

УДК 66.091.3

ГАЗИФИКАЦИЯ СМЕСЕЙ УГЛЯ И БИОМАССЫ

© 2023 г. А. Л. Лapidус^{1,*}, А. В. Шумовский^{2,**}, Е. Г. Горлов^{3,***}

¹ФГБУН Институт органической химии имени Н.Д. Зелинского РАН (ИОХ РАН), 119991 Москва, Россия

²ФГУП Институт горючих ископаемых — научно-технический центр по комплексной переработке твердых горючих ископаемых (ФГУП ИГИ) 119071 Москва, Россия

³ООО Институт горючих ископаемых. Научно-технологический центр, 115230 Москва, Россия

*e-mail: albert@ioc.ac.ru

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

***e-mail: gorloveg@mail.ru

Поступила в редакцию 06.07.2023 г.

После доработки 06.07.2023 г.

Принята к публикации 19.07.2023 г.

Представлены результаты анализа состояния разработок в области газификации смесей угля и биомассы. Показано, что это перспективное направление диверсификации сфер использования угля, а также новая сфера использования возобновляемого природного ресурса — биомассы. Рассмотрены специфические особенности процесса газификации смесей угля и биомассы. Проведено сравнение газификаторов различных типов, выявлены технология и тип газификатора, представляющих особый интерес для процесса получения синтез-газа из смесей угля и биомассы.

Ключевые слова: уголь, биомасса, смеси, газификация, газификатор, химический состав, химизм и кинетика

DOI: 10.31857/S0023117723060051, EDN: BRCKHU

ВВЕДЕНИЕ

Почему предлагается газифицировать смеси именно угля и биомассы, двух столь различных источников углеводородов? Потому что именно они наиболее крупнотоннажные и достаточно легкодоступные.

Что касается биомассы: ежегодно в мире по разным оценкам образуется от 100 до 150 млрд тонн биомассы. Из этого объема лишь около 20 млрд т биомассы используется рационально в виде пищи, строительных материалов, топлива, одежды, кормов для животноводства, для структурирования почв. Часть биомассы утилизируется, но большая часть — а это миллиарды тонн — разлагается, превращаясь в CO₂, CO и H₂O. В России ежегодно образуется не менее 160 млн т отходов растениеводства (солома злаковых культур, лузга семян подсолнечника, зерноотходы, шелуха риса, гречихи, проса, отходы сахарного тростника, костра льна и др.), из которых порядка 80 млн т могут быть использованы в качестве топлива [1].

Что касается угля: он играет важнейшую роль в мировой энергетике, его мировое потребление растет и пока продолжает расти (достигло 8 млрд т в 2022 г.). Но так как уголь при сжигании дает наибольшие из всех традиционных энергоресурсов удельные выбросы CO₂ (ежегодно образуется

около 15 млрд т углекислого газа [2]), он наиболее уязвим на фоне разворачивающейся декарбонизации экономики, поэтому перспективна коренная диверсификация сфер использования угля. Новым (относительно) вектором может стать углехимия, потому что:

1. Спрос на углехимическую продукцию в обозримом будущем продолжит расти [3].

2. Продукты углехимии намного дороже, чем уголь, поэтому очевидны экономические выгоды. По своим характеристикам эти продукты идентичны традиционным нефтехимическим продуктам, которые, как ожидается, будут демонстрировать устойчивый рост, в ряде случаев превышающий темпы роста мирового ВВП (табл. 1).

Для сравнения: в июле 2022 г. полипропилен в России стоил 139 300 руб./т, а уголь — в среднем 6000 руб./т.

Анализ информации последних лет показывает, что одним из популярных, активно развивающихся направлений является совместная переработка угля и биомассы. В основном это процессы сжигания — в первую очередь в энергетических целях — и газификации — и в энергетических целях, и в целях диверсификации продуктовой линейки.

Таблица 1. Прогнозные среднегодовые темпы роста спроса на продукты нефтехимии в мире в 2020–2030 гг. [3]

Продукт	Прогнозный рост спроса в 2020–2030 гг.
Окись пропилена	5.5
Пропилен	4.7
Окись этилена	4.1
Полиэтилен	3.8
Аммиак	0.9
Метанол	3.1
Уголь	От –0.2 до –3.5*
ВВП	3.6

* В зависимости от сценария политики углеродной нейтральности.

Газификация — это экологически чистая высокоэффективная технология, дающая возможность сократить потребление угля как ресурса энергетики и снизить выбросы CO_2 (так как биомасса является углеродно-нейтральным ресурсом). Совместная газификация угля и биомассы перспективна еще и потому, что ее продукты — это экологически чистые синтетические топлива, сырье для органической химии, производства удобрений и пищевой промышленности.

