

С. В. Василевич¹, М. В. Малько², Д. В. Дегтеров², А. Н. Асадчий²

¹Белорусская государственная академия авиации, Минск, Республика Беларусь

²Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОПОРИСТОГО УГЛЕРОДНОГО МАТЕРИАЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Аннотация. Представлен метод получения активированных углей (высокопористых углеродных материалов) на базе растительного (древесного) сырья с использованием разработанной и изготовленной экспериментальной установки, состоящей из парогенератора, пароперегревателя, камеры пиролиза и активации и охладителя с теплообменником с принудительной конвекцией. Проведен анализ особенности химической и физической активации древесного угля, получаемого путем пиролиза древесного сырья, и сделан вывод о преимуществе физической активации на основе применения водяного пара в качестве активирующего агента. Дано описание результатов экспериментальных исследований, выполненных с использованием разработанной установки. Эти результаты подтверждают выводы других исследований о том, что избыточное давление повышает массовый выход твердых продуктов, образующихся в процессе термохимической конверсии растительной биомассы. Установлено, что повышение давления, при котором осуществляется пиролиз, приводит к росту содержания углерода в древесном угле. Так, при повышении давления, при котором осуществлялся пиролиз, от 1 до 8 атм содержание углерода в древесном угле возросло от 88,3 до 93,7 мас.%. Представлены данные по эффективности физической активации твердых продуктов пиролиза древесной биомассы с использованием водяного пара и сделан вывод о перспективности данного направления при разработке основ производства высокопористых углеродных материалов.

Ключевые слова: экспериментальная установка, парогенератор, пароперегреватель, камера пиролиза и активации, повышенное давление, твердые продукты конверсии

Для цитирования: Получение высокопористого углеродного материала с применением термохимической конверсии древесной биомассы под давлением / С. В. Василевич [и др.] // Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2021. – Т. 66, № 1. – С. 76–83. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-1-76-83>

Siarhei V. Vasilevich¹, Mikhail V. Malko², Dmitry V. Degterov², Andrei N. Asadchyi²

¹Belarusian State Aviation Academy, Minsk, Republic of Belarus

²Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

OBTAINING OF HIGH POROUS CARBON MATERIAL USING THERMOCHEMICAL CONVERSION OF WOOD BIOMASS UNDER PRESSURE

Abstract. A method is presented for obtaining activated carbons (highly porous carbon materials) based on plant (wood) raw materials using a developed and manufactured experimental setup, consisting of a steam generator, a superheater, a pyrolysis and activation chamber and a cooler with a heat exchanger with forced convection. The analysis of the features of chemical and physical activation of charcoal, obtained by pyrolysis of wood raw materials, is carried out, and a conclusion is made about the advantage of physical activation, based on the use of water vapor as an activating agent. A description of the results of experimental studies carried out using the developed installation is given. These results confirm the conclusions of other studies that excessive pressure increases the mass yield of solid products formed during the thermochemical conversion of plant biomass. It was found that an increase in pressure, at which pyrolysis occurs, leads to an increase in the carbon content in charcoal. So, with an increase in pressure at which pyrolysis was carried out, from 1 to 8 atm, the carbon content in charcoal increased from 88.3 to 93.7 wt.%. Data on the efficiency of physical activation of solid products of pyrolysis of woody biomass using water vapor are presented and a conclusion is made that this direction is promising in the development of the foundations for the production of highly porous carbon materials.

Keywords: experimental setup, steam generator, superheater, pyrolysis and activation chamber, high pressure, solid conversion products

For citation: Vasilevich S. V., Malko M. V., Degterov D. V., Asadchyi A. N. Obtaining of high porous carbon material using thermochemical conversion of wood biomass under pressure. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 1, pp. 76–83 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-1-76-83>

Введение. Активированный уголь – пористый адсорбент, получаемый из различных углеродосодержащих материалов, таких как древесный уголь, каменноугольный кокс, нефтяной кокс, скорлупа и косточки плодовых культур и других материалов органического происхождения. Активированный уголь относят к группе микрокристаллических разновидностей углерода, так как мельчайшие углеродные частицы в нем представляют собой кристаллиты размером 1–3 нм [1]. Удельная поверхность активированного угля в зависимости от технологии изготовления составляет от 600 до 1200 м²/г. Активированные угли являются уникальными адсорбентами в силу своих гидрофобных свойств [2]. Они способны адсорбировать широкий спектр веществ и это обуславливает их использование для очистки различных растворов и газовых смесей. Активированный уголь находит и другое использование в различных отраслях народного хозяйства.

