

УДК 661.961,662.71

ПОЛУЧЕНИЕ БИОУГЛЯ ПИРОЛИЗОМ БИОМАССЫ

© 2019 г. А. Ю. Крылова^{1,*}, Е. Г. Горлов^{1,**}, А. В. Шумовский^{1,***}

¹ ФГУП Институт горючих ископаемых — научно-технический центр по комплексной переработке твердых горючих ископаемых (ФГУП ИГИ), 119071 Москва, Россия

*e-mail: aykrylova@yandex.ru

**e-mail: gorloveg@mail.ru

***e-mail: a.shumovsky@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.04.2019 г.

После доработки 23.05.2019 г.

Принята к публикации 03.06.2019 г.

Эффективному использованию биомассы в последнее время уделяется особое внимание. Среди процессов конверсии биомассы пиролиз привлекает повышенный интерес. Технология пиролиза позволяет производить биоуголь (биочар), которым можно заменять ископаемое энергетическое топливо. Биоуголь также может быть переработан в жидкое топливо для непосредственного использования в транспортных средствах и замены нефтепродуктов (бензина, авиационного керосина и дизельного топлива). В последние годы биоуголь находит все более широкое применение в аграрной промышленности как высококачественное комплексное удобрение, обладающее уникальными свойствами.

Ключевые слова: биомасса, пиролиз, биоуголь, биочар, технология, удобрение

DOI: 10.1134/S0023117719060100

ВВЕДЕНИЕ

Использование горючих ископаемых в качестве источника энергии в ближайшее время будет только увеличиваться, особенно в развитых странах, поскольку горючие ископаемые имеют большую ресурсную базу. Относительная доступность, приемлемая цена и имеющиеся эффективные технологии извлечения энергии делают их использование экономичным на довольно длительную перспективу. Маловероятно, что горючим ископаемым в ближайшее время найдется полноценная замена.

Традиционная крупномасштабная тепловая энергетика, как известно, до сих пор основана на использовании ископаемого угля. Ее доля в общем энергобалансе России составляет ~70%. Это самый “грязный” способ получения энергии: угольные ТЭС являются самым большим техногенным источником вредных выбросов, прежде всего, парниковых газов, основным из которых является углекислый газ. Таким образом весьма актуальной задачей является поиск эффективных технологий снижения выбросов CO₂ в атмосферу.

Для снижения выбросов CO₂ от ТЭС, работающих на традиционном топливе, разрабатываются различные методы, одним из которых является

использование для выработки энергии смеси ископаемого угля и CO₂ — нейтральной растительной биомассы.

Эффективному энергетическому использованию биомассы в последнее время уделяется особое внимание. В пользу этого имеются следующие аргументы [1]:

использование растительной биомассы при условии ее непрерывного восстановления (например, новые лесные посадки после вырубki леса) не приводит к увеличению концентрации CO₂ в атмосфере;

в промышленно развитых странах в последние годы появились излишки обрабатываемой земли, которую целесообразно использовать для производства биомассы (зерна, древесины, соломы и др.). Данная технология в настоящее время находится на финальной стадии разработки.

Среди процессов конверсии биомассы в энергию пиролиз привлекает повышенный интерес из-за преимуществ полученного этим методом биоугля в области хранения, транспортировки и универсальности в применении, поскольку этот продукт может быть использован для получения энергии в двигателях внутреннего сгорания, котлах, турбинах и т.д. Использование в качестве сы-

рья для пиролиза необработанной твердой биомассы зачастую довольно сложно и дорого, что дает импульс развитию исследованиям этого процесса. Следует отметить, что несмотря на длительное применение пиролиза, для переработки ископаемых топлив, применительно к биомассе эта технология все еще находится на ранней стадии развития и необходимо преодолеть ряд технических и экономических трудностей для ее эффективной реализации [2, 3].

Способность вещества к обугливанию (карбонизации, образованию углистого остатка) под действием химических реагентов, высоких температур и активных твердых поверхностей является качественным признаком его принадлежности к классу органических соединений. Она лежит в основе процессов промышленного производства углеродных материалов и зачастую является причиной усложнения условий проведения, технологических схем, аппаратного оформления, механизации и автоматизации многих процессов химической переработки и сжигания горючих ископаемых, биомассы и их производных.

Пиролиз представляет собой термическое разложение биомассы, происходящее в отсутствие кислорода. Более 5500 лет назад в Южной Европе и на Ближнем Востоке пиролиз уже использовали для производства древесного угля [4]. С тех времен область применения процесса заметно расширилась, хотя и в настоящее время его используют для производства древесного угля и кокса.

