



ВОДОРОДНО-МЕТАНОЛЬНЫЕ ТОТЭ ДЛЯ ТРАНСПОРТА*

С.Е. Щеклеин, А.М. Дубинин

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Россия
тел.: +7(343)375-95-08; e-mail: s.e.shcheklein@urfu.ru

doi: 10.15518/isjaee.2020.19-24.19-30

Заключение совета рецензентов: 03.08.20. Заключение совета экспертов: 10.08.20. Принято к публикации: 14.08.20.

Обсуждалась возможность создания энергетической установки с высокотемпературными топливными элементами, которая работает на водородосодержащей газовой смеси (синтез-газ), получаемой в требуемых для работы двигателя небольших объемах из жидкого топлива – метанола. В этом случае снимаются все проблемы, связанные с необходимостью получения, хранения и транспортировки водорода, так как темпы его образования и потребления двигателем равны.

Рассмотрена энергетическая установка мощностью 10 кВт, где прямое преобразование энергии химической реакции окисления водорода в аноде ТОТЭ в электрическую энергию происходит на базе продуктов воздушной конверсии метанола в каталитической горелке с использованием алюминий-никелевых катализаторов. Метанол сначала поступает в котел-утилизатор для нагрева до кипения и испарения, далее в парообразном виде – в каталитическую горелку, куда поступает и нагретый в котле-утилизаторе воздух. При коэффициенте расхода воздуха, равном 0,5, происходит конверсия метанола с образованием синтез-газа. Затем синтез-газ охлаждается с 988 °С до 700 °С воздухом, подаваемым в катодный канал. Воздух нагревается с 20 °С до 600 °С. Синтез-газ поступает в анодный канал, из которого водород диффузией поступает в анод, где окисляется кислородом воздуха, подаваемого в катодный канал. Продукты окисления водорода выходят в анодный канал. Продукты из анодного канала и обедненный кислородом воздух из катодного канала поступают в котел-утилизатор, где окисляется не поступивший в анод водород и содержащийся в синтез-газе оксид углерода. Теплота окисления используется на подогрев первичного воздуха и испарение метанола.

Приведен физико-химический анализ энергетической эффективности установки с высокотемпературными топливными элементами, работающей на синтез-газе, получаемом в каталитическом процессе непосредственно в автомобиле из жидкого топлива – метанола. Полученная энергия используется для двигателя электромобиля. Электрический КПД установки равен 42,1 %, что по энергетической эффективности соответствует уровню лучших современных двигателей внутреннего сгорания.

Ключевые слова: водород; стехиометрия; метанол; электрохимический генератор; электромобиль; энергетическая эффективность; ТОТЭ.

*Щеклеин С.Е., Дубинин А.М. Водородно-метанольные ТОТЭ для транспорта // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2020;19-24:19-30.



HYDROGEN-METHANOL SOFCs FOR TRANSPORT

S.E. Shcheklein, A.M. Dubinin

Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin
19 Mira Str., Yekaterinburg, 620002, Russia
Tel.: +7(343)375-95-08, e-mail: s.e.shcheklein@urfu.ru

doi: 10.15518/isjaee.2020.19-24.19-30

Referred 3 August 2020 Received in revised form 10 August 2020 Accepted 14 August 2020

The paper discusses the possibility of creating an energy plant with high-temperature solid fuel cells (SOFC) working on hydrogen-containing gas mixture (synthesis-gas) obtained in the required for the engine small volumes of liquid fuel – methanol. In this case, all problems related to the need to obtain, store and transport hydrogen are removed, as the rate of its production and consumption by the engine are equal.

The 10 kW power plant, where direct conversion of hydrogen oxidation chemical reaction energy in SOFC anode into electrical energy is based on the products of air conversion of methanol in a catalytic burner using aluminum-nickel catalysts, is considered. Methanol enters the boiler-recycler to heat up to boil and evaporate, then steamedly enters the catalytic burner. There is also air heated in the boiler-recycling. At the air consumption factor of 0.5, methanol is converted with the production of synthesis-gas. Then the synthesis-gas is cooled from 988 °C to 700 °C air fed into the cathode channel. The air is heated from 20 °C to 600 °C. Synthesis gas enters. Then from the anode canal hydrogen diffusion enters the anode, where oxygen is oxidized by air fed into the cathode channel. Hydrogen oxidation products enter the anode channel. Products from the anode canal and oxygen-depleted air from the cathode canal enter the boiler-recycling, where the hydrogen, which is not entered into the anode and contained in the synthesized carbon monoxide, is oxidized. The heat of oxidation is used to heat primary air and evaporate methanol.

