

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ
И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 661.961

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЖИМОВ ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ
КОНВЕРСИИ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА ДРЕВЕСИНЫ
С ПОЛУЧЕНИЕМ ВОДОРОДА И СИНТЕЗ-ГАЗА

© 2022 г. М. В. Цветков^{1, 2*}, В. М. Кислов¹, Ю. Ю. Цветкова¹, А. Ю. Зайченко¹,
Д. Н. Подлесный¹, И. В. Седов¹, Е. А. Салганский¹

¹Институт проблем химической физики Российской академии наук, Черноголовка, Россия

²Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия

*E-mail: tsvetkov@icp.ac.ru

Поступила в редакцию 08.11.2021;

после доработки 16.12.2021;

принята в печать 20.12.2021

Проведена термодинамическая оценка режимов окислительной конверсии продуктов пиролиза древесины с получением водорода и синтез-газа. Исследованы режимы воздушной, кислородной и паровоздушной конверсии продуктов пиролиза древесины. В случае воздушной конверсии с увеличением коэффициента избытка топлива (ϕ) концентрация водорода логарифмически растет и достигает 29 об.% при $\phi = 10$ и $T = 1000$ К, однако уже при $\phi = 3$ в продуктах появляется конденсированный углерод. Увеличение температуры до 1300 К незначительно повышает выход водорода: до 33 об.% при $\phi = 10$, и при этой температуре сажеобразование начинается при $\phi = 5$. Добавление паров воды приводит к увеличению содержания водорода в продуктах, а сажеобразование в этом случае начинается при $\phi = 9$. Кислородная конверсия позволяет увеличить концентрации водорода и монооксида углерода в продуктах до 42.1 и 45.5 об.%, соответственно, вследствие отсутствия разбавления их азотом. Образование конденсированного углерода не является недостатком процесса, недостатком процесса, поскольку он (углерод) может рассматриваться как целевой продукт; при этом снижается количество выбросов диоксида углерода.

Ключевые слова: древесная смола, конверсия, синтез-газ, водород, термодинамика.

DOI: 10.31857/S0207401X22080143

ВВЕДЕНИЕ

Экономическое развитие современного общества невозможно без обеспечения соответствующего уровня (и объема) вырабатываемой энергии. Практикуемое использование ископаемых источников в качестве основы энергетики в настоящее время не полностью отвечает современным требованиям человечества к энергоэффективности и экологичности топливно-энергетического комплекса. Ограниченность ресурсов, снижение их качества и экологические проблемы, связанные с их добычей и переработкой, а также выбросы вредных веществ, образующихся при их сжигании, стимулируют поиск новых, экологически чистых источников энергии [1, 2].

Современной тенденцией в развитии технологической оснащенности общества является переход к низкоуглеродной энергетике и использованию углеродно-нейтральных видов топлив. Одно из таких топлив — газообразный водород, что обусловлено присущим ему рядом преимуществ,

главные из которых — экологическая чистота и высокий уровень энергии в единице массы [3–5].

В отличие от природного газа запасов молекулярного водорода в природе не существует, поэтому для его получения используют различное сырье и методы. В основу одной из классификаций способов получения водорода главным критерием положена его углеродная нейтральность: чем больше оксидов углерода выделяется при производстве водорода, тем менее экологичным будет считаться такой способ получения [6]. Степень углеродной нейтральности каждого способа получения водорода обозначается цветом [7].

Наиболее экологически чистым является процесс получения “зеленого” водорода, осуществляемый с помощью электролиза воды, с использованием энергии, получаемой из возобновляемых источников, таких как ветер, солнечная или гидроэнергия. При таком способе производства водорода выбросы CO_2 минимальны, однако он является самым дорогостоящим [8, 9], поэтому его масштабы в настоящее время невелики. Не-

сколько более дешевым, но менее экологичным является процесс получения “желтого” (“оранжевого”) водорода путем электролиза воды с использованием электроэнергии, полученной на атомных электростанциях. Выбросы CO_2 при осуществлении этого процесса также минимальны, но получение энергии на АЭС потенциально связано с другими типами экологических загрязнений [10–13].