Технология пиролиза позволяет производить биоуголь (биочар), который можно в высоких соотношениях смешивать с ископаемым углем, вследствие чего в последние десятилетия пиролиз привлекает большое внимание как эффективный метод преобразования биомассы в биотопливо [5]. Конечной целью этой технологии является производство высокоценного биоугля для конкуренции с ископаемым топливом и, в конечном счете, для его замены. Полученный биоуголь может быть с успехом переработан в жидкое топливо для непосредственного использования в транспортных средствах и замены нефтепродуктов (бензина, авиационного керосина и дизельного топлива) [6].

В последние годы биоуголь находит все более широкое применение в аграрной промышленности. Основная его составляющая — это углерод, который накапливался в биомассе, перерабатываемой методом низкотемпературного пиролиза. Самыми важными свойствами биоугля являются:

пористость, способствующая улучшению адсорбционных свойств;

химическая инертность, благодаря которой материал не подвержен деструкции;

стабильность при транспортировании и хранении.

Биоуголь используют как высококачественное комплексное удобрение, которое обеспечивает:

доступ кислорода к корням растений, циркуляцию воздуха и влаги в почве;

вывод из почвы остатков химических веществ, вносимых ранее (гербицидов, пестицидов, других ядохимикатов);

эффективное функционирование в почве микроорганизмов, которые положительно влияют на урожайность;

улучшение состава неплодородных земель (глиноземных, песчаных);

нейтрализацию повышенной кислотности;

сохранение и поддержание питательных веществ и необходимые микроэлементы в почве, устраняет проблему их вымывания.

Регенеративная способность биоугля и его противопаразитные и антибактериальные свойства обеспечивают устойчивый рост спроса на этот продукт в сферах выращивания декоративных растений и тепличной рассады.

Особенности пиролиза биомассы. Пиролиз биомассы — сложный процесс, который состоит из одновременных и последовательных превращений органического материала при его нагреве в инертной атмосфере, в отсутствие воздуха/кислорода. Термическое разложение органических компонентов биомассы начинается в области температур 350–550°C и продолжается до 700–800°C [7, 8]. В условиях пиролиза высокомолекулярные соединения биомассы, содержащие углерод, водород и кислород, превращаются в газы, конденсируемые пары (смола и масло) и твердый углеродсодержащий остаток (“биоуголь”). Скорость и степень разложения каждого из этих компонентов зависят от параметров осуществления процесса (температуры, скорости нагрева, конструкции реактора и т.д.). Совершенно очевидно, что вследствие большого разнообразия видов биомассы, их структуры и состава процесс пиролиза не может быть ограничен только одним реакционным путем.

В зависимости от условий проведения пиролиз можно разделить на три основные группы: медленный (обычный), быстрый и мгновенный (“флеш”) пиролиз. Они различаются по температуре процесса, скорости нагрева, времени проведения реакции, размеру частиц биомассы и т.д.

Таблица 1. Типы пиролиза [9]

Процесс	Условие реакции				Выход, %		
	время, с	скорость нагрева, К/с	размер частиц, мм	T, К	жидкие	уголь	газ
Медленный	450–550	0.1–1	5–50	550–950	30	35	35
Быстрый	0.5–10	10–200	<1	850–1250	50	20	30
Флеш	<0.5	>1000	<0.2	1050–1300	75	12	13

Относительное распределение продуктов зависит от пиролизатипа и пиролиза, как показано в табл. 1.

Медленный и сверхмедленный (карбонизация) процессы пиролиза позволяют получить наибольшее количество твердого остатка (биоугля). Именно медленный пиролиз (при низких температурах и низких скоростях нагрева) использовали в течение тысяч лет для производства угля из древесины. В этом процессе время пребывания в реакторе парогазовой смеси велико, и ее компоненты продолжают реагировать друг с другом, что приводит к образованию твердого углеродного материала (“биоугля”) в качестве основного продукта. Быстрый пиролиз – процесс, направленный на получение большего количества жидких продуктов (до 50–60%). Больше количество бионефти (“пиромасла”) обычно получают из биомассы при низкой температуре, высокой скорости нагрева и короткой длительности процесса.

Основные характеристики быстрого пиролиза – высокая скорость нагрева, очень короткое время пребывания в реакторе, быстрое охлаждение продуктов и тщательный контроль температуры реакции [9].

Флеш-пиролиз биомассы – перспективный процесс для производства бионефти, выход которой может достигать 75%. Этот метод характеризуется быстрым выходом летучих веществ, высокой скоростью нагрева частиц, высокой температурой (выше 1000°C) и очень коротким временем пребывания газа в реакторе (меньше 1 с). Однако флэш-пиролиз имеет и недостатки: полученная бионефть отличается низкой термической стабильностью и коррозионностью, содержит твердые вещества, ее вязкость с течением времени возрастает вследствие каталитического воздействия биоугля и др. [11].