Особенности переработки угля с биомассой. О процессах переработки смесей биомассы и угля в основном публикуются работы исследовательского характера — особенно активны ученые КНР, Индии, т.е. тех регионов, в которых большие объемы сельскохозяйственных отходов могут быть использованы для частичной замены импортируемого угля. Информации о промышленном опыте мало. Поэтому нижеприведенные сведения основываются на анализе публикаций преимущественно научного характера.

Особенности химического состава и структуры. Очевидно, что компоненты смесей угля и биомассы весьма различны по своим свойствам: содержание золы в биомассе, как правило, значительно ниже,

чем у большинства углей, значительно различаются также химический и минеральный составы золы (табл. 2). Например, содержание золы в древесной биомассе колеблется от 0.25 до 1% и зависит от породы дерева: зольность древесины бука составляет 0.57, дуба — 0.53, сосны — 0.39, березы — 0.29, а лиственницы — 0.27% [4].

По сравнению с углем биомассы имеют значительно более высокое содержание примесей — фосфора, калия, кальция (табл. 3). В золе биомассы обычно присутствуют хлориды, сульфаты, фосфаты, силикаты и алюмосиликаты натрия, калия, кальция и магния, а также оксиды кремния и железа. Нерастворимые в воде неорганические соединения уменьшают теплосодержание биомассы.

Угольная зола в основном состоит из SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 . Содержание SiO_2 в золе различных углей изменяется от 40.5 до 50.3%, Al_2O_3 — от 12.9 до 32.4%, Fe_2O_3 — от 5.5 до 17.7% [5, 6]. Содержание магния, щелочей, фосфатов и сульфатов в углях обычно невелико.

Состав растительной биомассы, ее физико-технические характеристики зависят от происхождения. Существенное влияние на процесс газификации оказывают такие характеристики биомассы, как влажность и зольность.

Влага биомассы может быть конденсированной и абсорбированной, причем количество последней зависит от влажности окружающей среды. В древесине и тростнике содержание влаги может достигать 50%. Сельскохозяйственные отходы, такие как солома, содержат 10–12% воды. Влага снижает эффективность и экономичность при использовании растительной биомассы в качестве топлива, также увеличиваются затраты на транспортировку.

Теплота сгорания сельскохозяйственных отходов меняется в узких пределах — от 13.4 до 17.1 МДж/кг, и является довольно высокой. Это — высокореакционное топливо с большим (от 65 до 87%) выходом летучих. Температура размягчения золы составляет около 1300°C (от 1200 до 1400°C).

Таблица 2. Элементный состав древесной золы и растительной биомассы [8]

Вид биомасс	Содержание основных элементов, мас. %		
	фосфор	калий	кальций
Древесина	2.5–3.5	6.0–10.0	30.0–31.0
Разнотравье	2.5–7.0	13.0–40.0	6.0–19.0
Торф	1.0	5.0–14.0	10.0–50.0
Подсолнечник	2.5	36.0–40.0	18.0–19.0
Солома гречихи	2.5	30.0–35.0	18.5
Солома хлебных злаков	4.0–7.0	13.6–16.2	6.0–8.5

Таблица 3. Состав и характеристики сырья [8]

Характеристика	Уголь	Биомасса
Содержание влаги W^r , %	2	2
Зольность A^d , %	14.2	1.1
Выход летучих веществ V^{daf} , %	27	83
Элементный состав, %		
H^{daf}	4.77	8.19
C^{daf}	85.33	50.05
S^{daf}	0.93	0.02
N^{daf}	1.98	0.08
Q^r , МДж/кг	27.8	17.5
Плотность органической массы, кг/м ³	1200	900
Средний размер частиц, мкм	100	100

Необходимо отметить, что древесина по своим различным пространственным осям имеет различные коэффициенты расширения, например сосновая древесина расширяется вдоль волокон в 20 раз больше, чем поперек волокон, поэтому при нагреве до температуры пиролиза в структуре древесины возникают напряжения, приводящие к образованию макро- и микроскопических трещин. За счет этих трещин идет быстрое выравнивание температуры и процесс сушки интенсифицируется благодаря увеличению реакционной поверхности куска древесины. При этом выделяются летучие газы и пары, которые также состоят из углеводородных соединений, окиси углерода, водяного пара, смолы и бензола. Остается твердый остаточный углерод [7].