Республика Беларусь не имеет собственного производства активированного угля и вынуждена импортировать этот ценный продукт. Данное обстоятельство указывает на необходимость развития такой технологии. Беларусь имеет достаточное количество природного сырья, такого как древесина, торф, природные сланцы и т.д., для его производства. Предпосылкой решения этой задачи является наличие ясного понимания процессов пиролиза органических материалов и активации образующегося угля.

В настоящей работе дается описание экспериментальной установки для осуществления пиролиза древесной биомассы при повышенном давлении и активации получаемого продукта, которая является важной стадией в получении конечного продукта, а также обсуждение экспериментальных результатов по влиянию давления на процесс пиролиза древесной биомассы и эффективность процесса физической активации с использованием пара воды в качестве активационного агента.

Выбор метода активации. Известны два метода активации: химический и физический. В случае использования химического метода активации исходный материал (уголь, лигнит, торф или биомасса) смешивают (пропитывают) с концентрированными водными растворами активирующего агента. В качестве активирующих агентов, как правило, используют такие вещества, как: ZnCl₂, FeCl₃, H₂SO₄, H₃PO₄, HCl, HNO₃, NaOH/KOH, Na₂CO₃/K₂CO₃, мочевины [3]. В промышленных процессах химической активации наиболее часто применяются ZnCl₂, KOH и H₃PO₄ [4].

Процесс химической активации имеет свои специфические особенности в зависимости от используемого активирующего агента. Так, применение ZnCl₂ в случае древесных опилок приводит к образованию коричневой массы, похожей на расплавленный пластиковый материал [5]. Эта масса затем нагревается в отсутствие кислорода (пиролиз), что приводит к осуществлению процесса химической активации. Температура, необходимая для проведения химической активации может быть ниже, нежели в случае физической активации (600–700 °С для ZnCl₂ [5]), но, например, для KOH по-прежнему требуются температуры выше 850 °С [6]. Хотя механизмы химической активации варьируются в случае использования различных активирующих агентов, имеются общие закономерности процесса химической активации. Так, уже на стадии перемешивания углеродистого продукта и активирующего агента начинает разрушаться исходная структура углеродистого продукта [6]. В случае растительной биомассы разрываются связи между молекулами целлюлозы, и ионы активирующего агента занимают образовавшиеся пустоты, которые представляют микропоры, проявляющиеся в процессе последующей активации. Образовавшаяся микропористость становится доступной для физической и химической адсорбции после промывки активированного материала.

Физическая (или термическая) активация представляет собой частичное окисление углеродистого предшественника или промежуточного материала с повышением его пористости. Физическая активация – это самый старый метод приготовления активированного угля. Сам термин «физический» основан на ошибочном предположении, что в случае физической активации происходит только удаление конденсата из пор вследствие нагрева углеродистого материала до достаточно высоких температур. В действительности процесс физической активации сопровождается протеканием определенных физико-химических процессов с образованием ряда химических комплексов на поверхности активируемого углеродистого материала.

Т а б л и ц а 1. Активация углеродсодержащих материалов с помощью окисляющих газов (физическая или термическая активация [6])

Table 1. Activation of carbonaceous materials using oxidizing gases (physical or thermal activation [6])

Окислитель	Стехиометрический механизм		Энергетический баланс
	Физическая активация	Термическая активация	
Водяной пар	$C + H_2O$ $2C + H_2$	$CO + H_2$ $2C(H)^*$	Эндотермический процесс
CO ₂ суммарно:	$C + CO_2$ C(O) $C + CO_2$	$C(O) + CO^*$ CO $2CO_2$	Эндотермический процесс
Воздух/кислород	$C + CO_2$		Экзотермический процесс

П р и м е ч а н и е: C(H)* и C(O)* являются хемисорбированными на поверхности комплексами кислорода и водорода.