Из всех видов пиролиза медленный пиролиз является наиболее эффективным способом превращения биомассы в биоуголь и наиболее эффективной технологией получения этого вида продуктов. Этот процесс обычно подразделяют на два вида: карбонизацию и обычный пиролиз [11, 12]. Процесс протекает при низких и средних температурах (350–700°C) при длительном времени пребывания, как правило, составляющем от нескольких часов до нескольких дней (в зависимости от размера печи). Свойства полученного биоугля в значительной степени определяются природой сырья, температурой и временем пребывания сырья в зоне реакции.

Наиболее распространенный вид пиролиза – сухая перегонка древесины, то есть разложение древесины при нагревании до 450°C без доступа воздуха с образованием твердого остатка (древесного угля), а также газообразных и жидких продуктов. Сухая перегонка древесины – один из первых процессов химической технологии. Начиная с XI века, этот метод широко использовали в России для выработки сосновой смолы для просмолки деревянных судов и пропитки канатов (“смолокурение”). С развитием металлургии возникло “углежжение” – производство древесного угля. Начало промышленного применения пиролиза древесины относится к XIX веку.

В основе пиролиза древесины лежат свободно-радикальные реакции термодеструкции гемицеллюлоз, целлюлозы и лигнина, протекающие соответственно при 200–260, 240–350 и 250–400°C; соотношение констант скоростей при 320°C составляет 10:1:0.25 [13]. Следует отметить, что кинетические характеристики пиролиза древесины и ее компонентов, найденные разными авторами, заметно различаются. Реакции распада древесины, гемицеллюлоз, целлюлозы и лигнина имеют первый порядок, а энергии активации этих реакций изменяются в значительных пределах; для

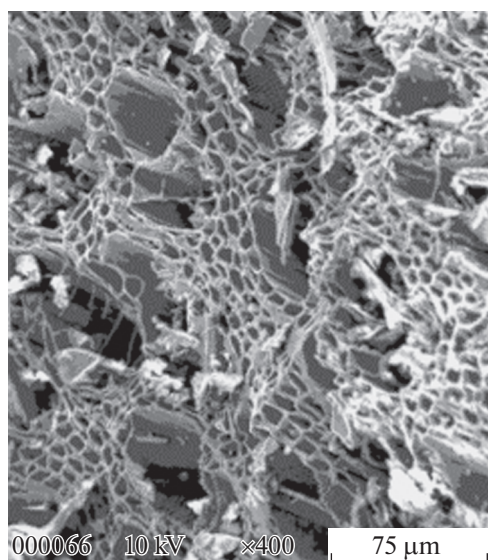


Рис. 1. Микрофотография образца биоугля (увеличение 400).

упомянутых компонентов древесины соответственно 70–80, 135–210 и 55–110 кДж/моль. Константа скорости пиролиза гемицеллюлозы выше, чем целлюлозы, и, например, при 350°C для различных пород находится в диапазоне $(2.8–8.3) \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Пиролиз древесины – экзотермический процесс, при котором выделяется большое количество тепла (1150 кДж/кг).

Для пиролиза древесины в настоящее время обычно применяют древесину лиственных пород (например, березы), реже – хвойных пород. Чем больше размер кусков древесины, взятой для пиролиза, тем крупнее твердый остаток, хотя в результате неравномерной усадки сырья и бурного выделения летучих продуктов происходит растрескивание обугливающегося материала и образуется до 20% мелкого угля с размером частиц менее 12 мм. Пиролиз при 450–550°C позволяет из 1 м³ абсолютно сухой древесины получать: 140–180 кг древесного угля, не содержащего ни серы, ни фосфора и используемого для получения лучших сортов стали, 280–400 кг жидких продуктов – метанола, уксусной кислоты, ацетона, фенолов; 80 кг горючих газов – метана, оксида углерода, водорода [14].

Считается, что при 120–150°C удаляется вода, при 250–270°C частично разлагается целлюлоза, при повышении температуры до 450°C наблюдается распад других веществ древесины с бурным выделением тепла [15]. При 450–550°C происхо-

дит прокалывание образующегося угля и удаление остатка летучих веществ. В действительности указанные стадии пиролиза древесины резко не разграничиваются. Так, на стадии прокалывания угля при более высоких температурах процесс разложения продолжается.

В качестве сырья для получения биоугля процессом пиролиза используют различные углеродсодержащие материалы биологического и антропогенного происхождения:

садовые и уличные отходы, которые могут разлагаться естественным путем (листья, корни, ветки, трава, цветы);

отходы лесной и деревообрабатывающей промышленности (стволы деревьев, ветви кустов, виноградная лоза, кора, луб, опилки, стружка, щепа, древесные волокна);

отходы сельскохозяйственной деятельности (остатки урожая, солома, скорлупа, зерновая пыль, лузга, стебли и листья растений, субстрат для выращивания грибов);

пищевые отходы (остатки еды на кухнях и в заведениях общественного питания, субпродукты пищевой и кондитерской сферы, крахмал, отходы перегонных установок на ликероводочных заводах, зерна, бактерии и пыльца из производства пива, табак, винные осадки, чайная и кофейная гуща, яичная скорлупа);

отходы плодоовощной промышленности (отходы процесса мытья, центрифугирования, мякоть плодов, косточки, обрезки, кожура и шелуха);

субпродукты животного происхождения (кожа, перья, шерсть, кости, экскременты);

текстильные продукты;

бумага, картон, упаковка материалов.