Особенности стадии подготовки к переработке. Важное значение в технологии совместной переработки биомассы и угля имеет стадия подготовки биомассы, в частности стадия ее измельчения.

Различают мелкое дробление, тонкое и ультратонкое (сверхтонкое) измельчение. Как правило, мелкое дробление проводят в дробилках “сухим” методом, а тонкое и ультратонкое — “сухим” или “мокрым” способами. В большинстве случаев процесс измельчения биомассы проводят в две последовательные стадии: для однолетних растительных материалов используют изрезающие машины (траворезки-соломорезки, машины с дисковыми пилами) с последующим тонким измельчением путем истирания.

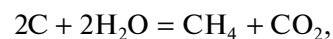
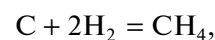
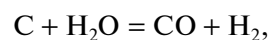
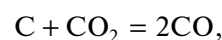
Для мелкого и тонкого измельчения всех видов растительного сырья используют молотковые, вальцовые и дисковые дробилки, дисковые, ножевые, молотковые, шаровые, центробежно-роликовые и пневматические мельницы, мельницы высокого давления и деформационного сдвига и др. Некоторые мельницы используют только

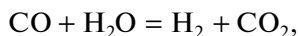
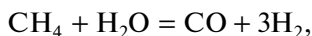
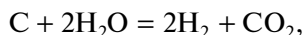
для влажных материалов, другие — только для сухого измельчения (валковые мельницы, криогенные мельницы и молотковые дробилки и др.) Шаровую мельницу используют и для сухих, и для влажных материалов.

Известно, что чем сильнее измельчен материал, тем эффективнее проходит его термообработка, так как при измельчении увеличивается площадь поверхности испарения и уменьшается расстояние, которое требуется пройти воде из глубины частицы материала к ее поверхности, быстрее происходит нагрев частиц. Измельчать легче влажную биомассу, чем сухую (соответственно, энергозатраты меньше), т.к. во время механического воздействия измельчение материала происходит не только за счет собственно воздействия, но и за счет резко возрастающего давления внутриклеточной жидкости, приводящего к разрыву клеток биомассы изнутри.

Однако большинство технологий переработки растительных материалов имеют именно обратную последовательность: сначала биомассу высушивают, потом измельчают. Это объясняется тем, что слипание частиц влажной биомассы в процессе измельчения затрудняет разгрузку измельчающих машин и транспортировку измельченного сырья. Решением проблемы может быть объединение процессов сушки и измельчения сырья в одном устройстве [9].

Химизм и кинетика процесса. Химизм газификации смесей угля и биомассы включает следующие реакции [10]:





$\text{CH}_x\text{O}_y\text{N}_z\text{S}_s + \text{H}_2\text{O} (\text{пар}) = \text{CH}_4 + \text{CO} + \text{H}_2 + \text{H}_2\text{O} (\text{непрореагировавший пар}) + \text{C} (\text{чар}) + \text{зола} + \text{смола}.$

Повышение температуры газификации смесей увеличивает конверсию углерода, что аналогично процессам индивидуальной газификации угля или биомассы. Но кинетические закономерности индивидуальной газификации угля и биомассы не могут быть экстраполированы на кинетику процесса совместной газификации.

Анализ кривых ДТГ указывает на общность процессов, протекающих в углеродных материалах при их нагреве [11]. Кривые ДТГ в идентичных условиях опытов имеют три минимума, первый из которых связан с удалением воды, второй — с выходом и реагированием летучих веществ, третий минимум связан с превращениями высокоуглеродной части твердого топлива. Первая стадия, протекающая в конденсированной фазе с удалением воды, является эндотермической, а вторая и третья стадии — экзотермическими.

При газификации смесей термическое разложение биомассы (древесины) начинается на второй стадии процесса, после подъема температуры до 150°C; в диапазоне температур от 150 до 400°C завершается разложение гемицеллюлозы. С ростом температур от 400 до 570°C происходит разложение целлюлозы и лигнина, третий диапазон температур от 570 до 800°C соответствует интенсивному разложению угля. Увеличение концентрации древесины в смесевом топливе до 50% приводит к снижению максимальной температуры термического разложения до 31.3% по отношению к углю. Достижение полной конверсии при увеличении концентрации древесной компоненты смещается в область более низких температур. Это объясняется увеличением массы летучих веществ (по сравнению с углем) и более низкими температурами начала термического разложения древесины.

