

УДК 544.47, 661.961.6

DOI: 10.15372/ChUR2024564

EDN: NHYJCC

Разработка дизельного топливного процессора и оптимизация тепловой схемы энергоустановки на основе ТОТЭ мощностью 1 кВт

В. А. ШИЛОВ^{1,2}, Д. И. ПОТЕМКИН^{1,2}, М. А. БУРМАТОВА^{1,2}, П. В. СНЫТНИКОВ¹¹Институт катализа СО РАН,
Новосибирск, Россия²Новосибирский государственный университет,
Новосибирск, Россия

E-mail: sva@catalysis.ru

(Поступила 04.07.2023; после доработки 05.10.2023; принята к печати 22.12.2023)

Аннотация

Разработан и испытан топливный процессор для автотермического риформинга дизельного топлива в синтез-газ. Показано, что созданный реактор обладает быстрым запуском и высокой эффективностью. В ходе испытаний была достигнута полная конверсия дизельного топлива и близкий к равновесным значениям состав основных продуктов реакции. Оптимизирована тепловая схема энергоустановки на основе твердооксидного топливного элемента (ТОТЭ) с электрической мощностью 1 кВт. Полученные результаты являются основой для дальнейшего создания реального макета энергоустановки на основе планарного ТОТЭ с интегрированным дизельным топливным процессором, открывая перспективы в области создания маломощных электрохимических генераторов.

Ключевые слова: автотермический риформинг, дизельное топливо, синтез-газ, ТОТЭ, структурированный катализатор

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия возрос интерес к разработке электрохимических генераторов (ЭХГ) на основе топливных элементов. В частности, во многих странах именно с электрохимическими генераторами уже в ближайшее время связывают глобальную перестройку систем энергосбережения бытовых и промышленных объектов. Это обусловлено тем, что топливные элементы обладают рядом преимуществ перед традиционными источниками электроэнергии, включающих высокий коэффициент полезного использования (КПД) превращения химической энергии топлива в электрическую, бесшумность работы,

модульность конструкции и высокие экологические показатели.

Развитие индустрии энергоустановок на основе топливных элементов осложнено технологическими проблемами с оптимальным для них топливом – водородом. Существующие логистические решения для транспортировки и хранения водородного топлива все еще не способны полностью удовлетворить запросы мегаполисов, не говоря уже о местах, удаленных от крупных городов [1].

Для ископаемых топлив – природного газа, пропан-бутанового топлива и жидких продуктов нефтепереработки (керосин, бензин и дизельное топливо) – в мире уже создана и на-

лажена система транспортировки и хранения. С другой стороны, эти виды топлива можно рассматривать как источник водорода [2, 3].

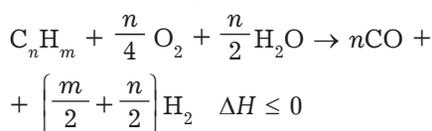
Среди всех известных типов топливных элементов лишь высокотемпературные твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ) могут потреблять в качестве топлива синтез-газ (без каких-либо ограничений на содержание в нем оксида углерода) и метан, образующиеся в результате риформинга углеводородов. Таким образом, преобразование ископаемых топлив в синтез-газ непосредственно перед циклом работы энергоустановки на основе ТОТЭ позволяет преодолеть существующий барьер для широкого использования топливных элементов в качестве источников электрической энергии. В этом случае энергоустановку необходимо оснастить дополнительным устройством – топливным процессором, позволяющим конвертировать углеводородное топливо в пригодный для питания ТОТЭ водородсодержащий газ [4, 5]. Если же в качестве источника синтез-газа рассматривается метан, то многообещающим является вариант его внутренней конверсии в анодном пространстве ТОТЭ, что способствует повышению КПД и уменьшению габаритов энергоустановки.

Одним из перспективных носителей водорода на “переходном” этапе к ЭХГ является дизельное топливо, поскольку по сравнению с другими альтернативными углеводородными топливами на единицу объема дизельного топлива приходится наибольшее количество водорода, а инфраструктура данного вида топлива хорошо отлажена во многих странах. Работающие на дизельном топливе ЭХГ могут быть использованы в качестве вспомогательного источника электроэнергии на борту транспортных средств (грузовой транспорт, поезда, морские суда), а также в качестве стационарного или резервного источника энергии в отдаленных поселениях.

