

ОКИСЛИТЕЛЬНАЯ КОНВЕРСИЯ ПРОДУКТОВ ГАЗИФИКАЦИИ ДРЕВЕСИНЫ В РЕАКТОРЕ СМЕШЕНИЯ

© В. М. Кислов¹, С. В. Глазов¹, М. В. Салганская^{1,2},
Е. Н. Пилипенко¹, Ю. Ю. Цветкова¹

¹ Институт проблем химической физики РАН,
142432, Московская обл., г. Черноголовка, пр. Академика Семенова, д. 1

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
факультет фундаментальной физико-химической инженерии,
119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 51

E-mail: vmkislov@icp.ac.ru

Поступила в Редакцию 15 октября 2020 г.

После доработки 29 декабря 2020 г.

Принята к публикации 25 января 2021 г.

Приведены результаты термодинамического расчета и экспериментальные данные конверсии смол газификации древесины в составе пиролизного газа в бессмольный горючий газ методом парциального окисления воздухом. В качестве основного управляющего параметра конверсии использовали расход воздуха, подаваемого в конвертор, выраженный через коэффициент избытка воздуха J . Расчет показал, что в оптимальном режиме конверсии ($J = 0.45$) смолы конвертируются полностью с образованием газообразных продуктов, не уступающих по теплоте сгорания исходным продуктам, а их объем увеличивается примерно в 3 раза. В экспериментах из-за влияния боковых теплопотерь при расходе воздуха, соответствующем коэффициенту $J = 0.45-0.50$, температура конверсии примерно на 400°C ниже, поэтому степень конверсии смолы достигала лишь 80%. Теплота сгорания газообразных продуктов после конверсии на 20–30% ниже, чем у исходных газообразных продуктов газификации, а объем газообразных продуктов конверсии увеличился в 2.5–3 раза.

Ключевые слова: газификация биомассы; пиролизные смолы; окислительная конверсия

DOI: 10.31857/S0044461821030117

Использование твердых топлив органического происхождения в качестве исходного сырья для получения синтез-газа посредством газификации в значительной степени ограничено наличием большого количества пиролизных смол в продуктах газификации [1, 2]. Из-за способности конденсироваться на поверхности контактирующих с ними деталей и узлов оборудования и трубопроводов и увеличивать скорость коррозии их металлических компонентов пиролизные смолы могут приводить к выходу из строя оборудования. Современные химическая промышленность и энергетика предъявляют весьма высокие требования к чистоте используемого горючего газа. Так, например, при использовании горючего газа с целью выработки электроэнергии с помощью газовых двигателей содержание смол

не должно превышать $0.1 \text{ г}\cdot\text{м}^{-3}$, при использовании современных топливных ячеек — 100 ppm, а в синтезе Фишера–Тропша — 1 ppm [3]. Содержание смол в продуктах газификации зависит не только от вида сырья, но и от условий проведения процесса, т. е. от метода газификации [3, 4]. Так, например, для прямой газификации биомассы в плотном слое характерно большое количество пиролизных смол ($30-200 \text{ г}\cdot\text{м}^{-3}$), в то время как обращенный процесс характеризуется относительно низким содержанием смолы ($0.1-6.0 \text{ г}\cdot\text{м}^{-3}$) [3, 5, 6]. Традиционно именно обращенный процесс газификации использовался для получения «бессмольного» горючего газа, однако в большинстве случаев при газификации биомассы содержание смолы оказывается выше $0.3 \text{ г}\cdot\text{м}^{-3}$ [5, 6], поэтому такой газ не может использоваться в газовых

двигателях, для которых, как сказано выше, это значение не должно превышать $0.1 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$.

В основе способов очистки продуктов пиролиза и газификации лежат как физические методы выделения смол, например, с помощью скрубберов и электрофильтров, так и другие способы очистки газообразных продуктов от содержащихся в них смол (химические или термохимические), в том числе с использованием катализаторов [7, 8].

Проведенные ранее исследования по выходу пиролизных смол при газификации древесины в сверхадиабатическом режиме фильтрационного горения показали, что концентрация пиролизных смол может достигать $500 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$ [9]. Очистка такого газа от пиролизных смол — сама по себе сложная задача. Кроме того, при очистке будут накапливаться трудноутилизуемые жидкие токсичные отходы. Содержащиеся в этих отходах вещества не представляют большой ценности как химические продукты, поскольку наряду с широким спектром органических кислот, фенолов и углеводородов содержат значительное количество воды. К тому же теплота сгорания газа после удаления присутствующих в нем углеводородов будет (в зависимости от используемого органического сырья) на 30–65% ниже, чем у исходных продуктов газификации, что является критичной потерей. Следовательно, целесообразным будет либо непосредственное сжигание полученного газа вместе с присутствующими в нем смолами, либо включение дополнительной стадии термохимической конверсии пиролизных смол в синтез-газ.