Неаддитивность, синергия, влияние щелочных и щелочноземельных металлов, шлакование. В отличие от процесса совместного горения углей одной стадии метаморфизма, в котором все основные стадии процесса подчиняются принципам аддитивности, совместная конверсия угля и биомассы сопровождается неаддитивными эффектами: такие важные характеристики, как состав выделяющихся газов, содержание соединений серы и азота, скорость и полнота превращения, не могут быть интерполированы по результатам, полученным для отдельных компонентов. При горении биомассы и угля принципам аддитивности под-

чиняется только стадия горения летучих веществ биомассы. Стадия горения коксового остатка угля совмещается со стадией горения лигнина, и это влияет на увеличение максимальной скорости изменения массы [12].

В работе [13] в качестве биомассы использовалась казуарина, а в качестве углей — два типа индийских углей, один с зольностью 12%, другой с зольностью 21%. Газификация смесей проводилась с использованием нисходящего потока с неподвижным слоем. Было установлено, что синергия между биомассой и углем уменьшалась с увеличением процентного содержания угля в топливной смеси. Увеличение процентного содержания угля привело также к повышению температуры плавления золы. Добавление пара оказалось полезным для решения проблемы плавления золы за счет уменьшения в температуре слоя.

В другой работе с использованием аналогичного принципа газификации [14] в качестве биомассы использовали японский кедр и уголь с зольностью 1.1%. Размер исходного сырья обоих используемых видов топлива находился в пределах 0.5–1 мм. Температура реакции поддерживалась на уровне 900°C.

Биомасса и уголь подавались в газификатор шнековым питателем сверху. Воздух и пар подавались через верхнюю и боковую форсунки. В газификаторе для удержания шариков из глинозема, которые использовались как катализатор процесса газификации, был установлен перфорированный диск.

По результатам экспериментов было установлено, что с увеличением доли биомассы в топливной смеси содержание H_2 и CO_2 в составе газа увеличивалось, а процентное содержание CO уменьшалось. Основными компонентами синтез-газа были H_2 (41.6–43.3 мол. %), CO (13.3–16.8 мол. %) и CO_2 (41.6–43.3 мол. %). Суммарное содержание CH_4 и твердого углерода было незначительным. Никакого синергизма между углем и биомассой не наблюдалось.

Эксперименты по когазификации угольно-коксовой смеси и виноградных выжимок в потоке с подачей топлива и окислителя (в качестве окислителей использовались пар и воздух) сверху газификатора показали [15], что в диапазоне температур от 750 до 850°C конверсия и качество газа повышаются. Увеличение доли биомассы в топливной смеси приводит к улучшению параметров газификации (улучшается состав продуктового газа и повышается КПД холодного газа). Отмечена синергия между угольным коксом и биомассой, особенно при низких температурах реакции и низком соотношении топливо/воздух. В частности, при температурах 750–850°C существует максимум отношения H_2/CO , которому соответствует минимум соотношения CH_4/H_2 для смеси, содержащей 50% биомассы и 50% каменноуголь-

ного кокса. Наблюдаемая синергия уменьшается по мере увеличения температуры и/или относительного соотношения топливо/воздух.

Хотя синергия, наблюдаемая при 750–850°C, уменьшается с повышением температуры, остаются некоторые признаки взаимодействия углекокса и биомассы при высоких температурах для смесей с высоким (выше 60 мас. %) и низким (10 мас. %) содержанием биомассы.

Процесс согазификации угля и биомассы в работах [16, 17] рассматривается как процесс, состоящий из двух основных стадий: процесс сопирилиза (как основной этап термохимических превращений) и реакция согазификации смешанного угля. При совместной газификации угля и биомассы в некоторых случаях наблюдается значительный синергетический эффект, проявляющийся в образовании избыточного объема газа и уменьшении количества смолистых продуктов [18, 19]. Это может быть следствием миграции щелочных и щелочно-земельных металлов в компонентах сырья, или взаимодействием между летучими и полукоксом [21]. Согласно [22], щелочные/щелочноземельные металлы в сырье для газификации не только являются ключевыми факторами синергетического поведения при совместной газификации, но и демонстрируют тесную взаимосвязь с проблемами шлакообразования, загрязнения и коррозии.

Соединения щелочных металлов являются наиболее важными составляющими золы биомассы, влияющими на процессы шлакования. Во время сгорания биомассы соединения щелочных металлов (KOH, KCl, K₂SO₄, NaCl, Na₂SO₄) испаряются и образуют аэрозоли. Когда температура выходящих газов снижается, аэрозоли конденсируются на частицах летучей золы и стенках реактора с образованием шлаковых отложений. Кроме того, аэрозоли щелочных металлов могут взаимодействовать с другими компонентами золы, например SiO₂ и Fe₂O₃ с образованием эвтектических смесей [23].