The physical and chemical analysis of the energy efficiency of the high-temperature fuel cell plant, which works on synthesis-gas obtained in the catalytic process directly in the car made of liquid fuel-methanol. The resulting energy is used for the electric vehicle engine. The electrical efficiency of the installation is 42.1%, which in terms of energy efficiency exceeds the level of the best modern internal combustion engines.

Keywords: hydrogen; SOFC; stoichiometry; methanol; electrochemical generator; electric car; energy efficiency.



Сергей Евгеньевич
Щеклеин
Sergey Shcheklein

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина; действительный член Международной энергетической академии; член редколлегии журнала «Известия вузов. Ядерная энергетика»; Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE); сборника трудов УГТУ-УПИ «Теплофизика ядерных энергетических установок»; Трудов Одесского национального политехнического университета; Научно-технического журнала «Энергоэффективность и анализ».

Награды: Заслуженный энергетик России; Национальная экологическая премия им. В.И. Вернадского; медаль «Ветеран атомной энергетики и промышленности».

Образование: Уральский политехнический институт (УГТУ-УПИ) (1972 г.).

Область научных интересов: термодинамика ядерных энергетических установок; проблемы атомной энергетики и теплофизики двухфазных потоков; продление ресурса и повышение надежности оборудования АЭС; солнечная энергетика; ветроэнергетика; биоэнергетика.

Публикации: более 450, включая 5 монографий, 80 изобретений.

H-index 14

Information about the author: D.Sc. in Engineering, Professor, the Head of Atomic Stations and Renewable Energy Sources Department, Urals Federal University; a member of International Energy Academy; a member of the editorial board of "Institute of Higher Education News. Nuclear Power"; International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE); "Nuclear Power Units Heat Engineering" USTU; Odessa National Polytechnic University article collection; Scientific Journal of "Energy Effectiveness and Analysis".

Awards: Honored Power Engineer of the Russian Federation; V.I. Vernadsky National Environmental Award; Medal "Veteran of Nuclear Energy and Industry".

Education: Urals Polytechnic Institute, 1972.

Research interests: nuclear power units thermodynamics; questions of nuclear energy and thermophysics of the two-phase flows; NPP equipment lifetime enduring and reliability increasing; solar, wind and bioenergetics.

Publications: more than 450, including 5 monographs, 80 inventions.





Алексей Михайлович
Дубинин
Alexey Dubinin

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

Награды: медаль ордена «За заслуги перед Отечеством» второй степени.

Образование: Ивановский энергетический институт (1965 г.).

Область научных интересов: аппараты для производства технологических атмосфер из природного газа и твердого топлива.

Публикации: более 250, включая 2 монографии, 22 учебных, справочных и учебно-методических пособий, 10 изобретений.

H-index 4.

Information about the author: D.Sc. in Engineering, Professor of Power Engineering and Thermal Engineering Department, UrFU.

Awards: medal “For Merits to the Fatherland” the second degree.

Education: Ivanovo Power Institute, 1965.

Research interests: apparatuses for production of the technological atmospheres from natural gas and solid fuel.

Publications: more than 250, including 2 monographs, 22 educational, reference and teaching aids, 10 inventions.

1. Введение

Водород обладает рядом энергетических и экологических преимуществ по сравнению со всеми известными видами моторного органического топлива [1–4]. Использование водорода совместно с электрохимическими генераторами тока открывает большие возможности по созданию электрического транспорта, повышению энергетической эффективности и экологической толерантности транспортных средств любого масштаба. Однако современные методы получения водорода достаточно энергоемки и требуют больших объемов электрической энергии, получаемой, как правило, от традиционных электростанций, работающих на угле, газе, нефти. Таким образом, преимущества водорода как топлива в значительной мере нивелируются в рамках всего цикла его получения и использования. Другими особенностями водорода является высокая текучесть, потенциальная взрывоопасность и сложные условия сохранения значительных количеств в малом объеме, характерном для транспорта. Решению этих проблем посвящено множество исследований, выполненных учеными и конструкторами в разных странах мира [например, 5–10]. Достигнутые успехи в создании двигателей внутреннего сгорания, работающих на водороде и его смесях с бензином и дизельным топливом, снижении экологического воздействия продуктов сгорания на биосферу [11, 12] не позволяют, однако, говорить о возможности широкомасштабного использования водородных технологий на транспорте. Проекты непосредственной генерации водорода на транспортном средстве из жидких водородосодержащих органических видов топлива (этанола) [13–16] позволяют решить проблемы хранения и