Термохимическая конверсия продуктов газификации представляется перспективным направлением получения синтез-газа, так как она позволяет не только очищать газ от смол, но и преобразовать их в газообразные продукты, увеличивая объем и сохраняя требуемые свойства образующегося синтез-газа [10]. Наиболее простым и очевидным вариантом термохимической конверсии является парциальное окисление пиролизных смол воздухом или кислородом, которое при недостатке кислорода позволит преобразовать пиролизные смолы в компоненты синтез-газа. Благодаря тепловыделению при парциальном окислении смол дополнительных затрат энергии (за исключением стадии иницирования) для проведения процесса конверсии не требуется. Использование в качестве окислителя кислорода дает ряд преимуществ, однако это существенно удорожает процесс и повышает его опасность [11]. Кроме того, использование кислорода для конверсии аэрозоля, полученного при воздушной газификации, нецелесообразно,

поскольку в нем содержится большое количество балластного компонента (азота).

Среди исследований по конверсии продуктов пиролиза можно отметить работы [12, 13], в которых представлены результаты исследований парциального окисления смолы пиролиза рисовой соломы. Авторы работ отмечают, что наиболее важным управляющим параметром процесса конверсии является количество кислорода, подаваемого в конвертор. Определен оптимальный расход окислителя ($ER = 0.34$), при котором количество смол снижается с исходных 10.15 до 0.26%, а выход газообразных продуктов увеличивается примерно в 2.5 раза.

Ранее нами были проведены исследования конверсии продуктов газификации древесины, торфа, отходов обогащения каменного угля (кека) и горючего сланца методом парциального окисления воздухом в проточном реакторе, заполненном частицами инертной (фарфоровые кольца Рашига) и химически активной (частицы древесного угля, цеолитовый катализатор) пористой засыпки [14]. Для всех указанных видов топлив определены режимы конверсии, при которых теплота сгорания газа, выходящего из конвертора, не ниже теплоты сгорания исходных газообразных компонентов продуктов газификации. Степень конверсии пиролизных смол, определяемая как массовая доля смол, преобразовавшихся в газообразные компоненты в процессе конверсии, составляла 60–80% и незначительно зависела от вида засыпки. Остаточное содержание смол в продуктах конверсии составляло примерно $50 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$.

Цель работы — исследование конверсии аэрозоля, полученного при газификации древесины, в горючий газ в проточном реакторе смешения методом парциального окисления. Предметом изучения являлась зависимость степени конверсии смол термического разложения древесины от количества воздуха, поданного для конверсии.

Экспериментальная часть

Эксперименты проводили на установке, состоящей из цилиндрического кварцевого газификатора периодического действия диаметром 115 мм, в котором осуществляли газификацию древесины в режиме фильтрационного горения со сверхадиабатическим разогревом, и расположенного непосредственно над газификатором проточного смесительного конвертора диаметром 45 мм, в котором проводили окислительную конверсию продуктов газификации древесины (рис. 1).

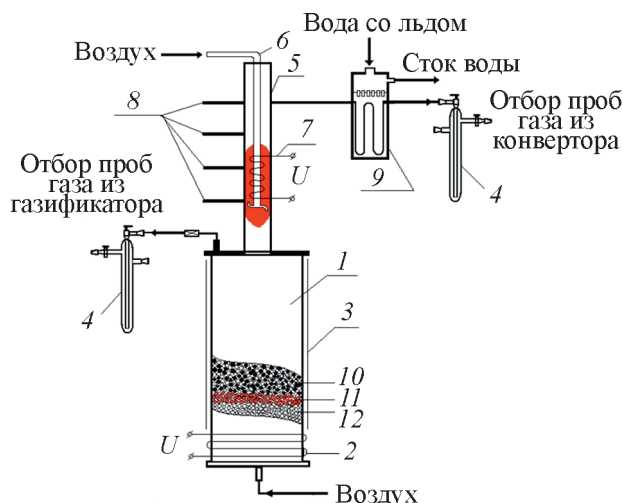


Рис. 1. Схема лабораторной установки для изучения конверсии продуктов газификации.

1 — газификатор, 2 — электроспираль газификатора, 3 — теплоотражающий экран, 4 — пробоотборники, 5 — конвертор, 6 — воздуховод, 7 — электроспираль конвертора, 8 — термопары, 9 — охладитель продуктов конверсии, 10 — исходное топливо, 11 — зона горения, 12 — зольный остаток.