На данный момент большая часть водорода производится из ископаемых источников энергии. Основная его часть (до 90%) относится к так называемому “серому” водороду, получаемому путем каталитической (в основном паровой и парокислородной) конверсии природного газа (метана), проводимой в две стадии, на первой из которых в качестве промежуточного продукта получается синтез-газ (он также используется в качестве полупродукта в некоторых нефтехимических производствах); вторая стадия заключается в проведении реакции дальнейшей паровой конверсии одного из компонентов синтез-газа — CO , что позволяет получить дополнительное количество водорода [14, 15]. Данный способ требует меньших внешних энергозатрат, чем производство “зеленого” водорода, однако в ходе химической реакции выделяется углекислый газ, причем в том же объеме, что и при сгорании природного газа (расходуется также энергия на конверсию), поэтому “серый” водород тоже не может считаться экологически чистым [16, 17]. Если при конверсии осуществляется улавливание и захоронение образующегося CO_2 (технологии Carbon Capture, Utilization and Storage), то удается достичь примерно двукратного сокращения вредных углеродных выбросов. Получаемый таким образом “голубой” водород может считаться более экологически чистым, чем “серый”, но его производство является весьма дорогостоящим [8, 9, 14, 18]. Разрабатываются и другие способы получения “чистого” водорода, например такие, как термokatалитический и плазменный пиролиз метана с получением “бирюзового” водорода и твердого углерода, а также способы, основанные на реакции металлов (алюминий, магний) с водяным паром [1, 19–22].

Самым дешевым, но наименее экологичным способом получения водорода является газификация каменного (бурого) угля [23–25]. Полученный таким способом водород называют “коричневым” (“бурый”). Степень углеродной нейтральности этого способа можно повысить, если вместо угля газифицировать биомассу. Биомассу относят к возобновляемым и углеродно-нейтральным топливам, так как ежегодно происходит увеличение объема биомассы, а рост последней сопровождается поглощением CO_2 из воздуха [26–28].

Общим недостатком процессов газификации возобновляемых топлив является наличие в получаемых продуктах, помимо углекислого газа, монооксида углерода, водорода, метана, этилена и других газообразных веществ, а также некоторого количества смол, образующихся при термическом разложении топлив [29]. Требования, предъявляемые к содержанию смол в используемых в современной промышленности газообразных топливах и синтез-газе, весьма высоки. Например, для выработки электроэнергии с помощью современных газовых двигателей содержание смол должно быть не более 100 мг/м^3 , для топливных ячеек — менее 100 ppm, а для осуществления синтеза Фишера–Тропша (каталитический процесс, используемый для получения жидких углеводородов) — менее 1 ppm [30, 31].

Ни один из существующих методов газификации биомассы не позволяет гарантировать необходимых пределов содержания смол в получаемых газообразных продуктах, поэтому перед их использованием необходима дополнительная очистка от пиролизных смол. Одним из перспективных методов очистки на данный момент является термохимическая конверсия смол в синтез-газ, так как она позволяет не только очищать газ от смол, но и преобразовывать их в дополнительное количество синтез-газа. Наиболее простым вариантом термохимической конверсии является парциальное окисление пиролизных смол, которое при использовании нестехиометрических (недостаточных) количеств окислителя позволяет преобразовать пиролизные смолы в компоненты синтез-газа. Очевидное преимущество данного способа конверсии — возможность за счет тепловыделения при парциальном окислении смол провести процесс без дополнительных затрат энергии. Сочетание методов газификации биомассы с последующей окислительной конверсией продуктов пиролиза предложено и экспериментально исследовано в работе [32]. Показано, что можно получить газообразные продукты газификации древесины практически без содержания жидких продуктов пиролиза.

Цель настоящей работы — термодинамическая оценка оптимальных условий получения водорода и синтез-газа при окислительной конверсии продуктов пиролиза древесины при атмосферном давлении.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Для исследования многокомпонентных химических систем используются расчеты на основе моделей термодинамического равновесия, которые подробно описаны в литературе [33, 34]. Как правило, применяются два подхода для расчета параметров термодинамического равновесия изолированных многокомпонентных систем: по-

иск минимума свободной энергии Гиббса [35, 36] или решение задачи установления состояния системы, характеризующегося максимальной энтропией. Оба эти подхода являются равнозначными.