процессом. Напротив, физическая активация в присутствии воздуха или кислорода протекает с выделением энергии, то есть этот процесс является экзотермическим. Рассматривая физическую активацию, выполняемую как второй этап после карбонизации, некоторые авторы выделяют две стадии активации. По их мнению, при протекании первой стадии активации происходит сжигание (окисление) дезорганизованной (аморфной) углеродоподобной смолы, образовавшейся в процессе пиролиза углеродосодержащего вещества [5]. Это приводит к образованию большого количества пор в активируемом материале. На второй стадии физической активации, согласно [5], происходит окисление части углеродных кристаллитов. Этот процесс приводит к появлению дополнительных пор, создавая новое (микро) поровое пространство или новые взаимосвязи между порами, а также изменяя химический состав поверхности [7, 8].

Степень физической активации может быть охарактеризована выгоранием активируемого материала, то есть потерей массы при активации [5]. В целом более высокое выгорание коррелирует с более высокой пористостью продукта. Однако выгорание выше 40–50 % может привести к снижению пористости, так как существует возможность того, что внешнее выгорание углеродистых материалов перевесит образование пористости [8].

В [9] установлено, что использование кислорода для проведения физической активации обуславливает появление быстрых процессов (сгорание), которые затрудняют осуществление контроля самого процесса физической активации углеродистого материала. К таким же выводам пришли и авторы работы [10], которые также обнаружили, что применение воздуха или кислорода приводит к существенным затруднениям контроля процесса активации углеродистых материалов.

Использование водяного пара или диоксида углерода в процессах «физической» активации исключает указанный выше негативный фактор.

Установлено, что паровая активация материалов, полученных путем пиролиза биомассы, как и другие виды активации, приводит к существенному увеличению их удельной поверхности. Так, исходный образец древесного угля, полученного путем пиролиза красного дуба при 500 °С, имел удельную поверхность 1,2 м²/г [11]. Активация паром при 400 °С в течение 5 мин повышала удельную поверхности такого образца в 50 раз, или до 52,7 м²/г (табл. 2).

Как видно из табл. 2, удельная поверхность углеродистых материалов, полученных путем пиролиза биомассы, повышается с ростом температуры активации в диапазоне температур для данного исследования (между 400 и 800° С).

Описание экспериментальной установки. Авторами была разработана и изготовлена экспериментальная установка пиролиза растительной биомассы под давлением, позволяющая получать высокопористый углеродный материал, параметры которого (сорбционная способность,

В табл. 1 представлены данные о протекании химических процессов в случае физической активации углеродистого материала в присутствии водяного пара, диоксида углерода, а также воздуха или кислорода.

Как следует из табл. 1, физическая активация основана на протекании некоторых окислительных реакций, то есть химических процессов. Протекание физической активации в присутствии водяного пара или диоксида углерода требует подвода энергии в зону реакции, то есть физическая активация углеродистых материалов в присутствии этих компонентов является эндотермическим

Т а б л и ц а 2. Площадь поверхности по ВЕТ (m^2/g) и стандартное отклонение для всех комбинаций обработки древесного угля из красного дуба [11]

Table 2. BET surface area (m^2/g) and standard deviation for all combinations of red oak charcoal treatment [11]

Температура	Время проведения эксперимента							
	5 мин		32,5 мин		60 мин		Среднее	
	площадь	отклонение	площадь	отклонение	площадь	отклонение	площадь	отклонение
400 °C	52,7	37,5	127,6	13,7	145,4	74,5	108,6	60,0
600 °C	350,7	72,8	355,3	105,8	635,8	141,1	447,2	170,6
800 °C	656,6	185,3	526,9	129,4	401,8	67,0	528,4	161,4
Средняя	353,3	280,4	336,6	192,6	394,3	229,4	361,4	228,9

общий объем пор, насыпная плотность, элементный состав) соответствуют требованиям к активированному углю.

При разработке установки была принята технологическая схема, включающая три блока. Она представлена на рис. 1.