Газификатор 1 снабжен наружной электроспиралью для предварительного прогрева 2, теплоотражающим экраном 3 для снижения боковых теплопотерь. Теплоотражающий экран имел узкие продольные прорезы, что позволяло визуально наблюдать за положением зоны горения и определять скорость горения. Нижний торец газификатора снабжен системой контролируемой подачи воздуха для осуществления газификации, а в верхнем торце кроме центрального вывода продуктов газификации располагался боковой вывод для периодического отбора проб газообразных продуктов в пробоотборники 4.

В газификатор загружали два вида смесей кубиков сосновой древесины и крошки шамотного кирпича ШЛ-1.3 (ГОСТ 5040–96 «Изделия огнеупорные и высокоогнеупорные легковесные теплоизоляционные. Технические условия»). Содержание древесины в смеси в одной из серий экспериментов составляло 50, в другой — 67 мас%. Размер частиц кусочков древесины и крошки шамотного кирпича составлял 5–7 мм, влажность древесины — 7%. Данные составы позволяют получать продукт-газ с достаточно высокой теплотой сгорания и высоким содержанием смол [7], а сам процесс газификации таких составов идет значительно более стабильно, чем газификация составов с большим содержанием древесины. Масса загруженной в газификатор древесины составляла 1 кг, что при удельном расходе воздуха $83.22 \text{ м}^3 \cdot \text{ч} \cdot \text{м}^{-2}$

($0.023 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$) в расчете на пустое сечение реактора обеспечивало длительность стабильной работы установки около 1 ч.

Продуктом воздушной газификации различных смесей древесины и крошки шамотного кирпича являлся горючий аэрозоль, состоящий из газообразных продуктов (смесь N_2 , CO_2 , CO , H_2 , CH_4 и C_2H_4), пиролизных смол и водяного пара (соответственно примерно 0.42 и $0.27 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ древесины). Выходящие продукты газификации попадали в конвертор 5, представляющий собой проточный реактор смешения, где при контролируемой подаче вторичного воздуха через трубку воздуховода 6 происходило парциальное окисление смол, содержащихся в продуктах газификации, и преобразование их в газообразные продукты. Воспламенение смеси аэрозоля с воздухом осуществлялось в начале процесса с помощью электроспирали 7, которую отключали сразу после воспламенения смеси. Конвертор снабжен термопарами 8 для контроля температуры процесса. Спаи термопар располагались на внутренней стенке реактора. Продукты конверсии выводили из верхней части конвертора и после охлаждения направляли на отбор проб газообразных продуктов в пробоотборники 4.

В ходе эксперимента расходы воздуха в газификатор и конвертор контролировали с помощью электронных расходомеров Mass-view MV-306. Показания хромель-алюмелевых термопар поступали на аналого-цифровой преобразователь и затем на компьютер, который отображал текущие показания температуры всех термопар в режиме реального времени. Пробы исходных продуктов газификации и продуктов конверсии отбирали одновременно, а после эксперимента состав отобранных проб анализировали с помощью газового хроматографа Кристалл-5000. Относительная погрешность определения концентраций газов составляла не более 2%.

Определение содержания пиролизных смол как в продуктах газификации, так и в продуктах конверсии непосредственно в процессе эксперимента затруднительно, более того, в ходе эксперимента выход смол может несколько изменяться. Тем не менее среднее количество смол и их общий элементный состав можно определить из материального баланса процесса, составленного на основе полученных экспериментальных данных.

При составлении материального баланса использовали результаты анализа влажности и элементного состава сухой древесины и образующейся из нее смолы, а также данные, полученные в ходе эксперимента: массовая скорость газификации, расходы воздуха в газификатор и конвертор, выход и состав

газообразных компонентов (на каждой из стадий). Считали, что поступающий с воздухом азот в реакциях не участвует.

Схематично материальный баланс газификации выражается следующим образом:

$$A[C_nH_{1.52}O_{0.65}]_{\text{древесина}} + X[H_2O]_{\text{влага}} + B([O_2] + 3.76[N_2])_{\text{воздух1}} = (3.76B[N_2] + [C_dO_eH_f])_{\text{газ1}} + Y[H_2O]_{\text{пар1}} + [C_nH_mO_k]_{\text{смола1}}$$

Схема материального баланса конверсии:

$$(3.76B[N_2] + [C_dO_eH_f])_{\text{газ}} + Y[H_2O]_{\text{пар}} + [C_nH_mO_k]_{\text{смола}} + Z([O_2] + 3.76[N_2])_{\text{воздух2}} = (3.76(B + Z)[N_2] + [C_{d2}O_{e2}H_{f2}])_{\text{газ2}} + Y_2[H_2O]_{\text{пар2}} + [C_{n2}H_{m2}O_{k2}]_{\text{смола2}}$$

Известные расходные характеристики (задаваемые расходы воздуха и измеряемый по длительности установившегося режима газификации расход древесины) позволяют выразить поэлементный баланс углерода, водорода, кислорода и азота, входящих в реактор в виде древесины и воздуха и выходящих из него в виде газообразных продуктов, смолы и воды. Содержание соответствующих компонентов в газообразных продуктах рассчитывали с использованием результатов газового анализа. Суммарный массовый выход жидких продуктов (смолы и воды) определяли по разности исходя из известного их элементного состава.

