

УДК 662.75

ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ СМЕСЕЙ БИОМАССЫ И НЕФТЯНЫХ ОСТАТКОВ К ГАЗИФИКАЦИИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СИНТЕЗ-ГАЗА

© 2021 г. А. В. Шумовский^{1,*}, Е. Г. Горлов^{1,**}

¹ ООО Институт горючих ископаемых. Научно-технологический центр, 115230 Москва, Россия

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

**e-mail: gorloveg@mail.ru

Поступила в редакцию 24.08.2020 г.

После доработки 02.11.2020 г.

Принята к публикации 03.02.2021 г.

Исучено влияние подготовки сырья (водных суспензий смесей биомассы и нефтяных остатков) к газификации на результаты газификации, составы и свойства образующегося синтез-газа. Показано, что комбинированная механоактивация суспензий/эмульсий сырья нефтяного и растительного происхождения позволяет получать при газификации синтез-газ с высоким соотношением ($H_2:CO = 1.9-2.3$) и низким содержанием сажи. Синтез-газ может быть выделен и использован для каталитической конверсии в ценные органические продукты. Выявлены особенности приготовления гомогенных высокодисперсных суспензий смешением биомассы и нефтяных остатков, в частности, проявление синергетического эффекта при смешении биомассы и нефтяного сырья.

Ключевые слова: *газификация, биомасса, тяжелые нефтяные остатки, механоактивация, микровзрыв, газификация, синтез-газ*

DOI: 10.31857/S0023117721040071

ВВЕДЕНИЕ

Синтез-газ, состоящий в основном из оксида углерода и водорода, уже более 100 лет находит широкое применение в промышленности, в первую очередь в качестве сырья для каталитических синтезов углеводородов (синтетической нефти), метанола, высших спиртов, олефинов и других продуктов, а также как основа энергетического газа. Синтез-газ получают из углеводородного сырья различной природы – угля, природного газа, попутных газов нефтепереработки, тяжелых нефтяных остатков. Последние годы активно развивается направление получения синтез-газа из биомассы, которое весьма актуально для нашей страны, так как только в российском агропромышленном комплексе ежегодно генерируется более 770 млн т растительных отходов [1]. Другим крупнотоннажным видом углеводородсодержащего сырья для газификации могут быть тяжелые остатки от переработки нефти – мазут, гудрон, тяжелый вакуумный газойль.

Технология газификации отличается большой гибкостью в отношении качества используемого сырья – она наиболее пригодна для переработки смешанного сырья различного происхождения, в том числе и низкокалорийного [2]. Разнообраз-

ные модификации процессов газификации широко используются в промышленности для переработки нефтяных остатков.

Анализ литературных данных свидетельствует, что технология газификации активно разрабатывается и для процессов деструктивной переработки биомассы, идея которых – разложение биомассы с получением энергетического газа, биоугля-биоchara, синтез-газа [3–5].

Важная стадия процесса – это подготовка сырья к газификации. Так, биомасса в процессе подготовки к переработке в большинстве случаев предварительно высушивается, а затем измельчается. Высушивание материала тем эффективнее и быстрее, чем сильнее он измельчен, так как нагрев частиц материала ускоряется вследствие увеличения их поверхности и сокращения времени испарения содержащейся в них воды.

Перспективным вариантом технологии газификации нефтяных остатков является вариант газификации сырья в виде водных суспензий, включающий его предварительную подготовку. Газификацией специально подготовленных водных суспензий нефтяных остатков в определенных условиях можно получить газ, содержащий в основном CO и H_2 . Такой газ можно использо-

Таблица 1. Физико-химические свойства мазута (ГОСТ 10585-2013 Топливо нефтяное. Мазут. Технические условия)

Плотность при 15°C, кг/м ³	Фракционный состав, об. %		Условная вязкость при 80°C, °ВУ	Содержание, мас. %			
	н.к. – 360°C	до 450°C		вода	асфальтены	сера	механические примеси
944.6	12.7	36.4	5.78	0.15	6.5	1.0	0.005

Таблица 2. Физико-химические свойства гудрона (ГОСТ 783-53)