Основные факторы, усложняющие процесс создания эффективного катализатора конверсии коммерческого дизельного топлива и, соответственно, топливного процессора, – высокие рабочие температуры (700–900 °С), вызывающие спекание активного компонента, и наличие в моторном топливе серосодержащих и ароматических соединений, обладающих низкой реакционной способностью и дезактивирующих катализатор [6–8].

Конверсию дизельного топлива в синтез-газ можно осуществить тремя способами: парциальным окислением, паровым и автотермическим риформингом. Из обзора литературных данных

было выявлено, что автотермический риформинг (АТР), осуществляемый по уравнению:



является наиболее предпочтительным способом конверсии дизельного топлива для обеспечения синтез-газом энергоустановок на базе ТОТЭ [4, 9, 10]. Это подтверждается примерами практических разработок топливных процессоров на основе АТР дизельного топлива в Германии и Южной Кореи [5, 11].

В предыдущих работах был детально изучен процесс АТР дизельного топлива на разработанном структурированном катализаторе Rh/Ce_{0.75}Zr_{0.25}O_{2-δ}/Al₂O₃/FeCrAl [7, 12]. Были подобраны оптимальные условия реакции для минимизации процессов дезактивации катализатора. С помощью математического моделирования было проведено исследование системы формирования реакционной смеси и оптимизация геометрических параметров каталитических блоков [13].

Цель данной работы – создание и испытание макета дизельного топливного процессора, а также оптимизация тепловой схемы энергоустановки в расчете на электрическую мощность ТОТЭ до 1 кВт.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Приготовление катализатора

В предыдущих работах нами был разработан высокоэффективный композитный катализатор типа “наночастицы активного металла (Rh) / наночастицы активного оксида (смешанные оксиды церия и циркония) / структурный оксидный компонент (оксид алюминия) / структурированная металлическая подложка” [7, 12]. Поскольку в реакции АТР дизельного топлива необходима высокая теплопроводность катализатора для передачи тепла из фронтальной “горячей” зоны в хвостовую “холодную” зону, в качестве структурированного носителя был изготовлен блок сотового типа из жаропрочной сетки сплава FeCrAl (сталь марки X23Ю5Т, с размером ячейки 0.5 мм и диаметром проволоки 0.25 мм, изготовитель ЗАО “НПО Союзнихром”, Россия), состоящий из гофрированной и плоской сетки, скрученной в спираль Архимеда.

Для увеличения адгезионных свойств поверхности сетки на нее нанесли защитное покрытие из θ-Al₂O₃ по модифицированной методике Байера с финальной обработкой при температуре

800 °С. Ранее было показано, что такое покрытие предотвращает деградацию каталитического слоя при нагреве – охлаждении и расширении – сжатию металлической подложки [7].

В качестве носителя активного компонента использовали смешанный оксид $Ce_{0.75}Zr_{0.2}Gd_{0.05}O_{2-δ}$, нанесенный на структурированную подложку $\theta-Al_2O_3/FeCrAl$ методом соосаждения. Для этого структурированный носитель пропитывали в водном растворе смеси солей $Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$, $ZrO(NO_3)_2 \cdot (7-8)H_2O$ и $Gd(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$, затем подвергали гомогенному гидролизу в водном растворе аммиака с последующей сушкой и прокаливанием при 800 °С.

Нанесение активного компонента (Rh) осуществляли методом сорбционно-гидролитического осаждения. Для этого структурированный носитель нагревали до 80 °С в водном растворе солей $RhCl_3$ и Na_2CO_3 (при молярном соотношении $Na/Cl = 1$). После полного осаждения гидроксида родия на носитель (индикатор – отсутствие реакции раствора с $NaBH_4$) катализатор восстанавливали в потоке смеси (10 об. % H_2 в N_2) при температуре 250 °С.

По данной методике был приготовлен цилиндрический структурированный блок ($d = 40$ мм, $l = 60$ мм, где d и l – диаметр и высота блока соответственно) состава, мас. %: $0.12Rh/6Ce_{0.75}Zr_{0.2}Gd_{0.05}O_{2-δ}/4\theta-Al_2O_3/FeCrAl$.

Каталитические эксперименты

На рис. 1 представлен общий вид макета топливного процессора АТР дизельного топлива, состоящего из реактора с загруженным в него структурированным катализатором, водяного ис-

парителя и пароперегревателя, дизельной горелки и холодильника.