На процесс пиролиза влияют различные факторы [16]:

Влажность. Существует определенный оптимальный уровень этого показателя (15–20%). Повышенная влажность приводит к ухудшению качества угля, большому расходу топлива, увеличению времени оборота реторты, осложнению переработки парогазовых смесей. При очень сухой древесине в реакционном может быстро подняться температура и давление газов, что резко ухудшает условия процесса.

Размер сырья. Теоретически, чем мельче и равномернее измельчено сырье, тем мягче протекает процесс его термического распада. При больших кусках и особенно при наличии кусков разных размеров неизбежно развитие вторичных реакций в периферийной части куска и в реакцион-

ном пространстве. Первые могут доходить до крекинга органических веществ, идущих из глубины куска, на нагретой обуглившейся части его поверхности, вторые определяются разницей между температурой образования продуктов пиролиза и температурой реакционного пространства.

Скорость нагрева оказывает заметное влияние в основном на стадию разложения, протекающую при 260–290°. Интенсивная подача тепла в это время приводит к повышению выхода смолы и снижению выхода биоугля. При медленном нагреве часть смолы коксует на поверхности угля, увеличивая его выход.

Давление в аппарате оказывает большое влияние на ход процесса термического распада. Например, при изменении давления от 200 атм до 5 мм рт. ст. выход (на абсолютно сухую листовенную древесину) угля падает с 34 до 20%. Однако экономический эффект от реализации процесса под давлением или в вакууме не окупает технологические осложнения, возникающие при его организации.

Конечная температура процесса. Содержание углерода в биоугле увеличивается с ростом температуры (от 80 до 90–95%).

В зависимости от вида биомассы и режима процесса пиролиза получают биоуголь различной структуры. На рис. 1 представлена микрофотография образца биоугля, а в табл. 2 – типичные характеристики биоугля.

Оборудование для пиролиза биомассы. Пиролиз биомассы проводят в замкнутых сосудах (“ретортах”) различной конструкции при нагревании, по определению, без доступа воздуха. Технологический процесс состоит из собственно пиролиза и разделения продуктов пиролиза [17]. Реторты принято подразделять на два типа: для периодического и для непрерывного ведения процесса. Для периодического процесса используются реторты самых различных размеров, от 1 кубометра до нескольких сотен кубометров. Реторты для непрерывного процесса требуют меньших затрат труда и обладают более высокой производительностью, при этом, они обеспечивают меньший выход и несколько опаснее в экологическом плане.

Обогрев реторты традиционно производят сжиганием некоторого количества любого топлива. В развитых странах для улучшения экологической ситуации и для экономии энергоносителей используют электрический обогрев. Но для стран с относительно слабой инфраструктурой и/или большим количеством древесного сырья (Бразилия, Россия, Австралия, Аргентина и др.) этот метод остается неэкономичным.

Таблица 2. Типичные характеристики биоугля

Показатель	Значение показателя
Насыпная плотность биоугля, г/см ³	0.27
Насыпная плотность частиц биоугля, г/см ³	0.59
Свободный объем, см ³ /см ³	0.54
Площадь поверхности, м ² /г	325
Объем микропор, см ³ /см ³	0.02
Объем мезопор, см ³ /см ³	0.30
Общий объем пор, см ³ /см ³	0.37
Содержание твердых веществ, см ³ /см ³	0.09
Пропиточная способность, см ³ /см ³	0.38
Содержание летучих соединений, мас. %	18
Содержание углерода, мас. %	75
Содержание золы, мас. %	4
Содержание влаги, мас. %	3
pH	7.1

Применяемые для пиролиза аппараты подразделяют по принципу действия (непрерывного, периодического, полунепрерывного) и по принципу обогрева (аппараты с внутренним и наружным обогревом) [17]. Наибольшее распространение в промышленности получили аппараты полунепрерывного действия, в которые сырье загружают периодически, небольшими порциями через определенные промежутки времени. Отбор парогазовой смеси осуществляют непрерывно, а выгрузку биоугля – периодически, порциями. Тепло подводят к сырью через железные стенки реторт, обогреваемые горячими дымовыми газами (в этом случае тепло к сырью от стенок внутри аппарата передается тепловым потоком) или внутренним обогревом (в этом случае тепло передается к сырью непосредственно от теплоносителя, которым являются горячие топочные газы, принудительно подаваемые внутрь аппарата). При внутреннем обогреве пиролиз биомассы протекает в более мягких условиях, продукты разложения быстрее уносятся током теплоносителя из аппарата и лучше сохраняются от дальнейшего разрушения, однако концентрация продуктов разложения в парогазовой смеси в 7–10 раз меньше чем в аппаратах с наружным обогревом. Это обстоятельство является одним из основных недостатков в их работе.