Плотность при 20°C, кг/м ³	Вязкость структурная при 100°C, Па·с	Начало кипения, °C	Коксуемость, %	Содержание, мас. %			
				вода	асфальтены	сера	механические примеси
1008.6	510	368	8.6	2.5	6.2	2.2	0.6

Таблица 3. Физико-химические свойства биомассы (ГОСТ Р53357-2013 Топливо твердое минеральное. Технический анализ)

Растительное сырье	Технический анализ, мас. %			Элементный анализ, мас. %				
	W^a	A^d	V^{daf}	C^{daf}	H^{daf}	S^{daf}	N^{daf}	O
Лузга семян подсолнечника	8.1	2.5	60.8	50.3	6.3	0.15	1.8	41.45
Стержни початков кукурузы	6.7	8.1	56.8	48.9	6.65	0.22	1.45	42.78

вать не только как энергетическое топливо, но и в качестве сырьевого ресурса для получения синтетических жидких топлив по методу Фишера-Тропша, а также для получения ценных химических продуктов.

Как правило, образующийся синтез-газ перед дальнейшей переработкой очищают от механических примесей (частиц сажи и золы), смолы, сернистых соединений и диоксида углерода. Исследования, проведенные в работах [6–8], показали, что количество примесей в синтез-газе можно существенно сократить, если в качестве сырья для газификации использовать водные суспензии углеродсодержащих материалов.

Преимуществом газификации сырья в виде водных суспензий является также то, что такая технология позволяет снизить температуру процесса и уменьшить сажеобразование.

В настоящей статье представлены результаты исследований, развивающих направление, которое разрабатывается ее авторами в последние годы: переработка смесей биомассы и тяжелых нефтяных остатков методом газификации с предварительной комбинированной механоактивацией смесей водных суспензий/эмульсий сырья.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Характеристики сырья. Для экспериментов в качестве нефтяных остатков использовали мало-

зольный топочный мазут марки М40 и гудрон, характеристики которых представлены в табл. 1 и 2 соответственно.

В качестве растительного сырья использовались два вида отходов агропромышленного комплекса: лузга семян подсолнечника и стержни початков кукурузы. Такой выбор обусловлен большим объемом ежегодно образующихся именно этих видов отходов, а также тем, что, согласно [9], такие отходы биомассы можно рассматривать как высокорекреационные материалы с большим (до 80%) выходом летучих веществ при их переработке. Характеристики проб биомассы представлены в табл. 3, химический состав ее золы (минеральной части) – в табл. 4.

Сырье для газификации. Предварительную подготовку биомассы проводили следующим образом: сырую биомассу (стержни початков кукурузы и лузгу семян подсолнечника) высушивали, а затем измельчали на щековой мельнице. Полученные материалы загружали в специально разработанный аппарат – измельчитель твердых тел (ИТТ), и подвергали 2–3-кратной обработке (измельчению) для достижения необходимой дисперсности частиц.

Измельченное растительное сырье рассеивали на приборе РОТАП и отбирали фракцию с размером частиц не более 0.2 мм. Гранулометрический состав биомассы класса –0.2 мм после измельчения в ИТТ представлен в табл. 5 и 6.

Таблица 4. Химический состав золы биомассы (ГОСТ 11722-2017. Метод определения химического состава золы)

Состав золы, стержни початков кукурузы/ лузга семян подсолнечника, мас. %									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
70.5	–	–	–	5.8	7.8	–	10.2	5.7	–
74.8	2.8	1.5	–	–	–	–	20.1	0.7	0.1

Ранее [6] для смесей тяжелых нефтяных остатков с активирующими добавками (природными цеолитами и сланцами) были подобраны условия получения суспензий и эмульсий, характеристики которых обеспечивают повышение эффективности процесса их газификации. В частности, установлено, что для существенного уменьшения сажеобразования при сжигании водомазутных топлив необходимо, чтобы в эмульсиях (суспензиях) содержание частиц воды размером 10 мкм составляло не менее 80%, а эффективный размер диспергированных частиц органоминерального активатора – не более 10 мкм. Такие особенности эмульсий приводят к возникновению эффекта микровзрыва.