Для определения оптимальных условий получения газообразных продуктов с максимальным содержанием водорода проведен термодинамический расчет характеристик процесса конверсии продуктов пиролиза древесины с помощью программного комплекса TERRA [34] при различной температуре. Рассчитывали систему, состоящую из продуктов пиролиза древесины (брутто-формула $C_1H_{1.48}O_{0.58}$, взятая из [37]), азота и кислорода, варьируя содержания водяного пара ($[H_2O] = 0$ и 10 об.%) и кислорода в смеси с азотом ($[O_2] = 21$ и 100 об.%). Коэффициент избытка топлива (φ), равный отношению количества кислорода, необходимого для полного окисления пиролизной смолы, к подаваемому количеству кислорода, изменяли в диапазоне от 2 до 10. Богатые топливные смеси имеют коэффициент избытка топлива больше единицы, а при $\varphi = 1$ происходит полное окисление продуктов пиролиза древесины до углекислого газа и воды. В расчетах задавали давление, равное атмосферному (0.1 МПа). Для заданного состава смеси в результате расчетов получали равновесный состав продуктов при определенной температуре. Температуру снизу ограничивали значением в 1000 К, так как при низких значениях температуры скорости химических реакций снижаются и термодинамическое равновесие будет достигаться за большее время [38–40].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Конверсия продуктов пиролиза древесины с воздухом

Рассмотрим случай окислительной конверсии продуктов пиролиза древесины с воздухом. В общем случае продукты газификации древесины содержат как газообразные вещества, так и продукты ее пиролиза. В работе [37] показано, что выход продуктов пиролиза при газификации древесины составляет до 66 мас.%, включая воду, поэтому рассчитываем характеристики процесса конверсии только продуктов пиролиза древесины.

На рис. 1а представлены зависимости мольного содержания продуктов конверсии от коэффициента избытка топлива φ при значении температуры в конверторе 1000 К. Увеличение коэффициента избытка топлива от 2 до 4 приводит к росту концентрации монооксида углерода с 15 до 28 об.%. При дальнейшем увеличении значения φ концентрация СО плавно снижается. Концентрация водорода растет с увеличением φ и достигает 29 об.% при $\varphi = 10$. Содержание паров воды и диоксида углерода снижается с ростом φ до 4 и далее

Таблица 1. Концентрации основных веществ конверсии продуктов пиролиза древесины без воздуха при 1300 К

$[H_2O]$, моль.%	$[H_2]$, моль.%	$[CO]$, моль.%	$[C_{(c)}]$, моль.%
0	42.1	33.1	24.3
10	46.7	38.5	14.3

выходит на постоянный уровень. При $\varphi > 3$ в продуктах появляется конденсированный углерод ($C_{(c)}$). В одном кубическом метре продуктов конверсии может содержаться примерно 500 г конденсированного углерода при $\varphi = 10$. С учетом того, что древесина считается углеродно-нейтральным топливом, режимы конверсии продуктов ее пиролиза с получением конденсированного углерода можно условно считать процессами, приводящими к изъятию CO_2 из общего углеродного цикла (при условии выделения и использования или захоронения углерода).

На рис. 1б представлены зависимости мольного содержания продуктов конверсии от коэффициента избытка топлива φ при значении температуры в конверторе 1300 К. Рост температуры приводит к увеличению содержания СО и водорода и снижению содержания диоксида углерода и паров воды в продуктах конверсии. Увеличение значения φ от 2 до 5 приводит к росту концентрации монооксида углерода с 22 до 38 об.%. При дальнейшем увеличении φ концентрация СО немного снижается. Концентрация водорода растет с увеличением φ и достигает 33 об.% при $\varphi = 10$. Содержание паров воды и диоксида углерода снижается до нуля с ростом значения φ до 5. При $\varphi > 5$ в продуктах появляется конденсированный углерод. При увеличении температуры конверсии режимы с образованием конденсированного углерода наблюдаются в области значений φ , соответствующих более богатым смесям.