По оценкам, сделанным в работе [13], расхождение между результатами расчета выхода смол при газификации различных твердых топлив и экспериментальными данными их прямого определения не превышает 10%.

Как и в [12, 13], в данной работе варьировали количество воздуха, подаваемого в конвертор, расход которого выражали в виде безразмерного коэффициента избытка воздуха J ($J = 0$ — исходный аэрозоль, $J = 1$ — полное сгорание всех продуктов газификации).

Методика термодинамического расчета воздушной конверсии продуктов газификации подробно описана в [15]. Исходными данными служил состав аэрозоля продуктов газификации, определенный в работе [14] (объем%): CO_2 — 17.5, CO — 17.5, H_2 — 3.1, N_2 — 61.9, также газообразные продукты содержат $0.45 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ (н. у.) смолы, состав которой описывается брутто-формулой $C_{1.0}H_{1.2}O_{0.3}$, и $0.26 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ (н. у.) водяного пара. Теплота сгорания сухих газообразных продуктов составляет $2.54 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-3}$, смолы — $25.6 \text{ МДж} \cdot \text{кг}^{-1}$.

Обсуждение результатов

Термодинамический расчет равновесного состава и температуры конверсии аэрозоля газификации древесины в адиабатических условиях при различном количестве подаваемого воздуха показывает, что минимальный расход воздуха, достаточный для полной конверсии пиролизных смол в горючий газ (без образования сажи), соответствует коэффициенту $J = 0.45$ (рис. 2). Данные условия являются оптимальными, поскольку при меньших расходах воздуха в продуктах конверсии происходит образование частиц сажи, а при больших расходах — избыточное окисление горючих газообразных компонентов. Так, при увеличении расхода до значений, соответствующих $J = 0.67$, содержание CO снижается с 12.9 до 8.6%, содержание H_2 — с 9.1 до 2.8%, а температура за счет более полного окисления продуктов конверсии увеличивается с 1172 до 1544°C .

В оптимальном режиме процесс конверсии характеризуется следующими показателями: состав газообразных продуктов (объем%): CO_2 — 13.5, CO — 12.9, H_2 — 9.1, N_2 — 53.0, H_2O — 11.5. Теплота сгорания влажных газообразных продуктов — $2.60 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-3}$ (в пересчете на сухие — $2.94 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-3}$), объем газообразных продуктов после конверсии увеличивается примерно в 3 раза.

Типичный средний состав исходных продуктов газификации (до конверсии) для составов с содержанием древесины 50 (аэрозоль А) и 67% (аэрозоль Б) приведен в таблице.

Средний элементный состав пиролизной смолы одинаков для обеих серий экспериментов (мас%):

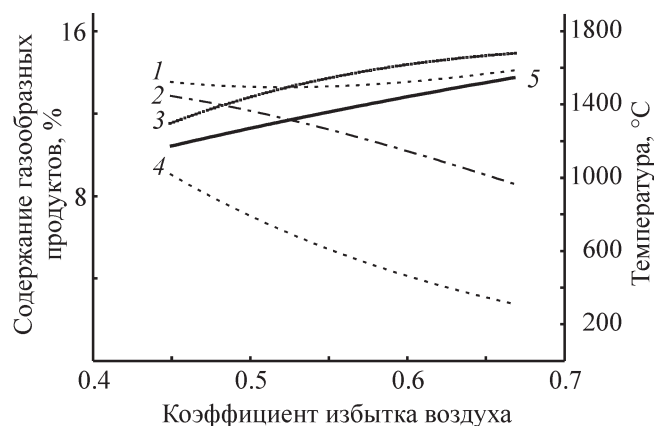


Рис. 2. Термодинамический расчет равновесного состава газообразных продуктов и температуры в зависимости от расхода воздуха на конверсию продуктов газификации древесины.

1 — CO_2 , 2 — CO , 3 — H_2O , 4 — H_2 ; 5 — температура конверсии.