Зола от газификации биомассы характеризуется более низкой температурой размягчения (как правило, от 750 до 1000°C) по сравнению с золой от газификации углей (1000°C и более). Изменение температуры размягчения золы фиксируется даже при относительно низких весовых долях биомассы при совместной газификации. Из-за более низкой температуры размягчения золы и изменения химического состава соединений с повышенной склонностью к осаждению, увеличивается скорость отложения (шлакования) на поверхностях нагрева оборудования, что приводит к ухудшению условий процесса и увеличению эксплуатационных затрат. Несмотря на низкую зольность биомассы, ее зола активно разрушает

внутреннюю поверхность оборудования из-за высокого содержания щелочных металлов.

Высокое содержание щелочи (влияющее на температуру размягчения образующейся золы, а следовательно, на проблемы агломерации) ограничивает максимально допустимую температуру газификации [9], поскольку высокая зольность вызывает зашлаковывание, поэтому обычно для производства синтез-газа используется биомасса с низкой зольностью [10].

Влияние соотношений компонентов смесей. Процесс газификации биомассы может быть неустойчивым из-за низкой теплоты сгорания сырья и часто сопровождается образованием больших объемов смолистых продуктов. Добавление угля нивелирует этот эффект, что способствует повышению эффективности переработки. С другой стороны, высокая реакционная способность биомассы способствует стабилизации режимов горения и газификации низкорекционных топлив, таких как угли высокой степени метаморфизма или коксовые остатки нефтепереработки.

Результаты теоретических и экспериментальных работ, представленных в публикациях [24–26], свидетельствуют о том, что при совместной газификации угля и биомассы существуют оптимальные соотношения, при которых реализуется достаточно эффективная конверсия компонентов топливной смеси при незначительном изменении технической эффективности. Выход синтез-газа увеличивается при увеличении содержания биомассы до определенной величины. В работе [27] указано, что оптимальное соотношение биомассы преимущественно колеблется от 10 до 50%, в зависимости от свойств угля и биомассы.

Авторы публикации [15] предполагают, что если в смеси с биомассой содержится небольшое количество угольного кокса, предпочтительно протекают гетерогенные реакции газификации (реакция Белла-Будуара и паровой риформинг), а небольшое количество биомассы в угольно-коксовых смесях может увеличить реакцию гидрогазификации.

Низкое содержания углерода в биомассе позволяет проводить процесс согазификации с меньшим удельным расходом дутья (кислорода и пара), а также получать генераторный газ с повышенным содержанием водорода. Добавление биомассы позволяет снизить потребности процесса в дутьевом водяном паре без потерь эффективности. Так как биомасса обладает большей реакционной способностью, чем уголь, она может инициировать воспламенение частиц угля. С другой стороны, теплотворная способность биомассы, как правило, меньше теплотворной способности угля, поэтому их совместная переработка сопровождается снижением температуры, что может приводить к кинетическим за-

труднениям завершения некоторых химических реакций, в том числе в газовой фазе, что может приводить к снижению качества газа.

Дисперсность компонентов смесей. Важным фактором процесса газификации, влияющим и на ее ход, и на характеристики получаемого газа, является дисперсность частиц смесей. Так, в [13] представлены данные по различным типам промышленных газификаторов углей, топлива, показывающие, что для плотного слоя оптимальный размер частиц 3–30 мм, для кипящего слоя — 1–5 мм, для газификации в потоке — 0.1 мм. Автор работы [28] подтверждает, что размер частиц угля влияет на скорость газификации, однако при размере меньше 2 мм это влияние становится незначительным и поэтому предпочтительно использовать материал с дисперсностью частиц менее данного размера. Однако в исследованиях авторов настоящей работы показано [29–31], что эффективный размер диспергированных частиц сырья должен быть не более 1 мм. Только такие особенности эмульсий приводят к возникновению эффекта микровзрыва в ходе газификации. Микровзрыв воды сопровождается чрезвычайно высокими локальными градиентами температур, что обеспечивает ускорение процесса газификации и инициирует вторичное распыливание сырья. Испарение воды при микровзрыве снижает пиковую температуру сгорания и, таким образом, уменьшает образование NOx. Улучшение сгорания снижает выбросы твердых частиц. Содержание примесей в синтез-газе существенно снижается, 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 упростить технологию, снизить температуру процесса и уменьшить сажеобразование.