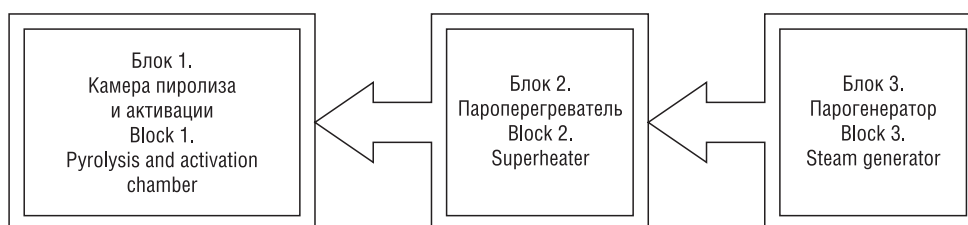


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки

Fig. 1. Block diagram of the experimental setup

Стрелками на схеме показано направление движения пара. Блоки 1 и 3 схемы оснащены клапанами для снижения давления: на блоке 1 – на 8 атм, на блоке 3 – на 10 атм.

Использование этих клапанов позволяет обеспечить движение водяного пара из парогенератора в камеру пиролиза и активации.

Каждый блок выполнен в виде цилиндров с внутренним диаметром 0,1 м. Блоки (камеры) сообщаются между собой переходниками в виде трубок с внутренним диаметром 0,02 м. Толщина стенок камер и переходников 0,005 м.

Общий вид и схема экспериментальной установки представлены на рис. 2.

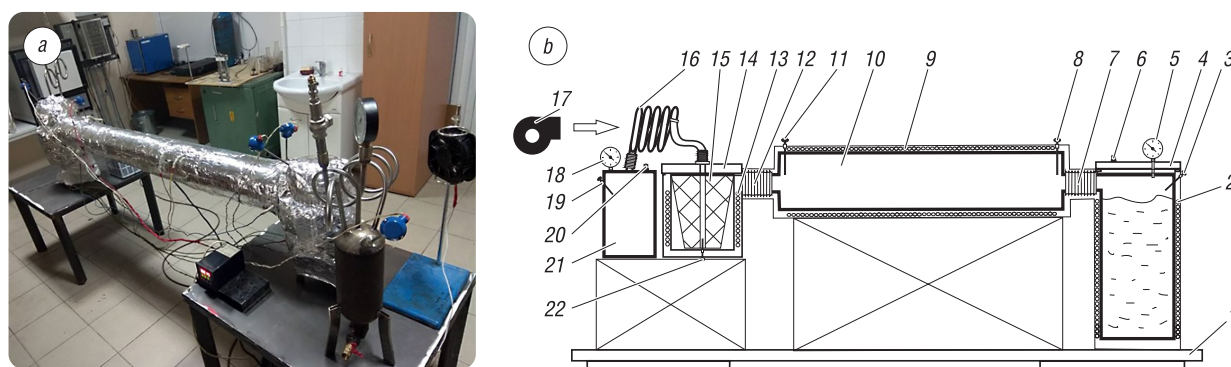


Рис. 2. Общий вид (a) и схема (b) экспериментальной установки: 1 – рама; 2, 9, 13 – нагреватель; 3, 8, 11, 19, 22 – датчик температуры; 4 – крышка паронагревателя; 5, 18 – манометр; 6, 20 – предохранительный клапан; 7, 12 – переходник; 10 – пароперегреватель; 14 – крышка камеры пиролиза и активации; 15 – корзина; 16 – теплообменник; 17 – вентилятор; 21 – охладитель

Fig. 2. General view (a) and schematic (b) of the experimental setup: 1 – frame; 2, 9, 13 – heater; 3, 8, 11, 19, 22 – temperature sensor; 4 – steam heater cover; 5, 18 – manometer; 6, 20 – safety valve; 7, 12 – adapter; 10 – superheater; 14 – cover of the pyrolysis and activation chamber; 15 – basket; 16 – heat exchanger; 17 – fan; 21 – cooler



Рис. 3. Загрузка корзины в камеру пиролиза и активации
Fig. 3. Loading the basket into the pyrolysis and activation chamber

нераторе, пароперегревателе *10* и камере пиролиза и активации. Необходимое давление в установке поддерживается благодаря клапанам *6* и *20*, установленным на парогенераторе и охладителе *21*. Для контроля уровня давления на них смонтированы манометры.

Температурный режим в установке поддерживается благодаря использованию электрических нагревателей на парогенераторе, пароперегревателе и камере пиролиза и активации. Контроль температур в камерах происходит с помощью терморезисторов *3*, *8*, *11*, *19* и *22* (см. рис. 2, *b*), установленных в парогенераторе, пароперегревателе, в камере пиролиза и в охладителе.