Характеристика исходных продуктов газификации, поступающих на конверсию

Характеристика	Продукты газификации составов с содержанием древесины, %	
	50 (аэрозоль А)	67 (аэрозоль Б)
Содержание газообразных продуктов, об%:		
CO ₂	11.41	10.67
C ₃ H ₆	0.24	0.03
Ar	0.77	0.74
N ₂	58.21	55.51
CO	24.60	27.40
C ₂ H ₄	0.05	0.07
CH ₄	1.19	1.63
H ₂	3.53	3.95
Теплота сгорания газообразных продуктов $Q_{г}$, МДж·м ⁻³	4.14	4.53
Содержание смолы, кг·м ⁻³ газа	0.47	0.46
Содержание воды, кг·м ⁻³ газа	0.31	0.30

[С] — 66.7, [Н] — 6.7, [О] — 26.4, [N] — 0.2. Различие в составе продуктов газификации аэрозолей А и Б связано с различным содержанием крошки шамотного кирпича в газифицируемом материале. Крошка шамотного кирпича является химически инертным компонентом и в реакциях газификации непосредственно не участвует, но, находясь внутри газификатора, участвует в теплообмене на всех стадиях газификации. В зонах сушки и нагрева крошка шамотного кирпича нагревается, охлаждая выходящие из зоны горения горячие продукты газификации, в зоне охлаждения — отдает накопленное тепло, нагревая поступающий в газификатор окислитель. Таким образом, добавка подобного инертного материала играет роль теплоносителя, влияющего на темпе-

ратурный режим и ширину зон газификации, что в свою очередь влияет на состав и выход продуктов газификации [9, 16].

Эксперименты по конверсии аэрозолей А и Б показали результаты, качественно схожие с результатами термодинамических расчетов: с увеличением количества подаваемого воздуха температура конверсии возрастала, а содержание горючих компонентов (СО и Н₂) в продуктах конверсии снижалось (рис. 3). Температуры конверсии при различных расходах воздуха в обеих сериях экспериментов практически одинаковы, состав газообразных продуктов отличался более высоким содержанием СО (примерно на 3 об%) для аэрозоля Б по сравнению с аэрозолем А.

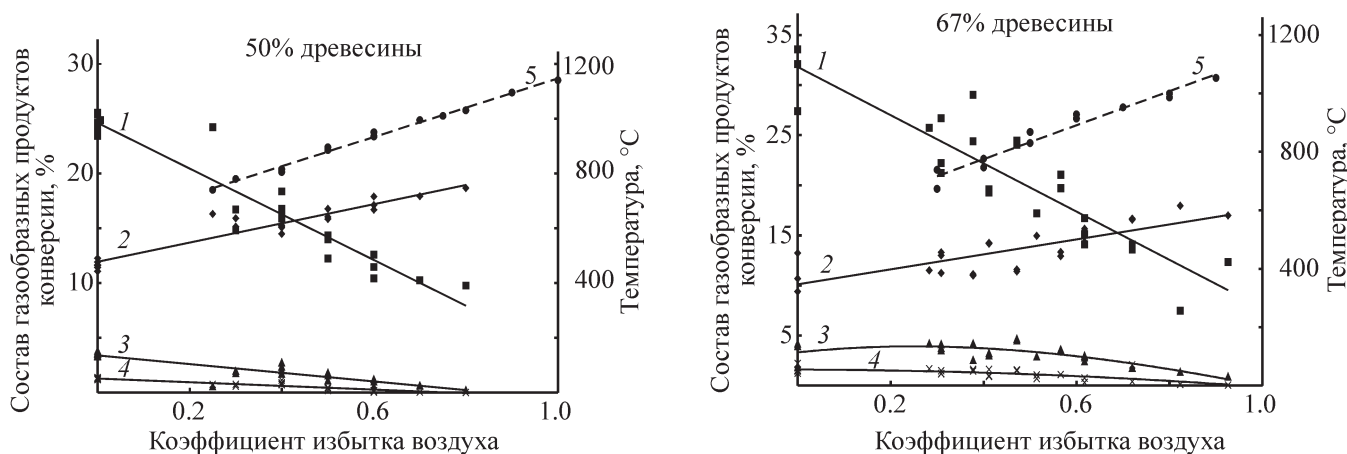


Рис. 3. Состав газообразных продуктов конверсии и температура при различном расходе воздуха на конверсию аэрозолей А (смесь с содержанием древесины 50%) и Б (смесь с содержанием древесины 67%).

1 — CO, 2 — CO₂, 3 — H₂, 4 — CH₄; 5 — температура конверсии.