Если проводить конверсию продуктов пиролиза древесины при температуре 1300 К без добавления воздуха, то максимальное содержание водорода, СО и конденсированного углерода в продуктах составит соответственно 42.1, 33.1 и 24.3 об.% (табл. 1). Таким образом, из 100 г пиролизных смол образуется 22.2 г конденсированного углерода. Однако в этом случае на проведение конверсии требуется подвод энергии извне.

Конверсия продуктов пиролиза древесины с воздухом и водяным паром

Добавление паров воды при конверсии может приводить к снижению температуры и увеличению содержания водорода в продуктах. На рис. 1в представлены зависимости мольного содержания продуктов конверсии от коэффициента избытка

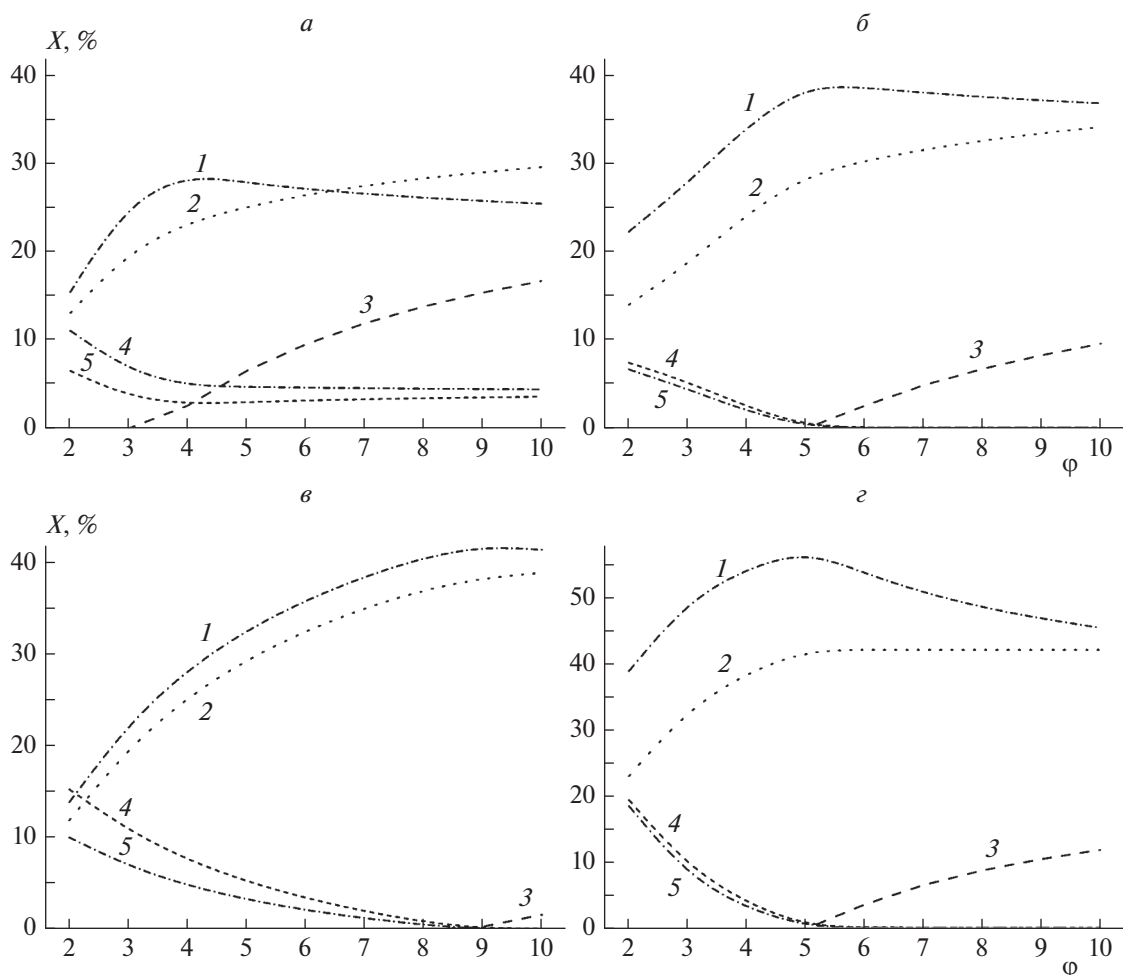


Рис. 1. Зависимости мольного содержания продуктов конверсии (X) от коэффициента избытка топлива ϕ для пиролизной смолы брутто-формулы $C_1H_{1.48}O_{0.58}$: *а* – при 1000 К, $[H_2O] = 0$ и $[O_2] = 21$ об.%; *б* – при 1300 К, $[H_2O] = 0$ и $[O_2] = 21$ об.%, *в* – при 1300 К, $[H_2O] = 10$ об.% и $[O_2] = 21$ об.%; *г* – при 1300 К, $[H_2O] = 0$ и $[O_2] = 100$. Кривые: 1 – CO, 2 – H_2 , 3 – $C_{(c)}$, 4 – H_2O , 5 – CO_2 .

топлива ϕ при содержании паров воды 10 об.% в смеси с воздухом и значении температуры в конверторе 1300 К. При добавлении паров воды режимы с образованием конденсированного углерода реализуются только при $\phi > 9$, т.е. для очень богатых смесей. С увеличением значения ϕ до 10 содержание CO и водорода растет соответственно до 41 и 38 об.%, а содержание паров воды и диоксида углерода снижается до нуля. Добавление паров воды приводит к увеличению содержания водорода в продуктах.

Аналогичный результат получен и при конверсии продуктов пиролиза древесины без добавления воздуха (табл. 1). Если проводить конверсию продуктов пиролиза древесины при температуре 1300 К и добавлении 10 об.% паров воды, то максимальное содержание водорода, CO и конденсированного углерода в продуктах составит соответственно 46,7, 38,5 и 14,3 об.% (табл. 1). В этом слу-

чае из 100 г пиролизных смол образуется 12,7 г конденсированного углерода.

Конверсия продуктов пиролиза древесины с кислородом

Использование чистого кислорода вместо воздуха при окислительной конверсии позволяет получать продукты, не разбавленные азотом. На рис. 1г представлены зависимости мольного содержания продуктов кислородной конверсии от коэффициента избытка топлива ϕ при значении температуры в конверторе 1300 К. Зависимости содержания продуктов конверсии от ϕ аналогичны случаю воздушной конверсии (см. рис. 1б). Максимальное содержание CO и водорода составляет соответственно 56 и 42 об.%. Содержание этих веществ выше, чем для случая воздушной конверсии (см. рис. 1б), за счет отсутствия разбавления продуктов азотом. Однако если в