Газообразные продукты конверсии вместе с перегретым паром при температурном расширении создают избыточное давление в установке. В случае, когда давление превышает рабочее (8 атм), излишек газообразных продуктов выходит из установки через предохранительный клапан *20*.

Тяжелые углеводороды, выделяемые в камере пиролиза и активации в процессе работы установки, поступают в охладитель *21* через теплообменник *16*. В охладителе тяжелые углеводороды и пар конденсируются. Для их удаления охладитель оснащен выходным патрубком и вентилем (рис. 4).

С целью интенсификации процесса охлаждения отходящих газообразных продуктов и обеспечения их конденсации установлен вентилятор, создающий воздушный поток для усиления теплоотдачи.

Описание эксперимента. При проведении экспериментов в качестве сырья использовалась березовая древесная щепа размером $35 \times 8 \times 4$ мм. Влажность была 9,6 % (определялась прибором ЭВЛАС-2М), зольность – 0,11 %, плотность древесины – $680,95 \text{ кг/м}^3$. Насыпная плотность щепы составила $187,27 \text{ кг/м}^3$. Калорийность древесного сырья была равна $17\,269,79 \text{ кДж/кг}$. Масса древесины в корзине составила 200,2 г.

После загрузки сырья и подключения нагревателя камеру пиролиза и активации вывели на тепловой режим, соответствующий началу пиролиза ($250 \text{ }^\circ\text{C}$). Через 55 мин после начала эксперимента



Рис. 4. Общий вид охладителя
Fig. 4. General view of the cooler

включили нагреватели на парогенераторе и пароперегревателе. При этом в момент окончания пиролиза растительной биомассы (древесной щепы) в камеру пиролиза и активации начал поступать перегретый пар. Длительность пиролиза составила 75 мин, максимальная температура – $650 \text{ }^\circ\text{C}$, давление – 8 атм. По окончании пиролиза прошли прокалка и одновременно активация перегретым паром в течение 2,5 ч. Температура перегретого пара при этом составляла $760 \text{ }^\circ\text{C}$. Общее время процесса – 4 ч 40 мин. По окончании работы нагреватели выключили. После охлаждения всех элементов установки и снижения давления до атмосферного крышку камеры пиролиза и активации открыли и извлекли корзину с образцами готового твердого продукта. Массовый выход полученных твердых продуктов пиролиза составил 15,5 %.

После этого в корзину снова загрузили древесную щепу и установили ее в камеру пиролиза. При этом сняли клапаны для того, чтобы во время работы установки в камерах давление было близко к атмосферному.

Экспериментальная установка работает следующим образом. В начале работы древесное сырье загружается в корзину *15* (рис. 3) и помещается в полость камеры пиролиза и активации. После загрузки корзины камера пиролиза и активации герметично закрывается крышкой камеры *14* с предварительной установкой уплотнительного кольца из латуни. В парогенератор заливают воду объемом 2 л и герметично закрывают специальной крышкой. После этого проверяется исправность приборов и надежность крепления элементов установки. Затем включаются вентилятор *17*, измеритель регулятор температур «Сосна-002» и нагреватели *2*, *9* и *13* на парогенераторе, пароперегревателе *10* и камере пиролиза и активации.

Затем повторили эксперимент и получили твердые продукты пиролиза, массовый выход которых составил 9,4 %.

В ходе проведения эксперимента было выявлено, что при давлении 8 атм массовый выход твердых продуктов выше, чем при атмосферном. Это подтверждает ранее полученные авторами результаты [12, 13].

Затем были проведены исследования состава и свойств полученных твердых продуктов конверсии. На рис. 5 представлены микрофотографии образцов твердых продуктов пиролиза, полученных при давлении 1 атм и 8 атм.