повышения безопасности транспортных средств, применение прямых методов преобразования химической энергии топлива в электрическую форму с помощью электрохимических технологий ограничивается лишь достаточно высоким уровнем энергетических затрат на получение первичного энергоносителя. Известно, что уровень энергетических затрат на получение топливного этанола определяется содержанием сахара в исходном сырье и создает конкуренцию пищевому использованию этого продукта [17]. Для стран, обладающих запасами углеводородных видов топлива (газ, уголь и пр.), эффективным конвертированным продуктом является метанол, который получают при наименьших энергозатратах и не задействуют в пищевом производстве.

В данной работе обсуждается возможность создания энергетической установки с высокотемпературными топливными элементами, работающей на водородосодержащей газовой смеси (синтез-газа), которую получают в требуемых для работы двигателя небольших объемах из жидкого топлива – метанола. В этом случае снимаются все проблемы, связанные с необходимостью получения, хранения и транспортировки водорода, так как темпы его образования и потребления двигателем равны, что радикально повышает безопасность применения водорода на транспортном средстве

Метанол – простейший спирт, производимый из любых органических ресурсов, включая биомассу растений и твердые бытовые отходы [18–21]. Наиболее энергетически эффективный способ его получения из природного газа (метана) – использование для синтеза тепловой энергии современных ядерных реакторов [22].

Список обозначений	
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
α	Коэффициент (расхода) избытка воздуха
η	Коэффициент полезного действия, использования топлива
φ	Объемная доля водорода, окисленного в аноде
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
B	Расход синтез-газа



Продолжение списка обозначений

b	Удельный расход метанола
C	Удельная истинная массовая изобарная теплоемкость, кДж/К кг
F	Число Фарадея
ΔG	Небаланс расхода, энергия Гиббса при реальных параметрах
G	Расход реагентов
ΔG°	Приращение энергии Гиббса при стандартных параметрах
ΔH_1°	Теплота окисления водорода в аноде
ΔQ	Небаланс мощности
Q	Мощность, теплота
q_{x1}	Экзотермический эффект реакции (2)
q_{x2}	Теплота окисления синтез-газа. Потери теплоты с уходящими газами из котла-утилизатора
q_3	Потеря теплоты с химическим недожогом
q_5	Потеря теплоты в окружающую среду через теплоизоляцию
r_m	Теплота испарения метанола
ΔS°	Изменение энтропии реакции окисления водорода при стандартных параметрах
T	Температура, К
t	Температура, °С
<u>Индексы верхние</u>	
*	На выходе из анодного и катодного каналов
p	Рабочие условия
o	При стандартных условиях
<u>Индексы нижние</u>	
v	Воздух
<u>Единицы измерения</u>	
кг /ч	Килограмм за час
кВт	Киловатт мощности
кг	Килограмм массы
кДж/(К кг)	Килоджоуль на Кельвин на килограмм
кг/(кВт ч)	Килограмм метанола на 1 киловат час
кг/ГДж	Килограмм метанола на 1 гигаджоуль
кДж/ кг	Килоджоуль на 1 килограмм
кг/с	Килограмм за 1 секунду
<u>Аббревиатуры</u>	
КПД	Коэффициент полезного действия
ТОТЭ	Твердо-окислительный топливный элемент
ЭДС	Электродвижущая сила
ЭХГ	Электрохимический генератор

2. Моделирование физико-химических процессов

В работе [5] рассмотрены более 220 вариантов работы ЭХГ на базе ТОТЭ с рециркуляцией анодных газов и без нее. Сделан вывод о том, что выбор принципиальной схемы мало влияет на эффективность ЭХГ, следует выбирать схему как можно проще. Данное утверждение особенно актуально для средств транспорта, где одним из важнейших условий является минимизация веса и габаритов источника энергии. В предлагаемой схеме рециркуляция анодных газов не предусмотрена – применяются планарные топливные элементы с прямоточным движением синтез-газа и окислителя. На рис. 1 пред-

ставлена концептуальная схема использования водородно-метанольного транс-портного средства.