Риформер дизельного топлива был изготовлен из жаропрочной стали с толщиной стенки 1.5 мм. Для минимизации теплотерь во время экспериментов элементы реактора покрывали теплоизоляционным материалом. Подачу воздуха к горелке и риформеру осуществляли через регуляторы расхода газа (Bronkhorst, Нидерланды). Подачу воды и дизельного топлива обеспечивали с помощью плунжерных насосов Series I и Pump (Scientific Systems, Inc., США). Водяной испаритель и пароперегреватель представляли собой теплообменник змеевикового типа. Для генерации теплоты, необходимой для его функционирования использовали дизельную горелку, оснащенную свечой накала. В пароперегревателе, нагреваемый дымовыми газами дизельной горелки, подавали воду со скоростью 240 г/ч. Температура пара на выходе из теплообменника – 600–700 °С. Жидкое дизельное топливо и перегретый пар подавали в реактор через газожидкостную форсунку с диаметром сечения сопла 0.5 мм. Воздух нагнетали в риформер через точечные каналы, расположенные тангенциально. Температуру внутри каталитического модуля измеряли четырьмя термопарами К-типа (T_1, T_2, T_3, T_4), расположенными в разных зонах (см. рис. 1). Перед пуском реакции АТР катализатор нагревали потоком перегретого пара до $T_1 = 320$ °С. После достижения этой температуры начинали подачу сначала дизельного топлива, а затем воздуха. Условия процесса АТР дизельного топлива следующие. Скорости подачи реагентов: дизель 95 г/ч, H_2O 240 г/ч, воздух 475 л/ч; соотношения $H_2O/C = 2$, $O_2/C = 0.6$; объемная скорость потока 11300 ч⁻¹.

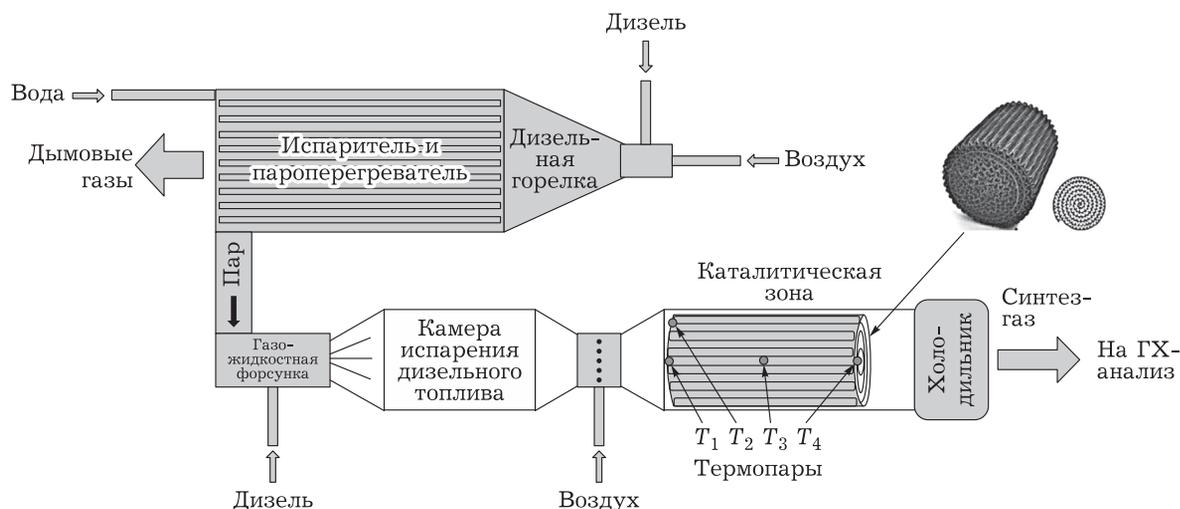


Рис. 1. Общий вид топливного процессора автотермического риформинга дизельного топлива.

Автотермический риформинг дизельного топлива зимней марки (Газпромнефть, Россия), соответствующего стандарту EN 590, проводили в проточном реакторе с неподвижным слоем катализатора при атмосферном давлении. Конверсию топлива (X , %) определяли гравиметрически каждый час по следующему уравнению:

$$X = \frac{Vt - m}{Vt} \cdot 100$$

где t – время сбора пробы, ч; V – массовый расход топлива на входе в реактор, г/ч; m – масса непрореагировавшего топлива, г.

Изменение состава газовой фазы в онлайн режиме определяли с помощью газоаналитического стенда, оснащенного газоанализаторами ОХУМАТ 61, САЛОМАТ 6 и ULTRAMAT (Siemens, Германия). Анализаторы позволяли измерять концентрации O_2 , H_2 , CO , CO_2 и CH_4 с частотой обновления 4 с. Отбор проб газа осуществляли насосом, оснащенный осушителем, в непрерывном режиме.