Технологические особенности. По данным торговой ассоциации “Совет по газификации и синтез-газовым технологиям” [32], в мире в 2017 г. работало 272 завода по газификации с 686 газификаторами, а 74 завода с 238 газификаторами находились на стадии строительства. Большинство из них в качестве сырья используют уголь. Какая доля из них в настоящее время работает на смесях биомассы и угля, неизвестно. Но очевидно, что интерес к согазификации уже перешел от стадии научных исследований к стадии пилотных и, вероятно, промышленных проектов. Также очевидно, что для их реализации используются существующие газификаторы, в основном трех типов: реакторы с неподвижным (или подвижным) слоем, реакторы с вовлеченным потоком и реакторы с псевдооживленным слоем.

Опыт промышленного применения слоевой газификации (метод Лурги) угля с жидким шла-

коудалением для получения генераторного газа выявил его недостатки:

- потери фракций мелкого угля при подготовке угля к переработке на стадии дробления, обусловленные требованием использования в газогенераторе только классифицированного крупного угля;

- малую скорость процесса газификации, обусловленную низкой удельной поверхностью больших кусков угля;

- образование “прогаров” в слое, нарушающих нормальное протекание процесса реагирования окислителей с органическими компонентами угля;

- образование больших количеств смолы при газификации низкометаморфизованных каменных и бурых углей и отсутствие технических решений по улавливанию смолы из газа газификации;

- необходимость применения для газификации кислорода или воздуха, обогащенного кислородом; повышенные расходы исходного топлива вследствие необходимости проведения процесса при высоких температурах, обеспечивающих жидкое шлакоудаление;

- необходимость включения в технологический процесс газификации двух технологий подготовки угля: порошка для вдувания через фурмы в зону горения и кускового топлива с фиксированным размером кусков.

Указанные недостатки не позволили реализовать на промышленных установках газификацию в стационарном слое с жидким шлакоудалением. Очевидно, что указанные недостатки усугубляются при переработке в газификаторах Лурги смесей угля и биомассы.

Для технологии газификации в кипящем слое отмечены следующие проблемы при промышленной реализации:

- относительно высокие выходы угля мелких классов (менее 5 мм) на стадии подготовки топлива;

- вынос части непрореагировавшего топлива вместе с зольным уносом, что обуславливает необходимость возврата на газификацию значительных количеств этих продуктов;

- осложнение газоочистки синтез-газа вследствие высоких концентраций твердых частиц (до 40–60%) в сыром газе;

- увеличенная металлоемкость, так как для промышленных установок рекомендуется проводить процесс при давлениях выше 4 МПа.

Вероятно, для согазификации на крупных промышленных установках более перспективна переработка угля и биомассы в виде мелкодисперсных водных суспензий — газификация в потоке (Тексако, Доу, Шелл).

Процесс Тексако используется при производстве синтез-газа для химической промышленности. Основное отличие этого процесса от традиционных процессов газификации углей — использование в качестве сырья водоугольной суспензии (ВУС) со средним размером частиц 60 мкм. Однако в связи с реактивностью ВУС приходится либо увеличивать время пребывания частиц в зоне реакции, либо повышать степень конверсии угля, увеличивая давление и используя жидкое шлакоудаление.

ФГУП ИГИ совместно с ЗАО “Компомаш-ТЭК” разработан процесс прямоточно-вихревой газификации с сухим золоудалением [33–35], в котором в качестве сырья используется ультратонкая водоугольная суспензия угля. Для приготовления достаточно стабильной ВУС с концентрацией твердого $\geq 50\%$ из бурого угля используется процесс бертинирования, т.е. придания ему некоторых свойств каменного угля. Бертинирование проводится сушкой угля в вихревой камере до рабочей влажности ≤ 5 мас. % с одновременным выделением части “летучих” веществ (CO , CO_2 и др.), образующихся из органических веществ угля при его сушке, с конечной температурой частиц около 120°C .

Использование смесей биомассы и угля в виде водных суспензий облегчает задачу поддержания оптимальных соотношений компонентов при их подаче на газификацию: очевидно, что проще подавать суспензию, содержащую компоненты в требуемых количествах, чем обеспечивать точность соотношений компонентов в потоке пылевидных и измельченных материалов на входе в газификатор.

Показано [30], что результаты исследований особенностей газификации смесей нефтяных остатков и биомассы подтверждают закономерности, выявленные ранее в работах по подготовке к совместной переработке суспензий сланцев и тяжелых нефтяных остатков, что, очевидно, свидетельствует об их общем характере. Соотношение H_2 : CO в синтез-газе, полученном газификацией смесей нефтяных остатков и биомассы, составляет 1.9 : 2.3, что позволяет использовать его как сырье для каталитической конверсии в ценные органические продукты.