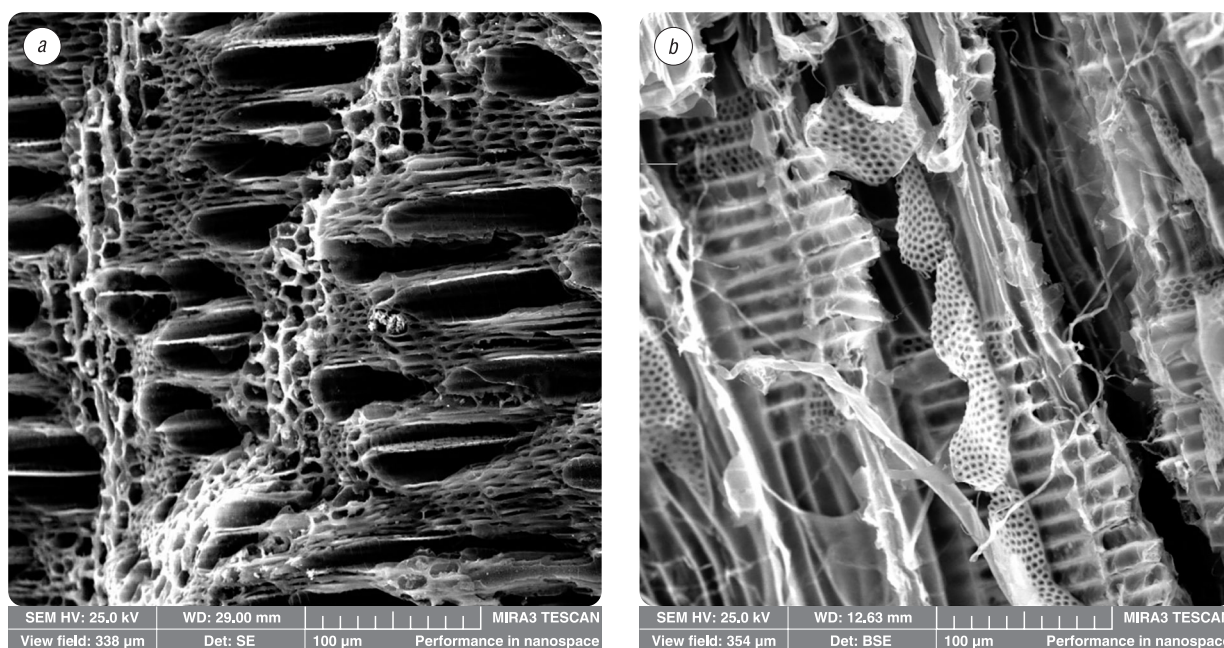


Рис. 5. Микрофотографии образцов твердых продуктов пиролиза, полученных при давлении 1 атм (a) и 8 атм (b)
 Fig. 8. Micrographs of samples of solid pyrolysis products obtained at a pressure of 1 atm (a) and 8 atm (b)

Видно, что в образце, полученном при давлении 8 атм, наблюдается больше пор на поверхности, чем в образце, полученном при давлении 1 атм.

Элементный состав образцов приведен в табл. 3. Видно, что содержание углерода в образце, полученном при давлении 8 атм, выше, чем в образце, полученном при атмосферном давлении. Это согласуется с результатами исследований, описанных в [12, 13]. Насыпная плотность полученного твердого продукта составила 70,85 кг/м³. Общий объем пор равен 3,985 см³/г, удельная поверхность – 767,74 м²/г.

Данные характеристики полученных твердых продуктов термохимической конверсии древесины соответствуют требованиям норм для марки активированного угля ОКП 216239 0100 (ГОСТ 6217-74 «Уголь активный древесный дробленый»). При этом твердые продукты, полученные при атмосферном давлении, имеют гораздо худшие характеристики (общий объем пор – 0,31 см³/г, удельная поверхность – 52,04 м²/г), не удовлетворяющие требованиям указанного стандарта.

Таблица 3. Данные элементного состава сырья и углей, полученных при различных давлениях

Table 3. Elemental composition of raw materials and charcoal obtained at different pressures

Элемент	Сырая древесина	Уголь	
		1 атм	8 атм
C, %	55,18	88,3	93,7
O, %	44,52	8,1	3,1
Si, %	0,15	0,7	2,0
Al, %	0,08	0,5	0,3
Ca, %	0,01	1,1	–
K, %	0,05	0,3	0,4
Mg, %	0,01	0,4	0,3
Mn, %	–	0,1	–
P, %	–	0,2	–
S, %	–	0,1	0,2
Fe, %	0,1	0,2	–