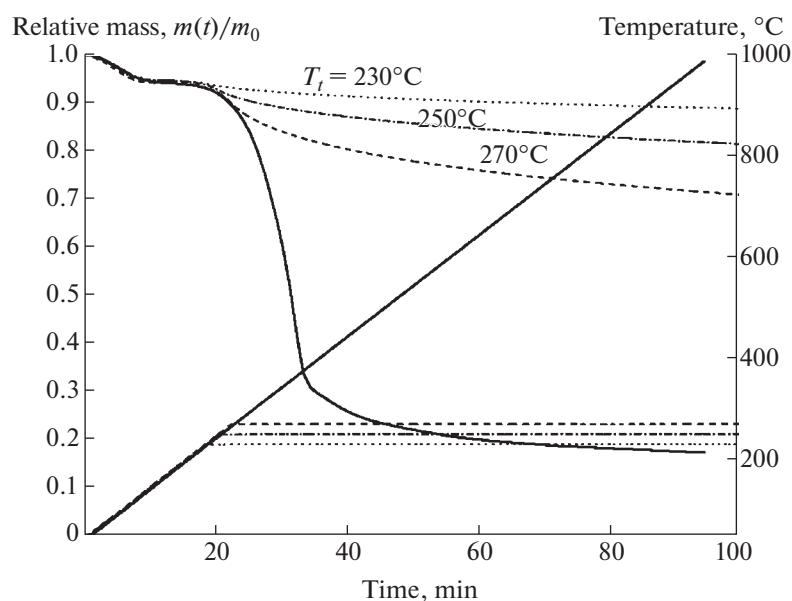


Рис. 2. Относительная потеря массы древесных пеллет в процессе пиролиза и торрефикации [24].

Пиролиз биомассы в вертикальных непрерывно-действующих ретортах является наиболее перспективным способом осуществления этого процесса. Вертикальными ретортами в настоящее время оснащают как старые, так и вновь строящиеся заводы пиролиза. В реторте процесс пиролиза идет непрерывно при периодической загрузке сырья небольшими порциями в верхнюю часть, выгрузке охлажденного биоугля небольшими порциями снизу реторты и непрерывной циркуляцией теплоносителя (обычно топочных газов). Реторта представляет собой цельносварной стальной цилиндр с внутренним диаметром 2.5–3 м и толщиной стенок 15 мм; имеет сверху загрузочное устройство для древесины и внизу конусную часть и выгрузочное устройство для биоугля. Общая высота реторты 25 м.

Торрефикация как способ переработки биомассы.

Разновидностью пиролиза является торрефикация. Торрефикация (от фр. *Torrefaction* – обжарка) – мягкий пиролиз, протекающий в анаэробных условиях при температуре 250–350°C. Процесс был разработан в 1930-х годах во Франции и активно использовался как способ подготовки биотоплива для переработки на газогенераторных установках.

Торрефикация может также использоваться на стадии подготовки исходного сырья перед гранулированием, а также для обработки твердого пел-

летизированного или брикетированного топлива из биомассы.

Торрефикация приводит к улучшению потребительских свойств твердого топлива из биомассы, а именно:

- увеличивает удельную теплоту сгорания;
- придает исходному материалу гидрофобные свойства;
- способствует устранению биологической активности в биомассе.

В процессе торрефикации происходит удаление влаги из исходного сырья, т.е. его сушка, а также частичная термическая деструкция органической составляющей биомассы. В результате образуется твердый гидрофобный продукт (“серый уголь”), удельная теплота сгорания которого превосходит аналогичный показатель для исходного сырья. В частности, в случае использования в качестве исходного сырья древесных отходов в зависимости от условий, при которых проводится торрефикация, удельная теплота сгорания может достигать 19–23 МДж/кг [19]. В то время как аналогичный показатель для сухой древесины и обычных древесных пеллет не превышает 18 МДж/кг.

В результате частичного термического разложения биомассы помимо биоугля образуются летучие продукты, в состав которых входят неконденсирующиеся газы (CO_2 , CO , H_2 , N_2 , газообраз-

ные углеводороды, преимущественно CH_4) и пары пирогенетической воды, различных кислот и смол, при нормальных условиях образующих жидкую фракцию. Состав каждой из фракций и количественное соотношение между ними зависит от типа биомассы, конечной температуры, до которой производится нагрев, и в меньшей степени от скорости нагрева.

На рис. 2 для примера показано влияние температуры торрефакции на скорость разложения древесных пеллет. На том же рисунке приведена ТГА кривая, соответствующая нагреву древесных пеллет до температуры 1000°C , которая дает представление о суммарной массовой доле летучих в обрабатываемом материале. Изменение массы, наблюдаемое на начальной стадии нагрева (ниже 150°C), обусловлено испарением воды и характеризует исходную влажность исследуемого материала. Дальнейшее изменение массы связано с термодеструкцией органической составляющей исходного сырья и, в первую очередь, входящих в его состав гемицеллюлоз.