Состав сухого газа на выходе анализировали с помощью газового хроматографа ГХ-1000 (Хромос, Россия), оборудованного пламенно-ионизационным детектором (ПИД) с блоком метанатора и детектором по теплопроводности (ДТП). Перед анализом газовой смеси воду конденсировали. Детектор по теплопроводности использовали для нахождения концентраций H_2 и N_2 , разделенных в колонке СаА с газом-носителем Ar. Углеродсодержащие компоненты CO , CO_2 , CH_4 и C_2-C_5 разделяли в колонке Рогарак Q и количественно определяли с использованием ПИД. Предел обнаружения CO , CH_4 и CO_2 – 1 м. д. (где м. д. – миллионная доля), углеводородов C_2-C_5 – 0.1 м. д., H_2 – 0.1 об. %, N_2 – 1 об. %.

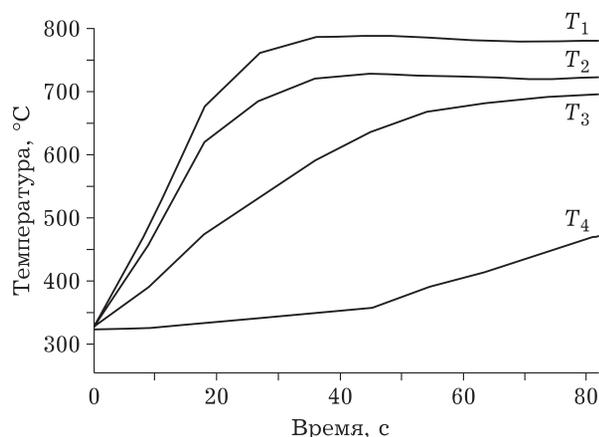


Рис. 2. Зависимость температуры на поверхности катализатора, регистрируемой термодатчиками (T_1, T_2, T_3, T_4), от времени после пуска автотермического риформинга дизельного топлива.

Точность анализа CO , CO_2 и углеводородов C_1-C_5 – 0.5, H_2 – 1 и N_2 – 2 отн. %. Расчет равновесного состава продуктов реакции процесса АТР в программном пакете HSC Chemistry 7.0 производили для модельного дизельного топлива состава: гексадекан – 85, о-ксилол – 14, метилнафталин – 1 мас. %. Эти данные использовали для сравнения с экспериментальными результатами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Каталитические испытания риформера

При разработке риформера топлива были учтены основные требования, предъявляемые к данным устройствам:

1. Жидкое дизельное топливо впрыскивалось форсункой в перегретый водяной пар.
2. Камера испарения и смешения дизельного топлива сконструирована с учетом минимизации контакта реагентов с металлической стенкой реактора.
3. Подача воздуха в АТР осуществлялась через точечные тангенциально расположенные каналы, что обеспечивало лучшее смешивание паровоздушнотопливной смеси. При этом воздух подавался максимально приближенно к слою катализатора для минимизации нежелательных газофазных процессов.

На рис. 2 представлен график изменения температуры в четырех областях каталитического блока после пуска АТР дизельного топлива. Видно, что температуры, регистрируемые термодатчиками T_1-T_4 , резко выросли в течение первых 30 с после подачи воздуха в риформер. Стационарные же значения ($T_1 = 896$ °C, $T_2 = 842$ °C, $T_3 = 836$ °C, $T_4 = 767$ °C) были достигнуты в течение 15 мин.

После пуска АТР дизельного топлива наблюдалось увеличение концентрации H_2 , CO , CO_2 и CH_4 на выходе из реактора (рис. 3). Уже после 50 с реакции концентрация H_2 возросла до отметки 20 об. %.

Конверсия дизельного топлива достигла 100 % в течение 5 ч в АТР дизельного топлива, образование маслянистого остатка на выходе из реактора не наблюдалось. На рис. 4 представлен состав сухого газа на выходе из риформера после 5 ч работы. Концентрации основных продуктов реакции H_2 , N_2 , CO , CO_2 близки к своим термодинамическим значениям, что также свидетельствует о полном превращении дизельного топлива. Суммарное содержание побочных продуктов (C_2-C_3 углеводородов) не превышает

400 м. д., и существует возможность снижения этого показателя до нуля за счет небольшого повышения соотношения O_2/C или увеличения времени контакта, как было показано в предыдущих исследованиях [7]. Количество метана, образовавшегося в ходе реакции несущественно, учитывая тот факт, что он выступает в качестве топлива и посредством внутренней конверсии перерабатывается далее в анодном пространстве ТОТЭ.