Заключение. Результаты испытания экспериментальной установки термохимической конверсии растительной биомассы под давлением показали эффективность использования такого оборудования для получения высокопористых углеродных материалов, параметры которых соответствуют требованиям к активированному углю. Температура пиролиза биомассы равнялась 650 °С, температура перегретого пара – 760 °С. Общее время процесса получения активированного угля составило 4 ч 40 мин, время активации – 2,5 ч. Массовый выход полученного твердого продукта соответствует 15,5 %. По выявленным показателям получаемый продукт удовлетворяет требованиям стандартов, что позволяет сделать вывод о возможности применения выбранной технологической схемы для создания промышленных образцов пиролизного оборудования с целью получения активированных углей из древесной биомассы. При этом необходимо принимать во внимание тот факт, что, несмотря на явный положительный эффект предложенного метода получения активированных углей, использование пара с избыточным давлением потребует некоторого усложнения конструкций оборудования. Однако так как для создания избыточного давления не требуется внешнего источника пара, то эти усложнения будут включать в себя лишь дополнительную герметизацию и систему дистанционного открытия камер (для обеспечения безопасности персонала). Более детальная оценка рентабельности использования пиролизного оборудования для получения активированных углей из древесной биомассы под давлением может быть произведена путем экономической оценки внедрения данного оборудования с учетом конкретных требований потребителя по производительности, качеству продукта, типу сырья и др.

Список использованных источников

1. Новый справочник химика и технолога. Сырье и продукты промышленности органических и неорганических веществ / С. Н. Васильев [и др.]. – СПб.: НПО «Профессионал», 2005. – Ч. 2. – 1144 с
2. Обзор рынка активированного (активного) угля в СНГ / Объединение независимых экспертов в области минеральных ресурсов, металлургии и химической промышленности. – М., 2019. – 193 с.
3. Activated Carbon, Biochar and Charcoal: Linkages and Synergies across Pyrogenic Carbon's ABCs / N. Hagemann [et al.] // *Water*. – 2018. – Vol. 10, iss. 2. – P. 182. <https://doi.org/10.3390/w10020182>
4. Молекулярная биология бактерий, взаимодействующих с растениями / под ред. Г. Спайнк, А. Кондорози, П. Хукас. – СПб.: ООО «ИПК «БИОНТ»», 2002. – 567 с.
5. Smišek, M. Active Carbon, Manufacture, Properties and Applications / M. Smišek, S. Cerný. – Amsterdam ; London ; New York: Elsevier Publ. Co., 1970. – VII, 479 p. <https://doi.org/10.1002/ange.19710830820>
6. Marsh, H. Activated Carbon / H. Marsh, F. R. Reinoso. – Amsterdam: Elsevier, 2006. – 554 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-044463-5.X5013-4>
7. Daud, W. M. A. W. Textural characteristics, surface chemistry and oxidation of activated carbon / W. M. A. W. Daud, A. H. Houshamnd, // *J. Nat. Gas Chem*. – 2010. – Vol. 19, iss. 3. – P. 267–279. [https://doi.org/10.1016/S1003-9953\(09\)60066-9](https://doi.org/10.1016/S1003-9953(09)60066-9)
8. Effect of steam and carbon dioxide activation in the micropore size distribution of activated carbon / M. Molina-Sabio [et al.] // *Carbon*. – 1996. – Vol. 34, №4. – P. 505–509. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(96\)00006-1](https://doi.org/10.1016/0008-6223(96)00006-1)
9. The role of biochar porosity and surface functionality in augmenting hydrologic properties of a sandy soil / W. Suliman [et al.] // *Sci. Total Environ*. – 2017. – Vol. 574. – P. 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.025>
10. Xiao, F. Effects of post-pyrolysis air oxidation of biomass chars on adsorption of neutral and ionizable compounds / F. Xiao, J. J. Pignatello // *Environ. Sci. Technol*. – 2016. – Vol. 50, iss. 12. – P. 6276–6283. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00362>
11. Campo, B. G. del. Production of activated carbon from fast pyrolysis biochar and the detoxification of pyrolytic sugars for ethanol fermentation [Electronic resource] / B. G. del Campo // Graduate Theses and Dissertations. 14691. – 2015. – Mode of access: <https://lib.dr.iastate.edu/etd/14691> – Date of access: 12.02.2019.
12. Исследование процесса получения древесного угля путем пиролиза под давлением / С. В. Василевич [и др.] // *Весті Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*. – 2017. – № 3. – С. 64–71.
13. Расчетное исследование выхода твердых продуктов пиролиза древесины при повышенном давлении / С. В. Василевич [и др.] // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. – 2020. – Т. 63, № 3. – С. 253–263. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-253-263>