В целом в проведенных экспериментах содержание CO в продуктах конверсии было несколько выше, а водорода примерно в 2 раза ниже, чем в расчете. Из-за влияния теплопотерь температура конверсии была значительно ниже расчетной: при $J = 0.3$ в эксперименте температура составляла 740°C , тогда как в расчете она равнялась 1016°C , при $J = 0.8$ — соответственно 1030 и 1529°C , а при полном сгорании аэрозоля ($J = 1$) — 1140 и 1768°C соответственно.

Приведенные на рис. 3 данные показывают изменение состава газообразных продуктов конверсии, но не отражают значительное изменение их объема. Для определения выхода продуктов конверсии по усредненным данным материального баланса газификации и конверсии были рассчитаны количества веществ в образующихся в единицу времени продуктах конверсии: CO_2 , CO , H_2 , CH_4 , смолы (в пересчете по среднему составу на условную брутто-формулу $\text{C}_{1.0}\text{H}_{1.2}\text{O}_{0.3}$) и H_2O — при различном расходе воздуха, подаваемого для конверсии аэрозоля Б (рис. 4). Для конверсии продуктов газификации аэрозоля А данные не приведены, так как зависимости имеют аналогичный вид.

При увеличении расхода воздуха в конвертор до величины, соответствующей значению коэффициента $J = 0.5$, основная масса смолы конвертируется в газообразные продукты: CO_2 , CO , H_2 и CH_4 , выход которых значительно увеличивается. При расходе воздуха, соответствующем значению $J = 0.5$, содержание смолы в аэрозоле уже невелико, и ее наличие в продуктах конверсии становится визуально незаметно. При отборе проб смола осаждается тонким

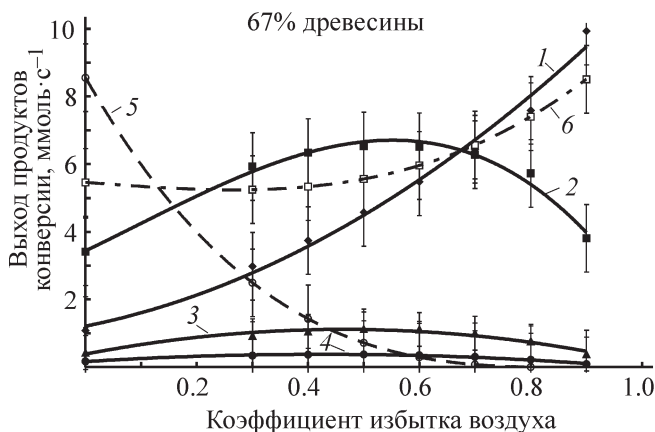


Рис. 4. Количество веществ в продуктах конверсии, образующихся в единицу времени, при различных значениях коэффициента избытка воздуха, подаваемого в конвертор, для аэрозоля Б (смесь с содержанием древесины 67%).

1 — CO_2 , 2 — CO , 3 — H_2 , 4 — CH_4 , 5 — смола, 6 — H_2O .

незаметным слоем на стенках трубок и пробоотборников. Ее наличие становится заметным только по характерному изменению цвета растворителя при промывке пробоотборников перед последующим использованием. По оценкам, сделанным из расчета материального баланса, содержание смол в продуктах конверсии при расходе воздуха, соответствующем значению $J = 0.5$, составляет $15\text{--}30 \text{ г}\cdot\text{м}^{-3}$. При расходах воздуха, соответствующих значениям $J > 0.5$, наряду с окислением смолы также начинается окисление газообразных продуктов. Количества образующихся при пиролизе древесины воды, водорода и метана практически не изменяются до значений $J = 0.7$, при которых водород и метан начинают окисляться. Количество образующейся при этом воды увеличивается.

В отличие от результатов расчетов процесса конверсии, в экспериментах смола полностью превращалась в газообразные продукты только при расходах воздуха в конвертор, соответствующих $J > 0.7$, т. е. вблизи границы полного сгорания продуктов газификации, потому что из-за теплопотерь только при значительном избытке подаваемого воздуха температура конверсии оказывается достаточно высокой, чтобы обеспечить требуемые скорости окисления содержащихся в смоле химических компонентов. Теплота сгорания газообразных продуктов, получаемых при этом из аэрозоля А, составляла $1.2 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-3}$, из аэрозоля Б — $2.0 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-3}$. Достаточно высокая степень конверсии (80%) при относительно высокой теплоте сгорания продуктов ($2.5\text{--}4.0 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-3}$) достигалась при $J = 0.5$ (рис. 5).