Таким образом, было показано, что разработанный риформер позволяет быстро выходить на рабочий режим и конвертировать коммерческое дизельное топливо в синтез-газ, приемлемый для питания ТОТЭ. Далее на основе полученных экспериментальных результатов была проведена оптимизация тепловой схемы энергоустановки.

Оптимизация тепловой схемы энергоустановки

Проведено моделирование тепловых и материальных балансов функционирования энергоустановки на основе ТОТЭ с электрической мощностью 1 кВт, снабженной риформером дизельного топлива. Возможные тепловые потери при расчете не учитывались.

Для расчетов в качестве модельного состава дизельного топлива использовали смесь *n*-гексдекана и толуола (88 и 12 мас. % соответственно). Использованные величины входных потоков приведены в табл. 1.

Моделирование тепловых и других процессов в горячей зоне (hot box) ТОТЭ не проводилось. Также не рассчитывали поток газов через катодное пространство ТОТЭ. Для расчетов было принято: эффективность преобразования энер-

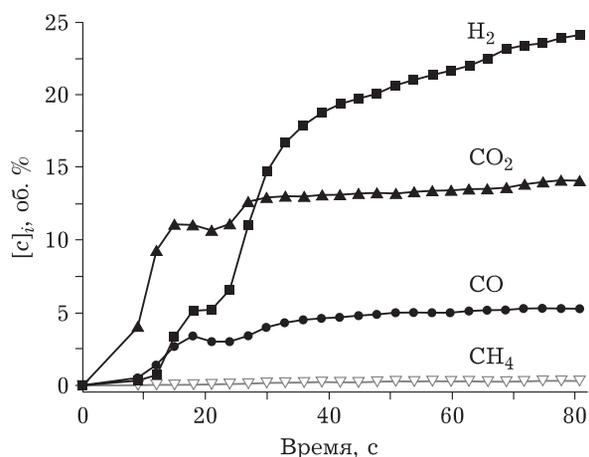


Рис. 3. Зависимость концентрации продуктов реакции (H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , об. % по сухому газу) от времени после пуска автотермического риформинга дизельного топлива.

гии сгорания топлива в электрическую – 55 %; количество выделяющегося тепла при электрохимическом окислении топлива достаточно для компенсации теплотеря горячей зоны ТОТЭ; коэффициент использования топлива – 85 %; температура анодных газов на выходе из ТОТЭ – 800 °С. Принятые приближения близки к характеристикам реально существующих образцов ТОТЭ мощностью около 1 кВт [14].

На рис. 5 представлена блок-схема установки. Деионизованную воду подают в парогенератор И-1, где ее испаряют и нагревают до 120 °С дымовыми газами после пароперегревателя Т-1 с температурой 700 °С. После этого дымовые газы с температурой 300 °С идут на сброс. Полученный водяной пар (Пар-1) перегревают до 700 °С в пароперегревателе Т-1 дымовыми газами горелки Г-1 с температурой 853 °С. Пере-

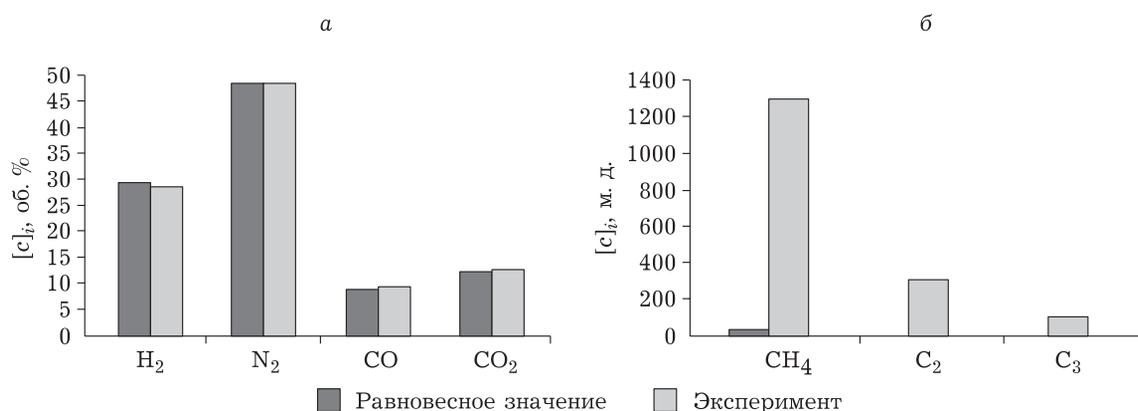


Рис. 4. Сравнение состава реформата после 5 ч реакции автотермического риформинга дизельного топлива с равновесными значениями: а – концентрация продуктов реакции H_2 , N_2 , CO , CO_2 , об. %; б – концентрация побочных продуктов реакции CH_4 , C_2 - и C_3 -углеводородов, м. д. (м. д. – миллионная доля).