Для оценки данной технологии рассмотрена энергетическая установка мощностью 10 кВт, где преобразование энергии химической реакции окисления водорода в аноде ТОТЭ в электрическую энергию происходит на базе продуктов воздушной конверсии метанола в каталитической горелке с алюминий-никелевыми катализаторами.

Целью расчета являлось определение химического КПД каталитической горелки, батареи ТОТЭ и ЭХГ, температуры в аноде, ЭДС планарного элемента, доли водорода, окисленного в аноде, удельного расхода метанола на выработку электрической и тепловой энергии.



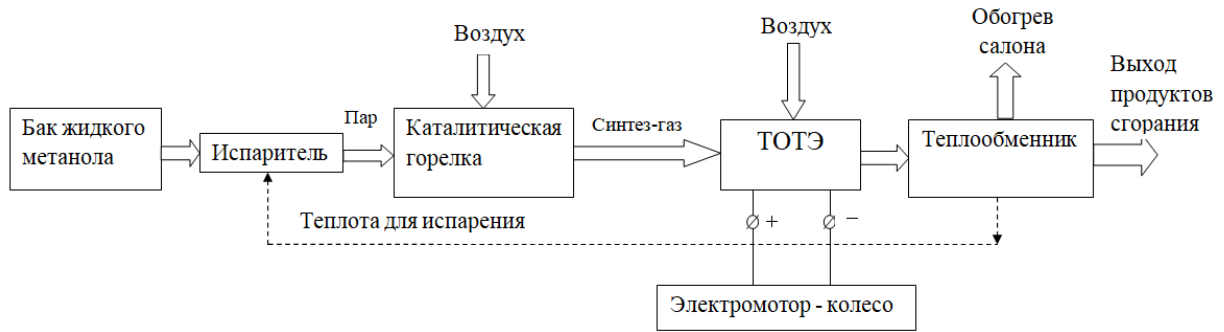


Рис. 1 – Концептуальная схема водородно-метанольного транспортного средства
 Fig. 1 – Conceptual scheme of hydrogen-methanol vehicle

Расчетная схема прямого преобразования метанола в электрическую энергию показана на рис. 2.