Таблица 2. Концентрации (в об.%) основных компонентов конверсии продуктов пиролиза древесины

φ	Температура конверсии, К	[CO ₂]		[N ₂]		[CO]		[CH ₄]		[H ₂]	
		эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.
1.67	1200	15.3	12.4	65.6	64.2	14.1	14.0	0.8	0	2.8	8.8
1.43	1225	16.6	14.5	66.5	69.7	13.6	10.1	0.3	0	1.8	5.8

конвертор с продуктами пиролиза поступают газообразные продукты воздушной газификации древесины, то разбавление азотом тоже будет происходить, но в меньшей степени. Поэтому кислородную конверсию следует применять для продуктов пиролиза, отделенных от газообразных продуктов газификации древесины.

В табл. 2 представлено сравнение расчетных и экспериментальных данных по равновесным продуктам конверсии пиролизных смол древесины. В работе [32] проведено экспериментальное исследование воздушной конверсии продуктов газификации древесины. В реакторе фильтрационного горения происходила воздушная газификация сосновой древесины, продукты которой далее направлялись в конвертор, куда подавалось дополнительное количество воздуха для проведения окислительной конверсии продуктов пиролиза древесины. Из данных, приведенных в табл. 2, видно, что с уменьшением коэффициента избытка топлива температура в конверторе увеличивается за счет более полного окисления. Расчетный состав продуктов конверсии близок к составу продуктов конверсии, полученному в экспериментах, за исключением содержания водорода. Это можно объяснить тем, что в экспериментах не успевает установиться термодинамическое равновесие. Однако в целом, расчеты позволяют количественно оценивать характеристики окислительной конверсии продуктов пиролиза древесины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для определения оптимальных условий получения газообразных продуктов с максимальным содержанием водорода проведен термодинамический расчет характеристик процесса окислительной конверсии продуктов пиролиза древесины. Расчеты позволяют количественно оценивать эти характеристики. Увеличение коэффициента избытка топлива, так же как и температуры конверсии, приводит к росту концентраций монооксида углерода и водорода. Добавление паров воды при фиксированной температуре конверсии приводит к увеличению содержания водорода в продуктах.