ТАБЛИЦА 1

Величины входных потоков для расчета

Поток	Значение	T, °C
Дизельное топливо, кг/ч	0.265	20
Деионизованная вода, кг/ч	0.84	20
Воздух, Нм ³ /ч	1.176	20
Воздух для горелки, Нм ³ /ч	1.0	20
Воздух ТОТЭ	Расчет не проводился	20

гретый пар (Пар-2) используется для испарения дизельного топлива в испарительной камере и смешения паровоздушнотопливной смеси (ИС-1), в котором также происходит смешивание с потоком воздуха в риформер. Полученная реакционная смесь (молярные отношения $H_2O/C = 2.46$ и $O_2/C = 0.58$) при температуре 307 °C поступает на катализатор и подвергается паровоздушной конверсии при температуре 932 °C с образованием синтез-газа состава: H_2 20.4, CO 7.2, CO_2 7.9, H_2O 31.6, $32.5 N_2$, Ar 0.4 об. %. Синтез-газ далее поступает в анодное пространство ТОТЭ и подвергается там окислению с выработкой электроэнергии и образованием тепла, после чего анодные газы при температуре 800 °C поступают в горелку Г-1, где происходит доокисление H_2 и CO . Получен-

ные дымовые газы используются для перегрева пара и испарения воды и затем сбрасываются в атмосферу. Катодными газами подогревается поток воздуха (Воздух ТОТЭ), поступающего в катодное пространство ТОТЭ. Согласно расчету формальная электрическая мощность энергоустановки равна 1.14 кВт без учета потребления на собственные нужды. Результаты расчетов для некоторых потоков приведены в табл. 2.

Отметим, что при расчете не учитывались возможные теплопотери, неизбежные для реальной энергоустановки. Тем не менее, в системе присутствует некоторый “запас” теплоты, нивелируемый при сбросе дымовых газов (температура сброса дымового газа в расчете составляет 300 °C). Кроме того, температура подаваемого в ТОТЭ синтез-газа может быть снижена до 800 °C, что является нормальным значением для ТОТЭ. При необходимости помимо анодных газов в горелке может быть использовано дизельное топливо для генерации дополнительного количества теплоты. Следует отметить, что свойства катализатора позволяют варьировать в некоторых пределах соотношения H_2O/C и O_2/C при конверсии, что дает возможность оптимизировать тепловой баланс энергоустановки.