Теплота сгорания твердого топлива из биомассы, как и любого другого твердого топлива, определяется его влажностью, химическим составом горючей части и массовой долей негорючих примесей. Влажность оказывает существенное влияние на теплоту сгорания, поэтому гигроскопические свойства твердого биотоплива являются его важной характеристикой. Торрефакция, сопровождающаяся распадом органических составляющих биотоплива, приводит к изменению химического состава обрабатываемого сырья. При этом количество кислорода, уходящее в виде CO , CO_2 и H_2O , превышает аналогичные значения для водорода и углерода, что приводит к уменьшению величины отношений O/C и H/C и приближает торрефицированную биомассу к твердым топливам, обладающим более высокими значениями теплоты сгорания. Эта тенденция сохраняется как при увеличении температуры торрефакции, так и времени выдержки.

Ужесточение режимов торрефакции, с одной стороны, приводит к увеличению теплоты сгорания обрабатываемого сырья, а с другой – к уменьшению энергетического выхода в процессе торрефакции, поэтому сделать однозначный выбор в пользу тех или иных режимных параметров процесса, исходя из энергетических соображений, не представляется возможным. Для этого должны быть привлечены дополнительные критерии, определяемые назначением конечного продукта, что и определит приоритет одних свойств над другими.

В процессе торрефакции помимо удаления свободной и связанной воды в зависимости от температуры и времени выдержки наблюдается частичное или полное разложение гемицеллюлоз, обладающих наибольшими гидрофильными свойствами, и частичное разложение целлюлозы и лигнина. В результате дегидратации происходит отщепление гидроксильных групп, что уменьшает вероятность образования водородных связей и тем самым снижает гигроскопичность материала. В ходе химических превращений, происходящих с целлюлозой при нагреве до температур порядка 300°C и сопровождающихся относительно небольшими массовыми потерями, формируются ненасыщенные структуры с неполярными связями, что в итоге приводит к усилению гидрофобных свойств биомассы, а также существенно повышает ее устойчивость по отношению к гниению [20]. Одновременно, в результате термической деструкции исходного материала изменяется его внутренняя структура. При поглощении влаги наблюдается набухание древесины, увеличивающее внутреннюю поверхность капилляров и способствующее дальнейшему поглощению воды. Термическая обработка приводит к образованию поперечных межмолекулярных связей между полимерами, составляющими органическую часть биомассы [21]. В результате материал теряет эластичность и уменьшается возможность его расширения, что в свою очередь снижает способность к поглощению влаги.

При выборе режимных параметров процесса торрефакции (температура и время выдержки) можно ориентироваться на величину массовых потерь исходного сырья в процессе его обработки. Рекомендуется [22], чтобы массовые потери составляли величину порядка 30%. При этом теплота сгорания обработанного сырья увеличивается в среднем не менее, чем на 20%, а равновесная влажность снижается практически вдвое. Достижение величины рекомендуемых массовых потерь может осуществляться либо за счет использования режимов с высокой температурой торрефакции и относительно малыми временами выдержки, либо за счет режимов с низкой температурой торрефакции, требующих относительно большой длительности процесса.

Для практической реализации процесса торрефакции используют разные типы аппаратов [23, 24]. Наиболее распространено применение шнековых реакторов. Сырая биомасса засыпается в торрефикатор через загрузочное устройство и продвигается через реактор с помощью шнекового механизма. Тепло в реактор может подводиться как через стенку (непрямой нагрев), так и за

счет подачи горячего газообразного агента непосредственно в объем реактора. Непрямой нагрев в данном случае позволяет разделять пространство реактора на зоны с различной температурой. Варьируя длину зон и температуру стенок, можно создавать реактор с оптимальным температурно-временным режимом, объединив в одном реакторе процесс сушки и многостадийного пиролиза с различными температурами. В случае использования прямого нагрева газом, когда создать в одном реакторе различные температурные зоны не удастся, также как в случае использования непрямого нагрева, когда не удастся удовлетворить требования к однородности свойств конечного продукта в одном реакторе, возможно применение торрефикационных установок с несколькими последовательно расположенными реакторами шнекового типа. Реакторы шнекового типа позволяют организовать непрерывную подачу биомассы. Они отличаются относительной простотой, однако обладают рядом недостатков, к которым можно отнести плохой теплообмен, невозможность использования сырья с высокой влажностью и низкой насыпной плотностью, а также быстрый износ подвижных деталей конструкции. Все это приводит к ограничениям возможности масштабирования одиночных реакторов шнекового типа. Применение каскадов таких реакторов частично решает эту проблему и позволяет создавать установки с большей производительностью.