Приготовление эмульсий нефтяных остатков проводили в специально разработанном аппарате – эмульгаторе. Предварительно мазут или гудрон смешивали с водой в лопастной мешалке. Количество добавляемой воды составляло 10, 20 или 30 мас. % в расчете на сухое вещество сырья. Смешение проводили при 80–90°C.

Конструкция аппарата позволяет использовать два принципа измельчения: удар и истирание одновременно. В начале обработки в большей степени используется удар, на конечной стадии – истирание. Сочетание двух принципов измельчения в одном аппарате позволяет сократить время обработки до достижения требуемой дисперсности материалов и снизить энергозатраты. В табл. 7 и 8 представлены данные по размерам частиц воды в эмульсиях после обработки в эмульгаторе.

Исследования гранулометрического состава частиц воды в эмульсиях проводили на установке, состоящей из оптического микроскопа *OLYMPUS BX-51*, оснащенного системой захвата изображений и снабженного программным комплексом *IMAGESCOPE* для обработки изображений, фиксируемых в проходящем или отраженном свете. Диапазон изме-

рений диаметра частиц составляет от 2 до 200 мкм. Проводили по три параллельных измерения для анализа каждого образца эмульсий “мазут–вода” и “гудрон–вода”.

Согласно данным табл. 7 и 8, увеличение содержания воды в эмульсии от 10 до 30% приводит к сдвигу размеров частиц воды в сторону увеличения содержания частиц размером 5–10 мкм, а, как указано выше, именно частицы воды такого размера способствуют эффекту “микровзрыва” при распыле сырья форсункой, что положительно сказывается на ходе процесса газификации. Анализ данных свидетельствует также о том, что использование мазута в качестве сырья позволяет получить более мелкодисперсную эмульсию, чем гудрон. Следовательно, мазут имеет преимущества с точки зрения эффективности распыления в зоне реакции газификатора и уменьшения сажеобразования.

Принципы технологии получения водных эмульсий гудрона/мазута, отвечающих требованиям к жидкому сырью для газификации, описаны в работах [6–9].

При разработке метода приготовления трехкомпонентных суспензий были проведены опыты, целью которых было выявление оптимального порядка смешения растительной и углеводородной частей композиции.

В частности, в первом варианте смешивали два жидких компонента: водную эмульсию нефтяных остатков и водную суспензию биомассы. В лопастной мешалке в воду загружали навески предварительно измельченных образцов биомассы (размер частиц 0.2 мм), после перемешивания и гомогенизации к полученной суспензии приливали нагретые до 80–90° эмульсии мазута или гудрона, приготовленные в эмульгаторе по описанной методике. Такой вариант смешения представлялся предпочтительным: технологическое

Таблица 5. Гранулометрический состав измельченных тержней початков кукурузы, класс – 0.2 мм (ГОСТ 2093-82. Ситовый метод определения гранулометрического состава)

Содержание частиц, мас. %			
0.2–0.1	0.1–0.063	0.063–0.05	Менее 0.05

Таблица 6. Гранулометрический состав измельченной лузги семян подсолнечника, класс – 0.2 мм (ГОСТ 2093-82. Ситовый метод определения гранулометрического состава)

Содержание, мас. %			
0.2–0.1	0.1–0.063	0.063–0.05	Менее 0.05

Таблица 7. Статистические данные по составу эмульсии “мазут–вода”

Практическое содержание воды, мас. %	Размер частиц воды, мкм		
	минимальный	максимальный	средний
9.6	1.67	11.3	2.19
16.9	1.67	9.07	2.14
30.4	1,67	19.5	2.45

Таблица 8. Статистические данные по составу эмульсии “гудрон–вода”

Практическое содержание воды, мас. %	Размер частиц воды, мкм		
	минимальный	максимальный	средний
9.6	1.79	24.5	2.94
17.6	1.79	29.7	3.93
29.4	1.79	35.0	5.34

оформление схемы смешения двух текучих материалов проще, чем сухого и текучего.