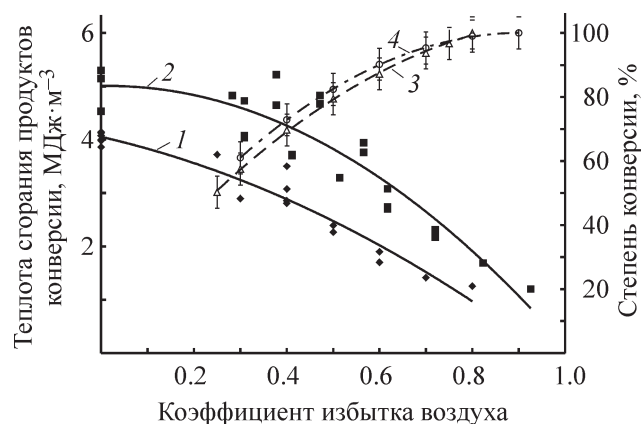


Рис. 5. Зависимости теплоты сгорания газообразных продуктов и степени конверсии смолы от коэффициента избытка воздуха.

Аэрозоль А (продукт газификации смеси с содержанием древесины 50%): 1 — теплота сгорания, 3 — степень конверсии; аэрозоль Б (продукт газификации смеси с содержанием древесины 67%): 2 — теплота сгорания, 4 — степень конверсии.

Выводы

Проведенные расчеты и эксперименты показывают перспективность процесса окислительной конверсии в проточном реакторе смешения для преобразования смол термического разложения, содержащихся в продуктах газификации твердых топлив.

Расчеты показывают, что данный способ позволяет проводить полную конверсию содержащейся в аэрозоле смолы в горючий газ. Процесс может быть проведен за счет тепла, выделяющегося при парциальном окислении смол, введения дополнительных источников энергии для его осуществления не требуется. В оптимальном режиме процесс должен протекать без выделения сажи, теплота сгорания образующихся газообразных продуктов конверсии должна быть как минимум не ниже, чем у газообразной компоненты исходного аэрозоля, а объем газообразных продуктов увеличиваться примерно в 3 раза.

Эксперименты качественно подтверждают расчетные данные, однако вследствие высоких теплопотерь температура конверсии была примерно на 400°C ниже расчетной, поэтому при аналогичных расходах воздуха парциальное окисление пиролизных смол не успевало проходить полностью. В режиме, близком по расчетам к оптимальному, степень конверсии составляла 80%, теплота сгорания газообразных продуктов была на 20–30% ниже, а объем газообразных продуктов увеличился в 2.5–3 раза.

Тем не менее приведенные результаты говорят о том, что при всех ограничениях, связанных с малым масштабом установки и высоким уровнем теплопотерь, данный способ пригоден для конверсии смол в горючие газообразные продукты.

Благодарности

Определение элементного состава пиролизной смолы выполнено сотрудником АЦКП ИПХФ РАН ст. инженером Г. В. Гусевой.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания № 0089-2019-0018, номер государственной регистрации АААА-А19-119-022690098-3.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация о вкладе авторов

С. В. Глазов участвовал в постановке задачи исследования, выполнил термодинамический расчет равновесного состава газообразных продуктов и температуры конверсии продуктов газификации древесины, является основным автором вступительной части, участвовал в написании разделов «Обсуждение результатов» и «Выводы»; В. М. Кислов участвовал в постановке задачи исследования, провел расчет материального баланса процессов газификации древесины и конверсии продуктов газификации в горючий газ, является основным автором раздела «Экспериментальная часть», участвовал в написании разделов «Обсуждение результатов» и «Выводы»; Е. Н. Пилипенко и Ю. Ю. Цветкова проводили поиск и анализ литературных источников; М. В. Салганская проводила анализ газообразных продуктов газификации и конверсии.

Информация об авторах

Кислов Владимир Михайлович, к.ф.-м.н.,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0374-9733>

Глазов Сергей Владимирович, д.ф.-м.н.,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3876-8894>,

Салганская Марина Вячеславовна, к.ф.-м.н.,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2713-4813>

Пилипенко Екатерина Николаевна,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0849-639X>

Цветкова Юлия Юрьевна,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1014-6698>

Список литературы

- [1] *Richardson Y., Blin J., Julbe A.* A short overview on purification and conditioning of syngas produced by biomass gasification: Catalytic strategies, process intensification and new concepts // *Prog. Energy Combust. Sci.* 2012. V. 38. N 6. P. 765–781. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2011.12.001>
- [2] *Shen Y., Yoshikawa K.* Recent progresses in catalytic tar elimination during biomass gasification or pyrolysis — A review // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2013. V. 21. P. 371–392. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.062>
- [3] *Asadullah M.* Biomass gasification gas cleaning for downstream applications: A comparative critical review // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2014. V. 40. P. 118–132. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.132>
- [4] *Донской И.Г.* Численное моделирование и оптимизация режимов газификации древесной биомассы

