Для получения результатов, указывающих на то, какой из двух перечисленных процессов оказывает влияние на наблюдаемое увеличение выхода древесного угля и содержания углерода, нами выполнено экспериментальное исследование с использованием готового древесного угля и пиролизной смолы.

В этом эксперименте использовался образец березового древесного угля массой 2,7 г и пиролизная смола (жидкие углеводороды), полученные предварительно путем термохимической конверсии березовой древесины при температуре 600 °С.

Пиролиз березовой древесины осуществлялся при атмосферном давлении и температуре 600 °С при ее прогреве в течение 10 ч. По окончании пиролиза был выполнен элементный анализ для определения процентного содержания углерода в данном образце. Оно составило 84,51 %. На рис. 5 приведены микрофотография образца и участок рабочего окна хроматографа.

Экспериментальное исследование влияния пиролизной смолы на выход древесного угля в процессе термохимической конверсии проводили следующим способом. Образец угля был разделен на два равных куса примерно по 1,3 г каждый. Образцы подвергали

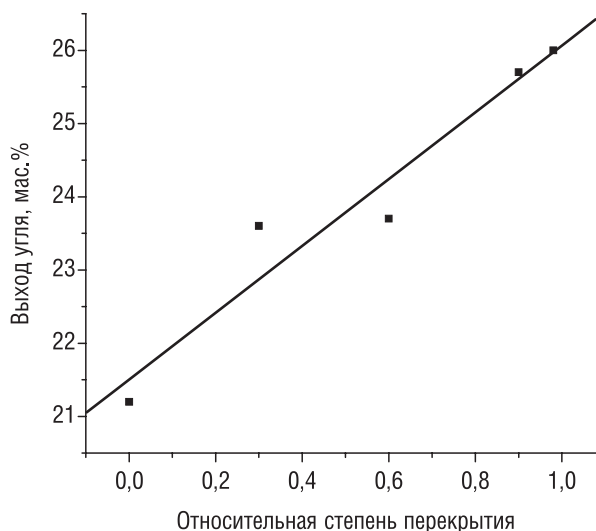
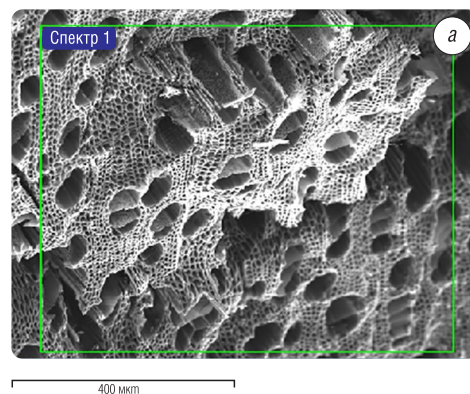


Рис. 4. Массовый выход твердого остатка в зависимости от степени перекрытия внутреннего тигля

Fig. 4. Mass yield of solid residue depending on the degree of overlap of the inner crucible



Общий результат:

Элемент	Весовой %	Атомный%
С	80.02 +/- 0.39	84.51
О	19.23 +/- 0.39	15.25
К	0.44 +/- 0.04	0.14
Са	0.31 +/- 0.04	0.10
Итого	100.00	100.00

Рис. 5. Микрофотография образца угля (a) и рабочее окно хроматографа (b)

Fig. 5. Micrograph of a coal sample (a) and the working window of a chromatograph (b)

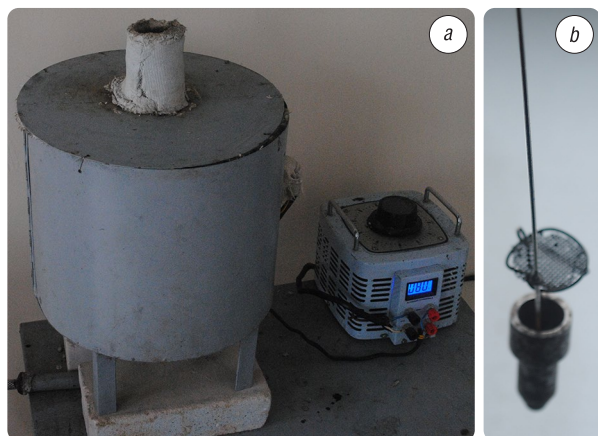


Рис. 6. Общий вид экспериментального высокотемпературного стенда (а), штока для образца угля и емкости с пиролизной смолой (b)

Fig. 6. General view of the experimental high-temperature stand (a), rod for a coal sample and a container with pyrolysis tar (b)

термической обработке. Для этого использовался экспериментальный высокотемпературный стенд, который представляет собой реактор, оснащенный электрическим нагревателем, позволяющим установить температурный режим в реакторе до 1000 °С (рис. 6, а), а также шток для закрепления на него образца угля и емкости с пиролизной смолой (рис. 6, b).