Во втором варианте к нагретым до 80–90°C эмульсиям нефтяных остатков добавляли навески предварительно измельченных образцов биомассы. Образующиеся суспензии подавались в специально разработанный аппарат диспергатор–гомогенизатор [9]. Конструкция аппарата позволяет создавать эффект кавитации, разрушительная сила которой используется для диспергирования и гомогенизации сырья.

Сопоставление вариантов показало, что при порядке смешения компонентов по второму варианту сокращается время достижения требуемой дисперсности частиц биомассы и резко (в 2–5 раз) уменьшаются энергозатраты на работу диспергатора, т.е. в этом случае наблюдается проявление синергетического эффекта при смешении биомассы и нефтяного сырья. Для объяснения этого эффекта были изучены особенности используемых видов биомассы, а также особенности их поведения при смешении с нефтяным сырьем.

Согласно [10], внутренняя структура стержня кукурузного початка (СКП) имеет выраженную поглощающую способность по отношению к нефти и нефтепродуктам и обеспечивает возможность эффективного массопереноса при контакте частиц биомассы и нефтяного сырья. В частности, согласно данным по кинетике поглощения нефти разными частями СКП и целым стержнем [11], максимальные значения нефтеемкости достигаются уже в первые 5–10 мин процесса. Исследования авторов данной статьи подтвердили эту информацию: максимальные значения нефтеемкости при контакте СКП с мазутом достига-

лись через 2–5 мин, а при контакте с гудроном – через 7–15 мин.

Второй вид биомассы (лузга семян подсолнечника-ЛСП) представляет собой одревеневшую растительную ткань, однородную по физической структуре, с большим постоянством химического состава и физико-механических свойств. Специфическая капиллярно-пористая структура ЛСП обуславливает ее высокую сорбционную способность по отношению к гидрофильным и гидрофобным жидкостям: значения нефтеемкости составляют 4.8–5.8 г/г [12]. Указанные особенности структуры используемых видов биомассы дают основания предполагать, что при контакте СКП и ЛСП с тяжелыми нефтяными остатками происходит процесс поглощения мазута и гудрона порами растительных компонентов, способствующий гомогенизации получаемых суспензий, причем скорость этого процесса высокая. Эти предположения подтвердились в ходе исследований авторов настоящей работы: максимальные значения нефтеемкости при контакте ЛСП с мазутом достигались через 8–12 мин, с гудроном – через 15–20 мин.

Вероятно, сравнительно быстрое проникновение углеводородных молекул в структуру биомассы при их смешивании с повышением температуры до 80–90°C приводит к возникновению расклинивающего эффекта, следствием которого является увеличение проницаемости структуры, что в свою очередь способствует ускорению процесса диспергирования – гомогенизации в системе “биомасса–вода–углеводород”. Но при приготовлении водной суспензии биомассы (первый вариант смешения) ее капиллярно-пористая структура поглощает дополнительно молекулы воды, которые препятствуют проникновению углеводородных молекул. Диспергирование и гомогенизация в этом случае требуют большего времени и энергозатрат.

Содержание биомассы в суспензиях изменяли от 55 до 85%, соответственно содержание нефтяных остатков составляло 45–15% (в расчете на сухое вещество). Результаты анализа дисперсности частиц биомассы в водонефтяных эмульсиях после 2–3-кратного пропускания суспензий через диспергатор–гомогенизатор показывают, что комбинированная механоактивация сырья позволяет измельчить большую часть стержней початков кукурузы (60–80% от общей массы загружаемого сырья) до размера частиц менее 60 мкм (преимущественно до 5–20 мкм). Аналогичные данные были получены и при механохимическом диспергировании лузги семян подсолнечника.