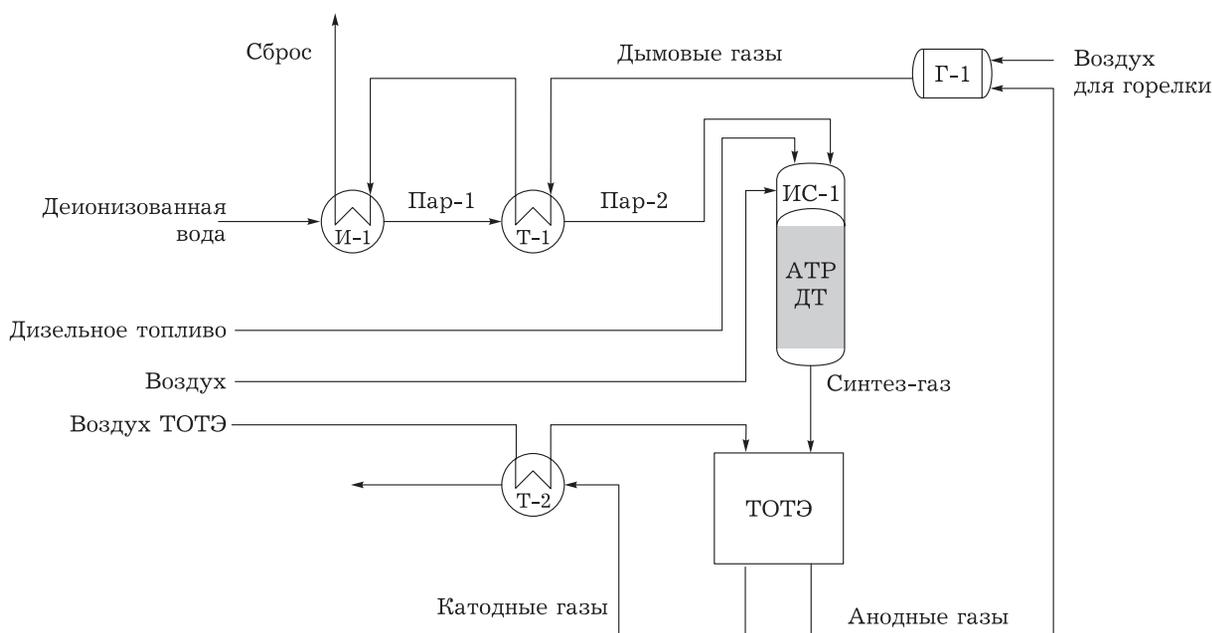


Рис. 5. Блок-схема энергоустановки на основе ТОТЭ, снабженной риформером дизельного топлива: И-1 – испаритель воды; Т-1 – пароперегреватель; Т-2 – теплообменник для подогрева воздуха для катодного пространства ТОТЭ; ИС-1 – устройство испарения дизельного топлива и смешения паровоздушнотопливной смеси; АТР ДТ – зона реактора с катализатором паровоздушной конверсии дизельного топлива; Г-1 – горелочное устройство. ТОТЭ – твердооксидный топливный элемент.

При расчете по низшей величине теплоты сгорания топлива общая эффективность получения электроэнергии на энергоустановке достигает 52 %, что является хорошим показателем для энергоустановок мощностью порядка 1 кВт [5, 14].

Несмотря на результативные показатели энергоустановок небольшой мощности на основе ТОТЭ, снабженных риформером дизельного топлива, существует ряд препятствий к практической реализации таких устройств, включая сложность изготовления ТОТЭ с высокими характеристиками и сложность создания эффективных теплообменников и систем испарения на малые потоки флюидов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был разработан и создан топливный процессор автотермического риформинга дизельного топлива в синтез-газ для питания энергоустановок на основе ТОТЭ, состоящий из реактора с загруженным в него структурированным катализатором, водяного испарителя, пароперегревателя и дизельной горелки. За счет оптимизации системы формирования реакционной смеси риформер характеризуется быстротой запуска и высокой эффективностью в отношении генерации синтез-газа. В течение 5 ч испытаний наблюдалась полная конверсия дизельного топлива, а состав основных продуктов реакции был близок к своим равновесным значениям.

На основе экспериментальных данных было проведено моделирование тепловых и материальных балансов функционирования энергоустановки на основе твердооксидного топливного элемента с электрической мощностью 1 кВт, снабженной риформером дизельного топлива. Для генерации теплоты, необходимой для получения перегретого пара риформера, было использовано тепло, выделяющееся при дожигании анодных газов ТОТЭ. Катодные же газы направлялись для подогрева потока воздуха, поступающего в катодное пространство ТОТЭ. Рассчитанный КПД получения электроэнергии на энергоустановке составил 52 %, что является высоким показателем для энергоустановок малой мощности.

Полученные результаты создают предпосылки к дальнейшему созданию реального макета энергоустановки на основе планарного ТОТЭ, разработанного, например, в Институте физики твердого тела имени Ю. А. Осипьяна РАН, со-

ТАБЛИЦА 2

Расчетные данные для некоторых потоков

Параметр	Реакционная смесь	Синтез-газ	Анодные газы
Концентрация компонента, молярная доля:			
H ₂	0	0.2038	0.0184
CO	0	0.0715	0.0241
CO ₂	0	0.0787	0.1249
H ₂ O	0.4641	0.3168	0.4981
N ₂	0.4073	0.3251	0.3226
O ₂	0.1097	0	0.0078
Ar	0.0052	0.0042	0.0041
n-C ₁₆ H ₃₄	0.0103	0	0
C ₇ H ₈	0.0034	0	0
Температура, °C	307	932	800
Поток,			
Нм ³ /ч	2.252	2.821	2.843
кг/ч	2.625	2.625	3.125

вмещенного с предложенным дизельным топливным процессором [15].