Предварительно реактор заполняли углекислым газом (для вытеснения воздуха) и выводили на необходимый температурный режим (600 °С). После этого один образец угля закрепляли на штоке и устанавливали внутри реактора в положении, указанном на рис. 6, b. Образец угля выдерживался при температуре 600 °С в реакторе в течение 20 мин. После этого образец извлекали, взвешивали и определяли содержание углерода в нем. Содержание углерода составило 94,33 %. На рис. 7 приведены микрофотография образца после выдержки и участок рабочего окна хроматографа.

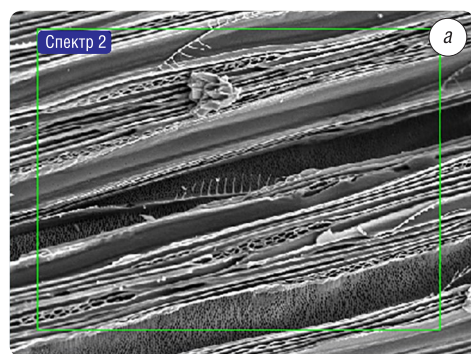
Масса образца угля после выдержки составила 1,07 г при исходной массе в 1,3 г. Потеря массы составила 17,4 %, а процентное содержание углерода увеличилось на 9,82 %. Приведенные результаты можно объяснить разложением остаточных углеводородных соединений, находящихся в порах угля.

Затем второй образец угля помещали на шток. Емкость, находящаяся под образцом древесного угля, заполнялась пиролизной жидкостью. Шток опускали в реактор, предварительно наполненный углекислым газом. Пиролизная жидкость испарялась, вытесняя углекислый газ из реактора. При этом концентрация углеводородов в непосредственной близости к образцу угля становилась значительно выше, чем в предыдущем эксперименте.

Этот образец угля выдерживался на протяжении 20 мин также при температуре 600 °С. После этого образец извлекали, взвешивали и определяли содержание углерода в нем, составившее по данным измерения 96,81 %. На рис. 8 приведены микрофотография образца после выдержки и участок рабочего окна хроматографа.

Масса образца угля после выдержки составила 1,33 г, что на 2,3 % превышает исходную массу. Процентное содержание углерода увеличилось на 12,3 %, что выше, нежели в случае образца, изученного без использования смолы.

Из результатов проведенных авторами настоящей статьи экспериментов следует, что при высокой концентрации углеводородов, составляющих пиролизную смолу, в реакционной зоне, выход твердых продуктов и процентное содержание углерода выше, нежели в случае низкой концентрации таких углеводородов. Это подтверждает факт влияния вторичных реакций на массовый выход твердых продуктов пиролиза и является



Спектр 2

200 мкм

Общий результат:

Элемент	Весовой %	Атомный%
С	92.38 +/- 0.43	94.33
О	7.25 +/- 0.42	5.56
К	0.23 +/- 0.03	0.07
Са	0.14 +/- 0.03	0.04
Итого	100.00	100.00

Рис. 7. Микрофотография образца после выдержки без смолы (а) и рабочее окно хроматографа (b)

Fig. 7. Micrograph of the sample after exposure without tar (a) and the working window of the chromatograph (b)

свидетельством того, что основная роль давления в области низкотемпературного пиролиза биомассы заключается в увеличении длительности протекания вторичных реакций, что обусловлено ухудшением условий выхода компонентов, образовавшихся в первичных процессах, из пористой матрицы и зоны, примыкающей к пиролизуемому материалу.

Заключение. В работе приведено обсуждение результатов экспериментальных исследований пиролиза древесной массы при температуре 400 °С и давлениях от 1 до 7 атм. Установлено, что повышение давления в этом интервале приводит к увеличению выхода древесного угля от примерно 25 до ~32 мас.%. Содержание углерода при этом возрастает от 89,1 до 96,4 мас.%.

С использованием искусственного перекрытия реакционной зоны изучено влияние ухудшения условий выхода образовавшихся летучих компонентов из реакционной зоны на образование древесного угля. Показано, что при увеличении перекрытия реакционной зоны массовый выход твердого остатка увеличивается.

Экспериментальным путем доказано, что повышенная концентрация углеводородов в непосредственной близости к пиролизуемой частице приводит к увеличению выхода твердых продуктов и процентного содержания углерода. Это является свидетельством того, что основная роль давления в области низкотемпературного пиролиза биомассы заключается в ухудшении условий выхода компонентов, образовавшихся в первичных процессах из пористой матрицы и зоны, примыкающей к пиролизуемому материалу.