Полученные результаты подтверждают закономерности, выявленные ранее в работах [9, 13] по механоактивации суспензий сланцев и тяжелых нефтяных остатков; очевидно, они характер-

Таблица 9. Состав газа, полученного при газификации трехкомпонентных суспензий

Состав суспензии	Состав газа*, об. %					Соотношение H ₂ :CO
	H ₂	CO	CO ₂	N ₂	CH ₄	
Стержни початков кукурузы + мазут + вода	19.9/23.4	11.6/10.3	10.4/8.6	57.5/56.2	0.6/1.5	1.7/2.3
Стержни початков кукурузы + гудрон + вода	16.8/18.9	9.6/8.9	8.9/7.9	64.2/63.4	0.5/0.9	1.75/2.1
Лузга семян подсолнечника + мазут + вода	17.2/17.9	9.8/9.3	11.2/10.6	61.3/61.2	0.5/1.0	1.75/1.9
Лузга семян подсолнечника + гудрон + вода	16.6/18.6	10.2/10.8	10.5/9.9	62.7/62.8	0.5/1.0	1.6/2.1

*Числитель – состав газа, полученного газификацией суспензий без предварительной механоактивации сырья; знаменатель – состав газа, полученного газификацией суспензий, подвергавшихся механоактивации.

ны и для трехкомпонентных смесей “нефтяные отходы – биомасса–вода”.

Газификация трехкомпонентных суспензий. Для прогнозирования изменений при газификации и для подбора температурных режимов были выполнены термогравиметрические исследования процесса термодеструкции биомассы.

При динамическом анализе термодеструкции образца биомассы в среде аргона на приборе МОМ-1500 линейный подъем температуры проводили со скоростью 10 град/мин (+1 град/мин) от комнатной температуры до 800°C. Полученные результаты показали, что на ТГ-кривых можно выделить три температурных интервала, в которых происходит основная потеря массы. В интервале 70–200°C происходит в основном удаление влаги, максимум скорости потери массы (1.35%/мин) при этом приходится на температуру 100°C. Потеря массы составила 8.6%. Максимальная потеря массы происходит в интервале 270–500°C ($\Delta T = 230^\circ$) и составляет 31.5%. Для этого температурного интервала характерно наличие двух максимумов скорости потери массы. Первый максимум скорости, равный 3.5%/мин, соответствует температуре 350°C и обусловлен, вероятно, выделением смолистых веществ; второй максимум скорости, равный 1.5%/мин, при температуре 420°C связан с деструкцией органической массы и образованием газообразных продуктов. При более высоких температурах в интервале 500–700°C ($\Delta T = 280^\circ$) скорость потери массы связана в основном с газообразованием и составляет всего 0.5%/мин. Потеря массы в этом температурном интервале равна ~11%. Общая потеря массы при термообработке до 800°C в инертной среде составила 53.8%.

По степени выгорания в среде воздуха полученного углеродистого остатка были оценены его зольность и зольность исходного сырья:

Характеристика сырья по данным ТГА, %:

Влажность W^a	8.6
Летучие V^a	53.8
Зольность A^a	8.4
Зольность углеродистого остатка (кокса)	43.7

Для газификации суспензий смесей биомассы и тяжелых нефтяных остатков использовали установку непрерывной газификации в псевдоожиженном слое. Газификацию проводили при следующих условиях: температура 800–1200°C; содержание кислорода в дутье 21 об. %; коэффициент избытка воздуха 0.3–0.5; производительность по суспензии 5–10 л/ч.

Состав полученного газа анализировали методом газоадсорбционной хроматографии на хроматографе “Кристаллюкс”. Детектор – катарометр. Газ-носитель – гелий. При этом использовали две хроматографические колонки. Для разделения CO и N₂ применяли колонку, заполненную гранулированными молекулярными ситами СаА (размеры гранул 1.6 · 5.0 мм). Температурный режим – изотермический, температура 90°C. Для разделения CO₂ и CH₄ применяли колонку, заполненную *Haye Sep R* (4.6 м · 3.0 мм). Температурный режим – программированный, 50–220°C, 10°C/мин.

В табл. 9 представлены результаты сравнительного анализа состава синтез-газа, полученного при газификации трехкомпонентных смесей, подвергавшихся и не подвергавшихся механоактивации.