Довольно широкое распространение получили также барабанные реакторы. Как следует из названия, основным конструкционным элементом такого типа установок является вращающийся барабан. В него загружается биомасса с влажностью до 10–15%, которая может равномерно прогреваться либо потоком газа, либо от стенки барабана. Биомасса продвигается вдоль оси реактора за счет его небольшого наклона, лопастей на внутренней поверхности барабана или газового потока, подхватывающего падающие с лопастей частицы биомассы. Продолжительность нахождения биомассы в реакторе определяется сочетанием таких параметров как скорость вращения барабана, длина барабана, угол наклона барабана и размер частиц биомассы. Конструкцию торрефикатора барабанного типа можно считать хорошо исследованной и апробированной. Ее отличает относительная простота и надежность. Следует, однако, отметить определенные недостатки, свойственные этой конструкции: трение между стенками барабана и частицами биомассы приводит к их измельчению, конструкция мало пригодна для масштабирования.

Реактор с ленточным транспортером, иногда называемый также осциллирующим ленточным конвейером, является хорошо зарекомендовавшим себя решением для использования в торрефикационных установках. Как правило, лента конвейера перфорирована и горячий газовый теплоноситель, проникая через отверстия в ленте, нагревает биомассу до нужной температуры. Ленты транспортера обычно располагаются одна над другой так, чтобы после прохождения по верхней ленте биомасса пересыпалась на нижнюю, перемешиваясь при этом. Равномерный обдув через отверстия ленты и пересыпание между лентами обуславливают хорошие показатели по однородности свойств конечного продукта. Управляя скоростью транспортера, можно контролировать режим термообработки биомассы. Перфорированная лента, позволяющая, с одной стороны, добиваться равномерности нагрева сырья, с другой стороны, является слабым местом реакторов данного типа, так как отверстия в ней могут забиваться мелкими частицами биомассы. Кроме того, ограниченная пропускная способность по объему в реакторах с ленточным транспортером делает его менее пригодным для материалов с низкой объемной плотностью. По причине того, что управлению поддается только скорость движения транспортера и температура газа на входе в реактор, фактически невозможно управлять температурой в разных зонах реактора.

Реактор с подвижным слоем является конструктивно самым простым типом реакторов, поскольку в нем нет движущихся частей. В реактор (торрефикационную колонну) сверху подается биомасса, которая под действием силы тяжести продвигается в нижнюю часть реактора. Навстречу биомассе поднимается поток горячего газа, который и оказывает прямое тепловое воздействие на нее. Весь объем реактора условно можно разделить на зоны, различающиеся по температуре и процессам, происходящим в них, снизу-вверх: торрефикации, нагрева перед торрефикацией, сушки и нагрева перед сушкой. Реакторы с подвижным слоем характеризуются эффективным теплообменом. Они могут быть использованы для обработки различных видов сырья. Отрицательными свойствами аппаратов являются: низкая газопроницаемость, отсутствие перемешивания, что приводит к возможной неравномерности термообработки, а также трудности с регулировкой температуры по длине реактора.

Каждый из рассмотренных типов реакторов имеет свои преимущества и недостатки, и нельзя, руководствуясь одним лишь общим техническим анализом, отдать предпочтение какому-то одно-

му типу. В каждом конкретном случае в зависимости от вида и состояния исходного сырья, имеющихся энергетических ресурсов и требований к качеству конечного продукта, можно сделать вывод о применимости того или иного решения. Если в рассматриваемом случае возможны несколько вариантов, выбор может быть сделан только на основании экономического анализа.

Данные, имеющиеся в широком доступе, говорят о том, что реакторы всех известных типов были использованы при создании опытных или пилотных установок, однако данных о внедрении и работе установок промышленного масштаба нет. По всей видимости, это связано с экономическими факторами, отсутствием сертифицированных требований на качество и характеристики торрефицированной биомассы и слабым развитием инфраструктуры ее использования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящее время наблюдается переход от традиционной энергетики, используемой для производства энергии ископаемое сырье, к “биоэнергетике”, ориентированной на применение различных видов биомассы. Биоэнергетика несет в себе новые технологии, которые требуют для массового внедрения в энергетический баланс новых видов топлив, серьезной политической и экономической поддержки со стороны государства. Отказ от использования горючих ископаемых – общее направление развития мировой энергетики. В настоящее время происходит повсеместное замещение традиционных технологий получения энергии на производство энергии с использованием возобновляемых источников. Переход от экспорта ископаемых топлив на экспорт электроэнергии, производимой с использованием возобновляемых источников, позволит получить для нашей страны значительные бюджетные преференции.

Биомасса, аккумулирующая в себе солнечную энергию в форме углеводов растительного происхождения, служит исходным сырьем для выработки биотоплива в твердом, жидком и газообразном виде в зависимости от технологии переработки.