Если проводить конверсию продуктов пиролиза древесины при температуре 1300 К без добавления воздуха, то максимальное содержание водорода, CO и конденсированного углерода в продуктах составит соответственно 42.1, 33.1 и

24.3 об.%. Из 100 г пиролизных смол образуется 22.2 г конденсированного углерода. Однако в этом случае для проведения конверсии требуется подвод энергии извне.

Использование чистого кислорода при окислительной конверсии продуктов пиролиза позволяет получать продукты, не разбавленные азотом. Однако кислородную конверсию следует применять для продуктов пиролиза, отделенных от газообразных продуктов газификации древесины, содержащих в своем составе азот. При этом максимальное содержание CO и водорода достигает соответственно 56 и 42 об.%.

С учетом того, что древесина считается углеродно-нейтральным топливом, режимы конверсии продуктов ее пиролиза с получением конденсированного углерода (биококса) имеют отрицательный углеродный след, поскольку получаемый биококс является хорошим удобрением и депонированный в почву углерод изымается из атмосферного цикла.

Исследование выполнено в рамках госзадания (регистрационный номер АААА-А19-119022690098-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шмелев В.М., Арутюнов В.С., Янг Х., Им Ч. // Хим. физика. 2017. Т. 36. № 5. С. 38; <https://doi.org/10.7868/S0207401X17050090>
2. Oliveira A.M., Beswick R.R., Yan Y. // Curr. Opin. Chem. Eng. 2021. V. 33. ID 100701; <https://doi.org/10.1016/j.coche.2021.100701>
3. Sunny N., Mac Dowell N., Shah N. // Energy Environ. Sci. 2020. V. 13. № 11. P. 4204; <https://doi.org/10.1039/D0EE02016H>
4. Арутюнов В.С., Стрекова Л.Н. // Нефтегазохимия. 2021. № 1–2. С. 8; <https://doi.org/10.24412/2310-8266-2021-1-2-8-11>
5. Алдошин С.М., Арутюнов В.С., Савченко В.И. и др. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 5. С. 46; <https://doi.org/10.31857/S0207401X21050034>
6. Megía P.J., Vizcaíno A.J., Calles J.A., Carrero A. // Energy Fuels. 2021. V. 35. № 20. P. 16403; <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c02501>
7. Newborough M., Cooley G. // Fuel Cells Bulletin. 2020. V. 2020. № 11. P. 16; [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(20\)30546-0](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(20)30546-0)