Видно, что предварительная механоактивация обоих видов биомассы и тяжелых нефтяных остатков способствует повышению выхода водорода при газификации и увеличению соотношения H₂:CO в образующемся синтез-газе до 1.9–2.3. Известно, что для использования синтез-газа в качестве сырья процесса Фишера–Тропша величина этого соотношения должна быть не ниже 1.5, а для каталитической конверсии синтез-газа в спирты – не менее 2.0 [14]. Интересно отметить, что эти показатели лучше для стержней початков кукурузы, что, возможно, является проявлением различия химического состава исследуемых видов биомассы: в лузге подсолнечника значительно больше неактивных компонентов золы, кремния и алюминия.

Данные по выходу целевого продукта и сажи (табл. 10, весовой метод определения) также подтверждают значение механоактивации сырья: во

Таблица 10. Выход продуктов при газификации трехкомпонентных суспензий

Состав суспензии	Выход продуктов*, мас. %	
	синтез-газ (H ₂ + CO)	сажа
Стержни початков кукурузы + мазут + вода	34.4/38.7	4.1/1.3
Стержни початков кукурузы + гудрон + вода	32.0/36.7	4.5/1.8
Лузга семян подсолнечника + мазут + вода	32.1/34.8	2.8/0.8
Лузга семян подсолнечника + гудрон + вода	30.9/32.7	2.5/1.5

*Числитель – состав газа, полученного газификацией суспензий без предварительной механоактивации сырья; знаменатель – состав газа, полученного газификацией суспензий, подвергавшихся механоактивации.

всех случаях выход синтез-газа при газификации суспензий, подвергавшихся механоактивации, был выше, а выход сажи – ниже, чем при газификации трехкомпонентных суспензий, не подвергавшихся механоактивации.

Очевидно, это объясняется тем, что, как известно, при газификации углеродсодержащих материалов определяющими являются механизмы термической деструкции частиц сырья, а также кинетика образования и воспламенения образующихся летучих соединений. Скорость образования последних зависит как от температуры и скорости нагрева, так и от степени измельчения частиц. Изменение степени дисперсности и кинетической устойчивости частиц сырья на стадии его подготовки механоактивацией позволяет активировать их реакционную способность, стимулировать процесс автоактивации, что способствует интенсификации процесса газификации.

При механическом воздействии на углеродсодержащие материалы вследствие деформации входящих в их состав макромолекул происходит изменение конформации молекулярных цепей, межатомных и межмолекулярных расстояний [15, 16]. Это сопровождается ослаблением внутри- и межмолекулярных связей и соответствующим увеличением свободной энергии компонентов сырьевых смесей. При измельчении происходят изменения как физических, так и химических свойств, наряду с диспергированием и агрегацией происходят изменения структуры и энергетического состояния поверхностных слоев частиц сырья, оказывающих влияние на взаимодействие частиц между собой и со средой.

Главное условие получения многокомпонентных дисперсных систем с заданными свойствами – это достижение таких параметров механических воздействий, которые обеспечат предельное разрушение структуры на начальных стадиях во всем объеме системы и максимальную однородность распределения фаз в самом начале процесса структурообразования.

При механоактивированном воздействии создаются условия для предельного или близкого к нему снижения вязкости системы, существенно-

го ускорения процессов и контактирования максимального количества твердых и жидких частиц дисперсной фазы с дисперсионной средой. Организация в аппарате для диспергирования суспензий условий вскипания и пузырьковой кавитации приводит к возникновению в объеме сырьевых смесей реакционноспособных радикальных частиц, обладающих высоким окислительным потенциалом. Это обеспечивает не только качество распыла сырья форсункой при газификации, но и существенные изменения химического состава сжигаемых смесей за счет образующихся при диспергировании точечных зон высоких температур и давлений. В образующихся эмульсиях с размером капель воды около 5 мкм, при равномерном распределении их в объеме, вода играет роль инициатора горения или газификации вследствие проявления так называемого явления микровзрыва топливной капли, т.е. дополнительного диспергирования капли водотопливной эмульсии за счет взрывного парообразования и активного реагирования пара с распыленной частицей жидкого топлива. Микровзрыв воды сопровождается чрезвычайно высокими локальными градиентами температур, что обеспечивает ускорение процесса газификации и иницирует вторичное распыливание сырья. Испарение воды при микровзрыве снижает пиковую температуру сгорания и таким образом уменьшает образование NO_x. Улучшение сгорания также снижает выбросы твердых частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований особенностей механоактивации трехкомпонентных смесей “нефтяные остатки–биомасса–вода” подтверждают закономерности, выявленные ранее в работах по механоактивации суспензий сланцев и тяжелых нефтяных остатков, что, очевидно, свидетельствует об их общем характере. Выявлены условия и режимы механоактивации, позволяющие получать газификацией смесей нефтяного и растительного сырья синтез-газ с высоким содержанием водорода. Комбинированная механоактивация суспензий “биомасса–тяжелые нефтяные