Методы получения энергии без использования ископаемого и ядерного топлива получают в настоящее время приоритетное развитие, поскольку с точки зрения экономики и влияния на природное равновесие они являются более выгодными и безопасными по отношению к традиционным энергетическим технологиям.

С другой стороны, уникальные свойства биоугля делают его особенно привлекательным с точки зрения достижения целей устойчивого развития, в соответствии с которыми потребности нынешнего поколения должны быть удовлетворены таким образом, чтобы не наносить вред окружающей среде. Этот подход обуславливает необходимость сокращения эксплуатации природных ресурсов, использования эффективных технологий переработки отходов и разработки новых биоразлагаемых и экологически чистых продуктов, одним из которых и является биоуголь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биоэнергетика: мировой опыт и прогноз развития. Научный аналитический обзор. Москва, 2007. 130 с. Эл. источник: http://biotoprk.ru/files/news/bioenergetica_moskva_2007.pdf
2. *Bridgwater A.V.* Biomass fast pyrolysis // *Therm. Sci.* 2004.V. 8. P. 21.
3. *Downie A.* BEST Pyrolysis Technology: A Solution for the Greenhouse Challenge // *Thermal Net Newsl.* 2007.V. 5. P.5.
4. *Antal M.J., Jr.; Grönli M.* The art, science, and technology of charcoal production // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2003. V. 42. P. 1619.
5. *Demirbas A.* Partly chemical analysis of liquid fraction of flash pyrolysis products from biomass in the presence of sodium carbonate // *Energy Convers. Manag.* 2002. V. 43. P. 1801.
6. *Muradov N.Z., Veziroglu T.N.* “Green” path from fossil-based to hydrogen economy: An overview of carbon-neutral technologies. *Int. J. Hydrog. Energy.* 2008. V. 33 P. 6803.
7. *Yaman S.* Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks // *J. Eng. Convers. and manage.* 2004. V. 45. P. 651.
8. *Fisher T., Hajjaligol M., Waymack B., Kellogg D.* Pyrolysis behaviour and kinetics of biomass derived materials // *J. Appl. Pyrolysis.* 2002. V. 62. P.331.
9. *Balat M., Balat M., Kirtay E., Balat H.* Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 1: Pyrolysis systems // *Energy Conv. Manag.* 2009. V. 50. P. 3147.
10. *Demirbas A., Arin G.* An overview of biomass pyrolysis // *Energy Source. Part A.* 2002. V. 24. P. 471.
11. *Cornelissen T., Yperman Y., Reggers G., Schreurs S., Carleer R.* Flash co-pyrolysis of biomass with polylactic acid. Part 1: Influence on bio-oil yield and heating value // *Fuel.* 2008. V. 87. P. 1034.
12. *Хутская Н.Г., Пальченок Г.И.* Минск: БНТУ, 2014. 53 с.
13. Пиролиз древесины и режимные факторы. Эл. источник: <https://bio.ukrbio.com/ru/articles/2101>

14. Использование биомассы в качестве топлива. Эл. источник: https://studopedia.su/19_23554_ispolzovanie-biomassi-v-kachestve-topliva.html/
15. Лотош В.Е. Переработка отходов природопользования. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2002. 463 с.
16. Теоретические основы пиролиза древесины. Эл. источник: <http://gazogenerator.com/ximicheskaya-texnologiya-drevesiny/teoreticheskie-osnovy-piroliza-drevesiny/>
17. Технология пиролиза древесины. Эл. источник: <http://www.woodtechnology.ru/obrabotka-drevesiny/ximicheskaya-obrabotka-drevesiny/texnologiya-piroliza-drevesiny.html/>
18. Славянский А.К., Шарков В.И., Ливеровский А.А. и др. Химическая технология древесины. Гослесбумиздат: М., 1962. 427 с.
19. Bergman P.C.A. Combined torrefaction and pelletisation – the TOP process / ECN Report, ECN-C–05-0731. 2005. P. 1.
20. Pastorova I., Arisz P.W., Boon J.J. Preservation of D-glucose-oligosaccharides in cellulose chars // Carbohydrate Research. 1993. V. 248. P. 151.
21. Tjeerdsma B. F., Boonstra M., Pizzi A., Tekely P., Militz H. Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement // Holz als Roh- und Werkstoff. 1998. V. 56. P. 149.
22. Peng J.H., Bi X.T., Sokhansanj S., Lim C.J. Torrefaction and densification of different species of softwood residues // Fuel. 2013. V. 111. P. 411.
23. Status overview of torrefaction technologies; IEA Bioenergy Task 32 report; 2012; http://www.ieabcc.nl/publications/IEA_Bioenergy_T32_Torrefaction_review.pdf
24. Torrefaction Reactors; Worason Junsatien, Nitipong Soponpongpipat, Sivapong Phetsong; <http://journal.msu.ac.th/wp-content/uploads/2013/05/12-Torrefaction-Reactors.pdf>