8. *Kakoulaki G., Kougiass I., Taylor N. et al.* // Energy Convers. Manag. 2021. V. 228. ID 113649; <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113649>
9. *Dawood F., Anda M., Shafiullah G.M.* // Intern. J. Hydrog. Energy. 2020. V. 45. № 7. P. 3847; <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059>
10. *Scamman D., Newborough M.* // Ibid. 2016. V. 41. № 24. P. 10e080; <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.166>
11. *Karaca A.E., Dincer I., Gu J.* // Ibid. 2020. V. 45. № 41. P. 22e148; <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.030>
12. *Якубсон К.И.* // ЖПХ. 2020. Т. 93. № 12. С. 1675; <https://doi.org/10.31857/S0044461820120014>
13. *Miller H.A., Bouzek K., Hnat J. et al.* // Sustain. Energy Fuels. 2020. V. 4. P. 2114; <https://doi.org/10.1039/c9se01240k>
14. *Zhang H., Sun Z., Hu Y. H.* // Renew. Sustain. Energy Rev. 2021. V. 149. P. 111330; <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111330>
15. *Ripoll N., Salgansky E., Toledo M.* // Intern. J. Heat Mass Transf. 2021. V. 177. ID 121472; <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121472>
16. *Boretti A.* // Intern. J. Hydrog. Energy. 2021. V. 46. № 46. P. 23988; <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.182>
17. *Fierro M., Requena P., Salgansky E., Toledo M.* // Chem. Eng. J. 2021. ID 130178; <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130178>
18. *Howarth R.W., Jacobson M.Z.* // Energy Sci. Eng. 2021. V. 9. № 10. P. 1676; <https://doi.org/10.1002/ese3.956>
19. *Филиппов С.П., Ярославцев А.Б.* // Успехи химии. 2021. Т. 90. № 6. С. 627; <https://doi.org/10.1070/RCR5014>
20. *Kersch F., Stary A., Gleis S. et al.* // Intern. J. Hydrog. Energy. 2021. V. 46. № 38. P. 19897; <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.114>
21. *Harun K., Adhikari S., Jahromi H.* // RSC Advances. 2020. V. 10. № 67. P. 40882; <https://doi.org/10.1039/D0RA07440C>
22. *Rin T., Sangwichien C., Yamsaengsung R., Reungpeera-kul T.* // Intern. J. Hydrog. Energy. 2021. V. 46. № 56. P. 28e450. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.101>
23. *Chen Q.Q., Lv M., Gu Y. et al.* // Joule. 2018. V. 2. № 4. P. 607; <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.02.015>
24. *Клишин В.И., Патраков Ю.Ф., Мандров Г.А.* // Химия твердого топлива. 2013. № 5. С. 51; <https://doi.org/10.7868/S0023117713050058>
25. *Midilli A., Kucuk H., Topal M. E., Akbulut U., Dincer I.* // Intern. J. Hydrog. Energy. 2021. V. 46. № 50. P. 25385; <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.088>
26. *Lee R.P., Seidl L.G., Meyer B.* // Clean Energy. 2021. V. 5. № 2. P. 180; <https://doi.org/10.1093/ce/zkab002>
27. *Goede A.P.H.* // EPJ Web Conf. EDP Sci. 2018. V. 189. P. 00010; <https://doi.org/10.1051/epjconf/201818900010>
28. *Prabowo B., Aziz M., Umeki K. et al.* // Appl. Energy. 2015. V. 158. P. 97; <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.060>
29. *Podlesniy D.N., Zaichenko A.Yu., Tsvetkov M.V. et al.* // Fuel. 2021. V. 298. ID 120862; <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120862>
30. *Richardson Y., Blin J., Julbe A.* // Prog. Energy Combust. Sci. 2012. V. 38. № 6. P. 765; <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2011.12.001>
31. *Shen Y., Yoshikawa K.* // Renew. Sustain. Energy Rev. 2013. V. 21. P. 371; <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.062>
32. *Кислов В.М., Глазов С.В., Салганская М.В., Пилипенко Е.Н., Цветкова Ю.Ю.* // ЖПХ. 2021. Т. 94. № 3. С. 363; <https://doi.org/10.31857/S0044461821030117>
33. *Петров В.В., Варзарев Ю.Н., Старникова А.П., Абдуллин Х.А.* // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 2. С. 37; <https://doi.org/10.31857/S0207401X20020089>
34. *Трусов Б.Г.* // Матер. XIV Междунар. конф. по химической термодинамике. Спб: НИИХ СПбГУ, 2002. С. 483.
35. *Antzara A., Heracleous E., Bukur D.B., Lemonidou A.A.* // Energy Procedia. 2014. V. 63. P. 6576; <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.694>
36. *Tabrizi F.F., Mousavi S.A.H.S., Atashi H.* // Energy Convers. Manage. 2015. V. 103. P. 1065; <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.07.005>
37. *Salgansky E.A., Kislov V.M., Glazov S.V., Salganskaya M.V.* // J. Combustion. 2016. ID 9637082; <https://doi.org/10.1155/2016/9637082>
38. *Козлов С.Н., Тереза А.М., Медведев С.П.* // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 8. С. 34; <https://doi.org/10.31857/S0207401X21080070>
39. *Tereza A.M., Medvedev S.P., Smirnov V.N.* // Acta Astronaut. 2020. V. 176. P. 653; <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.03.045>
40. *Тереза А.М., Агафонов Г.Л., Андержанов Э.К. и др.* // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 8. С. 56; <https://doi.org/10.31857/S0207401X21080136>