- в потоке парокислородного дутья // ЖПХ. 2020. Т. 93. № 6. С. 506–514.
<http://dx.doi.org/10.31857/S0044461820040052>
 [Donskoi I. G. Simulation and optimization of wood biomass gasification regimes in a flow of steam-oxygen blast // Russ. J. Appl. Chem. 2020. V. 93. N 4. P. 519–526. <https://doi.org/10.1134/S1070427220040060>].
- [5] Pérez J. F., Melgar A., Benjumea P. N. Effect of operating and design parameters on the gasification/combustion process of waste biomass in fixed bed downdraft reactors: An experimental study // Fuel. 2012. V. 96. N 6. P. 487–496.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.01.064>
- [6] Rios M. L. V., González A. M., Lora E. E. S., del Olmo O. A. A. Reduction of tar generated during biomass gasification: A review // Biomass and Bioenergy. 2018. V. 108. N 1. P. 345–370.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.12.002>
- [7] Heidenreich S., Foscolo P. U. New concepts in biomass gasification // Prog. Energy Combust. Sci. 2015. V. 46. P. 72–95. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2014.06.002>
- [8] Hasler P. H., Nussbaumer T. Gas cleaning for IC engine application from fixed bed biomass gasification // Biomass Bioenergy. 1999. V. 16. N 6. P. 385–395.
[https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(99\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(99)00018-5)
- [9] Кислов В. М., Жолудев А. Ф., Кислов М. Б., Салганский Е. А. Влияние стадии пиролиза на фильтрационное горение твердых органических топлив // ЖПХ. 2019. Т. 92. № 1. С. 61–67.
<https://doi.org/10.1134/S0044461819010080>
 [Kislov V. M., Zholudev A. F., Kislov M. B., Salgansky E. A. Effect of the pyrolysis step on the filtration combustion of solid organic fuels // Russ. J. Appl. Chem. 2019. V. 92. N 1. P. 57–63.
<https://doi.org/10.1134/S1070427219010087>].
- [10] Vershinina K., Shlegel N., Strizhak P. Combustion of wet coal processing waste and coal slime as components of fuel slurries // Combust. Sci. Technol. 2019.
<https://doi.org/10.1080/00102202.2019.1684908>
- [11] de Sales C., Ap V. B., Maya D. M. Y., Lora E. E. S., Jaén R. L., Reyes A. M. M., González A. M., Andrade R. V., Martínez J. D. Experimental study on biomass (eucalyptus spp.) gasification in a twostage downdraft reactor by using mixtures of air, saturated steam and oxygen as gasifying agents // Energy Conversion and Management. 2017. V. 145. P. 314–323.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.101>
- [12] Su Y., Luo Y., Chen Y., Wu W., Zhang Y. Experimental and numerical investigation of tar destruction under partial oxidation environment // Fuel Process. Technol. 2011. V. 92. N 8. P. 1513–1524.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.03.013>
- [13] Wu W. G., Luo Y. H., Chen Y., Su Y., Zhang Y. L., Zhao S. H., Wang Y. Experimental investigation of tar conversion under inert and partial oxidation conditions in a continuous reactor // Energy Fuels. 2011. V. 25. N 6. P. 2721–2729.
<https://doi.org/10.1002/ente.201500159>
- [14] Глазов С. В., Кислов В. М., Размыслов А. В., Салганская М. В. Конверсия продуктов газификации органических топлив в проточном фильтрационном конверторе с насадкой // ЖПХ. 2019. Т. 92. № 7. С. 927–937.
<https://doi.org/10.1134/S0044461819070156>
 [Glazov S. V., Kislov V. M., Razmyslov A. V., Salganskaya M. V. Conversion of products formed in gasification of organic fuels in a flow-through filtration converter with packing // Russ. J. Appl. Chem. 2019. V. 92. N 7. P. 1020–1029.
<https://doi.org/10.1134/S107042721907019X>].
- [15] Salgansky E. A., Kislov V. M., Glazov S. V., Salganskaya M. V. Formation of liquid products at the filtration combustion of solid fuels // J. Combust. 2016. V. 2016. ID 9637082.
<http://dx.doi.org/10.1155/2016/9637082>
- [16] Глазов С. В. Оценка характеристик конверсии продуктов газификации органического топлива в синтез-газ методом парциального окисления // Теорет. основы хим. технологии. 2019. Т. 53. № 3. С. 290–301.
<http://dx.doi.org/10.1134/S0040357119020052>
 [Glazov S. V. Estimation of the characteristics of the partial oxidation conversion of organic fuel gasification products to a synthesis gas // Theor. Found. Chem. Eng. 2019. V. 53. N 3. P. 378–388.
<https://doi.org/10.1134/S0040579519020052>].