остатки–вода” улучшает результаты их газификации: повышает выход синтез-газа в среднем на 10%, а также снижает выход сажи более чем в 2 раза. Соотношение $H_2:CO$ в полученном синтез-газе составляет 1.9–2.3, что позволяет рассматривать его как сырье для каталитической конверсии в ценные органические продукты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. АПК: Справочник. М.: ФГБНУ “Росинформагротех”, 2011. 296 с.
2. Tissen Krupp Industrial Solutions // Технологии удобрений и сингаза <http://www.tkisrus.com/assets/pdf/brochures/ru/TKIS-Gasification-ru.pdf>.
3. *Sikarwar V.S., Ming Zhao, Cloughother P.* // *Energy & Environmental Science*. 2016. V. 9. P. 2939.
4. *Schubert P.J.* System and method for controlling char in biomass reactors. Pat. 8691115 B2 US. 2014. 4 p.
5. Чэнь Илун, Чжан Яньфын, Тан Хунминь. Способ и устройство для непрямой газификации биомассы с использованием водяного пара. Пат. 2528848 РФ// Б.И. 2014. № 26. С. 24.
6. *Ребров А.И., Горлов Е.Г.* // ХТТ. 2011. № 5. С 349. [Solid Fuel Chemistry, 2011. V. 5. P. 349.]
7. *Крылова А.Ю., Горлов Е.Г., Шумовский А.В., Ясьян Ю.П., Нисковская М.Ю.* // ХТТ. М. 2018. № 3. С. 3. [Chemistryand Technology of Fuelsand Oils. 2018. V. 3. P. 3].
8. *Горлов Е.Г., Шумовский А.В., Ясьян Ю.П., Аникушин Б.М., Сваровская Н.А., Нисковская М.Ю.* // ХТТМ. 2018. № 5. С. 3. [Chemistryand Technology of Fuels and Oils. 2018. V. 5. P. 3].
9. *Гуляева Л.А.* Способ получения композиционного топлива и установка для его осуществления. Пат. 2605951 РФ // Б.И. 2017. № 1. 5 с.
10. *Осьмак А.А., Серегин А.А.* // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. № 2 (8). С. 57. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2014_2%288%29_10
11. *Согомонян Т.К., Левчук А.А., Александрова А.В., Ксандопуло С.Ю., Соловьева Ж.П., Авдеев С.Ю.* // Сб. тр. конф. “Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства”. Краснодар: Куб ГТУ, 2013. С. 424.
12. *Левчук А.А.* Разработка способа получения полисахаридного сорбента с улучшенными экологическими характеристиками для ликвидации разливов нефтей и нефтепродуктов Дис. ... канд. техн. наук. Краснодар: Куб ГТУ, 2012. 187 с.
13. *Гуляева Л.А., Виноградова Н.Я., Хавкин В.А., Горлов Е.Г., Шумовский А.В., Битиев Г.В.* // ХТТ. 2016. № 6. С. 11. [Solid Fuel Chemistry, 2016. V. 6. P. 346].
14. *Мордкович В.З., Синева Л.В., Кульчаковская Е.В., Асалиев Е.Ю.* // Катализ в нефтеперерабатывающей промышленности. 2015. Т. 15. № 5. С. 26.
15. Механохимические явления при сверхтонком измельчении. Сб. статей. Новосибирск: Ин-т геологии и геофизики СО АН СССР. 1971. 176 с.
16. *Ходаков Г.С.* // Коллоидный журн. 1988. № 5. С. 684.