References

1. Vasil'ev S. N., Gamova I. A., Vekki A. V. de, Deineko I. P., Itsko E. F., Kalinskaya T. V., Podkletnova N. M., Pokonova Yu. V., Rybakov V. A., Saratov I. E., Filatov B. N., Fomenko V. N., Yudkevich Yu. D. *New Handbook of Chemist and Technologist. Raw Materials and Products of the Industry of Organic and Inorganic Substances. Part 2*. St. Petersburg, ANO NPO Professional Publ., 2005. 1144 p. (in Russian).
2. Association of Independent Experts in the Field of Mineral Resources, Metallurgy and Chemical Industry. *Market Overview of Activated (Active) Carbon in the CIS*. Moscow, 2019. 193 p. (in Russian).

3. Hagemann N., Spokas K., Schmidt H. P., Kägi R., Böhler M. A., Bucheli T.D. Activated Carbon, Biochar and Charcoal: Linkages and Synergies across Pyrogenic Carbon's ABCs. *Water*, 2018, vol. 10, iss. 2, p. 182. <https://doi.org/10.3390/w10020182>
4. Spink G., Kondoroshi A., Houkas P., eds. *Molecular Biology of Bacteria Interacting with Plants*. St. Petersburg, JSC "IPK "BIONT" Publ., 2002. 567 p. (in Russian).
5. Smešek M., Cerný S. *Active Carbon, Manufacture, Properties and Applications*. Amsterdam ; London ; New York: Elsevier Publ. Co., 1970. VII, 479 p. <https://doi.org/10.1002/ange.19710830820>
6. Marsh, H., Reinoso F.R. Activated Carbon. Amsterdam, Elsevier, 2006. 554 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-044463-5.X5013-4>
7. Daud W.M. A. W., Houshamnd A.H. Textural characteristics, surface chemistry and oxidation of activated carbon. *Journal of Natural Gas Chemistry*, 2010, vol. 19, iss. 3, pp. 267–279. [https://doi.org/10.1016/S1003-9953\(09\)60066-9](https://doi.org/10.1016/S1003-9953(09)60066-9)
8. Molina-Sabio M., Gonzalez M., Rodriguez-Reinoso F., Sepúlveda-Escribano A. Effect of steam and carbon dioxide activation in the micropore size distribution of activated carbon. *Carbon*, 1996, vol. 34, no. 4, pp. 505–509. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(96\)00006-1](https://doi.org/10.1016/0008-6223(96)00006-1)
9. Suliman W., Harsh J. B., Abu-Lail N. I., Fortuna A.-M., Dallmeyer I., Garcia-Pérez M. The role of biochar porosity and surface functionality in augmenting hydrologic properties of a sandy soil. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 574, pp. 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.025>
10. Xiao F., Pignatello J.J. Effects of post-pyrolysis air oxidation of biomass chars on adsorption of neutral and ionizable compounds. *Environmental Science & Technology*, 2016, vol. 50, iss. 12, pp. 6276–6283. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00362>
11. Campo B.G. del. Production of activated carbon from fast pyrolysis biochar and the detoxification of pyrolytic sugars for ethanol fermentation. 2015. Graduate Theses and Dissertations. 14691. Available at: <https://lib.dr.iastate.edu/etd/14691> (accessed 12 December 2019).
12. Vasilevich S. V., Malko M. V., Bogach. N., Degterov D. V., Asadchiy A. N. Study of the process of obtaining charcoal 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).
13. Vasilevich S. B., Malko M. V., Degterov D. V., Asadchiy A. N. Computational study of the yield of solid products of wood pyrolysis at elevated pressure. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS higher educational institutions and power engineering associations*, 2020, vol. 63, no. 3, pp. 253–263. (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-253-263>

Информация об авторах

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

Дегтеров Дмитрий Валентинович – заведующий сектором, 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, Belarusian State Aviation Academy (77, Ubovovich 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, building 2, Academicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mikhailvm@bas-net.by

Dmitry V. Degterov – Head of Sector, 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