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 19-19-00257, <https://rscf.ru/project/19-19-00257>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Исупова Л. А., Жужгов А. В., Пармон В. Н. Жидкий параводород для водородной энергетики и катализаторы низкотемпературной орго-пара-конверсии водорода // Химия в интересах устойчивого развития. 2022. Т. 30, № 1. С. 41–46.
- Матус Е. В., Васильев С. Д., Исмагилов И. З., Ушаков В. А., Керженцев М. А., Исмагилов З. Р. Разработка нанесенных никельсодержащих катализаторов для автотермического риформинга метана // Химия в интересах устойчивого развития. 2020. Т. 28, № 4. С. 417–425.
- Malik F. R., Yuan H.-B., Moran J. C., Tippayawong N. Overview of hydrogen production technologies for fuel cell utilization // Eng. Sci. Technol. Int. J. 2023. Vol. 43. Art. 101452.
- Pasel J., Samsun R. C., Tschauder A., Peters R., Stolten D. Advances in autothermal reformer design // Appl. Energy. 2017. Vol. 198. P. 88–98.
- Pasel J., Samsun R. C., Meißner J., Tschauder A., Peters R. Recent advances in diesel autothermal reformer design // Int. J. Hydrogen Energy. 2020. Vol. 45, No. 3. P. 2279–2288.
- Кириллов В. А., Шигаров А. Б., Кузин Н. А., Киреев В. В., Брайко А. С., Бурцев Н. В. Катализаторы Ni/MgO на структурированных металлических носителях для воздушной конверсии низших алканов в синтез-газ // Катализ в пром-сти. 2019. Т. 19, № 5. С. 351–363.
- Шилов В. А., Рогожников В. Н., Потемкин Д. И., Снытников П. В. Синтез и исследование каталитических свойств структурированного Rh-содержащего катализатора конверсии дизельного топлива в синтез-газ // Кинетика и катализ. 2023. Т. 64, № 1. С. 109–118.

- 8 Кириллов В. А., Кузин Н. А., Амосов Ю. И., Киреевков В. В., Собянин В. А. Катализаторы конверсии углеводородных и синтетических топлив для бортовых генераторов синтез-газа // Катализ в пром-сти. 2011. № 1. С. 60–67.
- 9 Dolanc G., Pregelj B., Petrovčič J., Pasel J., Kolb G. Control of autothermal reforming reactor of diesel fuel // J. Power Sources. 2016. Vol. 313. P. 223–232.
- 10 Karatzas X., Dawody J., Grant A., Svensson E. E., Pettersson L. J. Zone-coated Rh-based monolithic catalyst for autothermal reforming of diesel // Appl. Catal., B. 2011. Vol. 101, No. 3–4. P. 226–238.
- 11 Bae M., Cheon H., Oh J., Kim D., Bae J., Katikaneni S. P. Rapid start-up strategy of 1 kW_e diesel reformer by solid oxide fuel cell integration // Int. J. Hydrogen Energy. 2021. Vol. 46, No. 52. P. 26575–26581.
- 12 Shilov V. A., Rogozhnikov V. N., Zazhigalov S. V., Potemkin D. I., Belyaev V. D., Shashkov M. V., Zagoruiko A. N., Sobyenin V. A., Snytnikov P. V. Operation of Rh/Ce_{0.75}Zr_{0.25}O_{2-δ}-η-Al₂O₃/FeCrAl wire mesh honeycomb catalytic modules in diesel steam and autothermal reforming // Int. J. Hydrogen Energy. 2021. Vol. 46, No. 72. P. 35866–35876.
- 13 Zazhigalov S. V., Shilov V. A., Rogozhnikov V. N., Potemkin D. I., Sobyenin V. A., Zagoruiko A. N., Snytnikov P. V. Mathematical modeling of diesel autothermal reformer geometry modifications // Chem. Eng. J. 2022. Vol. 442. Art. 136160.
- 14 Kumar Yadav A., Sinha S., Kumar A. Comprehensive review on performance assessment of solid oxide fuel cell-based hybrid power generation system // Therm. Sci. Eng. Prog. 2023. Vol. 46. Art. 102226.
- 15 Tsipis E. V., Matveev D. V., Sharafutdinov A. U., Yalovenko D. V., Samoilo A. V., Fedotov Yu. S., Dyakina M. S., Zhigacheva D. V., Agarkov D. A., Bredikhin S. I., Khariton V. V. Performance of SOFCs using model waste gases: a case study // Fuel. 2024. Vol. 358, Pt. A. Art. 130129.