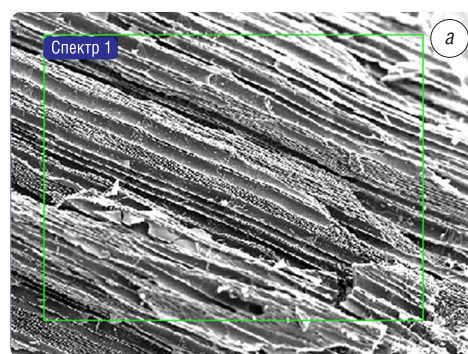
Результаты настоящего исследования представляют интерес для специалистов, разрабатывающих пиролизное оборудование.

Список использованных источников

1. Klason, P. Untersuchungen zur Holzverkohlung. I. Die trockene Distillation der Cellulose / P. Klason, G. Heidenstam, E. Norlin // *Z. Angew. Chem.* – 1909. – Bd. 25. – S. 1205–1214. <https://doi.org/10.1002/ange.19090222503>
2. Klason, P. Untersuchungen zur Holzverkohlung. II. Die trockene Distillation des Holzes von Kiefer, Fichte, Birke und Buche / P. Klason, G. Heidenstam, E. Norlin // *Z. Angew. Chem.* – 1910. – Bd. 26. – S. 1252–1254. <https://doi.org/10.1002/ange.19100232702>
3. Mok, W. S.-L. Effects of pressure on biomass pyrolysis. I. Cellulose pyrolysis products / W. S.-L. Mok, M. J. Antal, Jr. // *Thermochimica Acta.* – 1983. – Vol. 68, № 2–3. – P. 155–164. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(83\)80221-4](https://doi.org/10.1016/0040-6031(83)80221-4)
4. Is Elevated Pressure Required to Achieve a High Fixed-Carbon Yield of Charcoal from Biomass? Part 1: Round-Robin Results for Three Different Corn-cob Materials / L. Wang [et al.] // *Energy Fuels.* – 2011. – Vol. 25, № 7. – P. 3251–3265. <https://doi.org/10.1021/ef200450h>
5. Basile, L. The Role of Pressure in the heat of Pyrolysis of a Lignocellulosic Biomass / L. Basile, A. Tugnoli, V. Cozzani // *Chem. Eng. Trans.* – 2015. – Vol. 43. – P. 451–456. <https://doi.org/10.3303/CET1543076>
6. Исследование процесса получения древесного угля путем пиролиза под давлением / С. В. Василевич [и др.] // *Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук.* – 2017. – № 3. – С. 64–71.

Reference

1. Klason P., Heidenstam G., Norlin E. Untersuchungen zur Holzverkohlung. I. Die trockene Distillation der Cellulose. *Zeitschrift für Angewandte Chemie*, 1909, Bd. 25, S. 1205–1214 (in German). <https://doi.org/10.1002/ange.19090222503>
2. Klason P., Heidenstam G., Norlin E. Untersuchungen zur Holzverkohlung. II. Die trockene Distillation des Holzes von Kiefer, Fichte, Birke und Buche. *Zeitschrift für Angewandte Chemie*, 1910, Bd. 26, S. 1252–1254 (in German). <https://doi.org/10.1002/ange.19100232702>



Общий результат:

Элемент	Весовой %	Атомный%
С	95.70 +/- 0.49	96.81
О	4.13 +/- 0.49	3.13
К	0.18 +/- 0.04	0.05
Итого	100.00	100.00

Рис. 8. Микрофотография образца после выдержки в присутствии смолы (а) и рабочее окно хроматографа (b)

Fig. 8. Micrograph of the sample after exposure in the presence of tar (a) and the working window of the chromatograph (b)

3. Mok W. S.-L., Antal M. J., Jr. Effects of pressure on biomass pyrolysis. I. Cellulose pyrolysis products. *Thermochimica Acta*, 1983, vol. 68, no. 2–3, pp. 155–164. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(83\)80221-4](https://doi.org/10.1016/0040-6031(83)80221-4)
4. Wang L., Trninic M., Skreiberg Ø., Gronli M., Considine R., Antal M. J., Jr. Is Elevated Pressure Required To Achieve a High Fixed-Carbon Yield of Charcoal from Biomass? Part 1: Round-Robin Results for Three Different Corn cob Materials. *Energy and Fuels*, 2011, vol. 25, no. 7, pp. 3251–3265. <https://doi.org/10.1021/ef200450h>
5. Basile L., Tugnoli A., Cozzani V. The Role of Pressure in the heat of Pyrolysis of a Lignocellulosic Biomass. *Chemical Engineering Transactions*, 2015, vol. 43, pp. 451–456. <https://doi.org/10.3303/CET1543076>
6. Vasilevich S. V., Malko M. V., Bohach V. N., Degterov D. V., Asdchyi 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. 2, pp. 64–71 (in Russian).

Информация об авторах

Василевич Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, Белорусская государственная академия авиации (ул. Уборевича, 77, 220096, 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

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 – старший 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), Associate Professor, Head of the Department, Belarusian State Academy of Aviation (77, Uborevich Str., 220096, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: svasilevich@yandex.ru

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

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

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