В работе [17] представлены результаты газификации низкосортного топлива (биомассы, угля, шламовой смеси) в реакторе с псевдоожиженным слоем при температуре от 750 до 900°C . Содержание компонентов в образующемся синтез-газе было следующее: H_2 12.1–27.8%, CO 16.9–30.0%, CO_2 2.8–6.8%, CH_4 6.5–12.6%. Низшая теплотворная способность продуктов изменялась в широком диапазоне от 6.143 до 9.204 МДж/м³. Высокие соотношения H_2 : CO в синтез-газе — 3.5 при 600°C и 7.6 при 700°C , были достигнуты при газификации лигнита и угля [18].

Технологические схемы в случае переработки смесей угля и биомассы дополняются блоками приема и подготовки биомассы. Промышленный опыт показал [13, 36], что согазификация углеродсодержащего сырья с существенно различающимися свойствами не только изменяет режимы работы газогенератора (расход окислителя, условия шлакообразования), но и существенно влияет на процессы, связанные с подготовкой образующегося газа к использованию в камере сгорания или реакторе процесса Фишера–Тропша. Как правило, требуется дополнительная очистка, которая связана с потерями тепла генераторного газа, либо контроль (регулирование) состава горючей смеси (разбавление воздухом, азотом, водяным паром и т.д.). Минеральная часть смесей также оказывает влияние на процесс газификации, поскольку зола биомассы может смещать температурные границы шлакообразования и усиливать коррозионные свойства шлака.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совместная переработка таких крупнотоннажных сырьевых ресурсов, как уголь и биомасса, открывает возможности, во-первых, к адаптации угольной сферы к ужесточающейся “климатической политике” — открывается путь применения угля в технологии, снижающей его экологическую опасность, во-вторых, к промышленному использованию биоотходов. Это возможность производства широкой гаммы химических продуктов с высокой добавленной стоимостью, конкурентоспособных с продуктами, получаемыми из нефти и природного газа. Газификация смесей угля и биомассы имеет ряд специфических особенностей — неаддитивность, синергию компонентов, шлакование и т.д., которые необходимо учитывать при разработке технологии.

Экологические исследования согазификации доказали потенциал сокращения выбросов парниковых газов. Важным преимуществом совместной переработки угля с биомассой является то, что ее использование позволяет улучшить экономические показатели процесса переработки смесей (учитывая плату за утилизацию отходов как компенсацию части затрат на переработку).

Недостатками биомасс при совместной газификации с углем являются сезонность рынка биомасс, их переменная, в среднем высокая, влажность, а также необходимость дополнительных стадий очистки и подготовки к переработке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Namsaraev Z.B., Gotovtsev P.M., Komova A.V., Vasilov R.G. Current status and potential of bioenergy in the Russian Federation // *Renew. Sustain. Energ. Rev.* 2018. V. 81.

- Р. 625–634.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.045>
2. Технологии “чистого угля”, улавливание и секвестрация углерода. <https://world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/clean-coal-technologies.aspx>.
3. Углекислотная в России: перспективы развития и риски”. Агентство Argus. https://view.argusmedia.com/FSU-EMD-2021-11-COA-Cons-CoalChemistry_02-Download_SocialMedia.html.
4. Исаева Е.В., Еременко О.Н., Почекотов И.С. // Химия растительного сырья. Красноярск, 2018. 90 с.
5. Пасынкова М.В. Зола углей как субстрат для выращивания растений // Растения и промышленная среда. Сб. 3. 1974. С. 29.
6. Эпштейн С.А., Мейдель И.М., Харахан М.Л. Определение макроэлементов в углях // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). 2015. С. 151. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57514X0062.
7. <https://gazgen.com.ua/primenenie-gazogeneratorov/12/gazifikatsiya-tverdogo-topлива-chast-3>.
8. Донской И.Г. // Теплоэнергетика. 2018. V. 14. P. 14. <https://doi.org/10.14529/power180302>
9. https://ecology-energy.ru/technology/technological_sites/milling-drying/
10. Akash B. Boharapi, Ganesh R. Kale, Omprakash K. Mahadwad. Co-gasification of coal and biomass — the thermodynamic and experimental study // IJRET: Intern. J. Res. Engng Technol. 2015. V. 04. P. 346. <https://doi.org/10.3390/en15124444>
11. Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Орлов В.Н., Тарасов В.А. // Фундаментальные исследования. 2016. № 9–2. С. 227.
12. Жуйков А.В., Землянский Н.А. Анализ взаимосвязи углей разной степени метаморфизма и биомассы при совместном горении. VII Международная научно-практическая конференция “Энергетика и энергосбережение: теория и практика” 7–9 декабря 2022 г.
13. Vijaykumar Hiremath, Tumkur Siddaganga // Intern. J. Engng Res. Technol. (IJERT). 2017. V. 6. P. 285. <https://doi.org/10.17577/IJERTV6IS060059>
14. Kazuhiro Kumabe, Toshiaki Hanaoka, Shinji Fujimoto, Tomoaki Minowa and Kinya Sakanishi // Fuel. 2007. V. 86. P. 684. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.08.026>
15. Juan J. Hernandez, Guadalupe Aranda-Almansa and Clara Serrano // Energy Fuels. 2010. V. 24. P. 2479. <https://doi.org/10.1021/ef901585f>
16. Xiaoming Li, Jingxia He, Mengjie Liu, Jin Bai, Zongqing Bai, Wen Li // Processes. 2022. V. 10 (2). P. 1. <https://doi.org/10.3390/pr10020286>
17. Xu C., Hu. S., Xiang J., Zhang L., Sun L., Shuai C., Chen Q., He L., Edreis E.M.A. // Bioresour. Technol. 2014.V. 154. P. 313. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.11.101>
18. Yang X., Liu X., Li R., Liu C., Qing T., Yue X., Zhang S. // Renew. Energy. 2018. 117. P. 501. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.055>
19. Saw W.L., Pang S. // Fuel. 2013.V. 112. P. 117. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.019>
20. Cabuk B., Duman G., Yanik J., Olgun H. // Intern. J. Hydrog. Energy. 2020. V. 45. P. 3435. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.02.130>
21. Juntao Wei, Miao Wang, Deliang Xu // Fuel Proc. Technol. 2022. V. 235 (11, Pt 2). P. 107376. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107376>
22. Цветков М.В., Подлесный Д.Н., Фрейман В.М., Салганский Е.А., Цветкова Ю.Ю., Зюкин И.В., Зайченко А.Ю., Салганская М.В. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 8. С. 51. <https://doi.org/10.31857/S0207401X20080142>
23. Lindberg D., Backman R., Chartrand P., Hupa M. // Fuel Proc. Technol. 2013. V. 105. P. 129. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.08.008>
24. Long H., Wang T. // Intern. J. Energy Res. 2016. V. 40. № 4. P. 473. <https://doi.org/10.1002/er.3452>
25. De S., Agarwal A.K., Moholkar V.S., Thallada B. // Springer. 2018. P. 524. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-7335-9>
26. Донской И.Г. // ХТТ. 2019. № 2. С. 55. [Solid Fuel Chemistry, 2019, vol. 53, no. 2, p. 113. <https://doi.org/10.3103/s0361521919020046>]. <https://doi.org/10.1134/S002311771902004X>
27. Shahabuddin M., Sankar Bhattacharya // Ren. Energy Sustainab. 2022. P. 179. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88668-0.00002-4>
28. Hanson S. // Fuel. 2002. V. 81. P. 531. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00153-3](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00153-3)
29. Горлов Е.Г., Андриенко В.Г., Шпирт М.Я. // ХТТ. 2019. № 6. С. 29. [Solid Fuel Chemistry, 2019, no. 53, p. 347. <https://doi.org/10.3103/S0361521919060028>]. <https://doi.org/10.1134/S0023117719060021>
30. Шумовский А.В., Горлов Е.Г. // ХТТ. 2021. № 4. С. 59–65. [Solid Fuel Chemistry, 2021, no. 55, p. 260. <https://doi.org/10.3103/S0361521921040078>]. <https://doi.org/10.31857/S0023117721040071>
31. Ребров А.И., Горлов Е.Г. // ХТТ. 2011. № 5. С. 63. [Solid Fuel Chemistry, 2011, no. 5, p. 349].
32. <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=5890>
33. Горлов Е.Г., Андриенко В.Г., Нефёдов К.Б., Луценко С.В., Нефёдов Б.К. // ХТТ. 2009. № 2. С. 37. [Solid Fuel Chemistry, 2009, no. 2, p. 37–42].
34. Комплексная переработка углей и повышение эффективности их использования. Каталог-справочник. М: НТК “Трек”, 2007. 292 с.
35. Трубецкой К.Н., Мусеев В.А., Дегтярев В.В., Мурко В.И. // Уголь. 2004. № 9. С. 41.
36. Sofia D., Llano P.C., Giuliano A., Hernandez M.I., Pena F.G., Barletta D. // Chem. Engng Res. Design. 2014. V. 92. P. 1428. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2013.11.019>