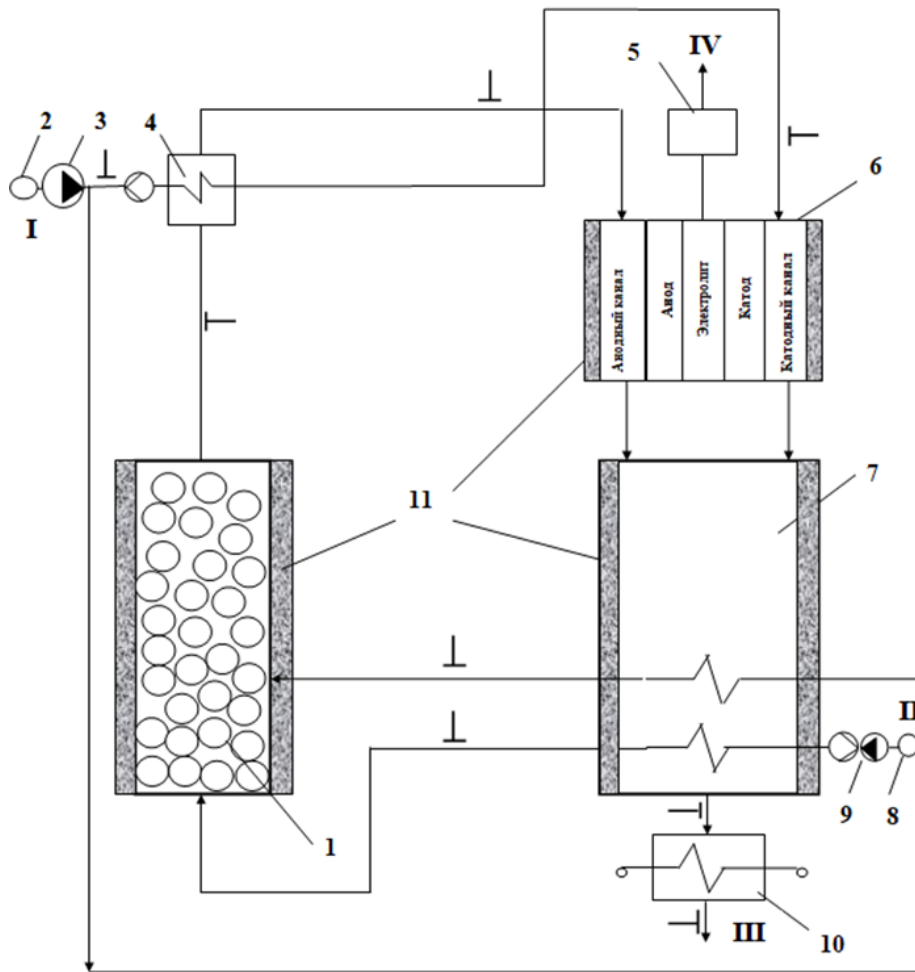


Рис. 2 – Схема прямого преобразования метанола в электрическую энергию:
 1 – каталитическая горелка; 2 – воздухопровод; 3 – воздуходувка; 4 – охладитель синтез-газа; 5 – потребитель электрической энергии; 6 – электрохимический генератор на базе ТОТЭ; 7 – котел-утилизатор; 8 – коллектор метанола; 9 – насос для метанола; 10 – подогреватель салона; 11 – теплоизоляция.
 I – ввод воздуха; II – ввод метанола; III – вывод продуктов сгорания; IV – вывод электрической энергии.

○ — датчики расхода; T — датчики температуры

Fig. 2 – The scheme of direct conversion of methanol into electrical energy:
 1 – catalytic burner; 2 – air pipeline; 3 – blower; 4 – cooler synthesis-gas; 5 – Consumer of Electric Power; 6 – electrochemical generator based on TOTE; 7 – boiler-recycler; 8 – methanol collector; 9 – methanol pump; 10 – salon heater; 11 – insulation.
 I – input of air; II – methanol input; III – the withdrawal of combustion products; IV – the output of electrical energy.

○ — flow sensors; T — temperature sensors

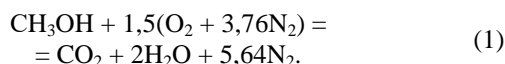
Основой для производства синтез-газа является каталитическая горелка для воздушной конверсии паровидного метанола 1, воздухоподогреватель 3, охладитель синтез-газа 4, инвертор и электропотребитель 5, батарея на базе ТОТЭ 6, котел-утилизатор 7; насос для подачи метанола 9; подогреватель салона 10, тепловая изоляция на горелке, котле-утилизаторе и батарее ТОТЭ 11.

Метанол поступает в котел-утилизатор для нагрева до кипения и испарения, далее в паровидном виде поступает в каталитическую горелку, куда поступает и нагретый в котле-утилизаторе воздух. При коэффициенте расхода воздуха $\alpha = 0,5$ происходит конверсия метанола с образованием синтез-газа. Далее синтез-газ в охладителе 4 охлаждается с $988\text{ }^\circ\text{C}$ до $700\text{ }^\circ\text{C}$ воздухом, подаваемым в катодный канал. Воздух нагревается с $20\text{ }^\circ\text{C}$ до $600\text{ }^\circ\text{C}$.

Далее синтез-газ поступает в анодный канал. Из этого канала водород диффузией поступает в анод, где окисляется кислородом воздуха, подаваемого в катодный канал. Продукты окисления водорода выходят в анодный канал. Продукты из анодного канала и обедненный кислородом воздух из катодного канала поступают в котел-утилизатор, где окисляется не поступивший в анод водород. Тепло окисления используется на подогрев первичного воздуха и испарение метанола. Продукты сгорания из котла-утилизатора поступают в подогреватель салона, а из него при температуре $120\text{ }^\circ\text{C}$ удаляются в выхлопную трубу.

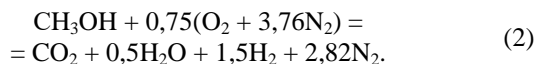
3. Моделирование процессов в элементах технологической схемы

Полное окисление метанола при коэффициенте расхода воздуха $\alpha = 1$ описывается стехиометрическим уравнением.



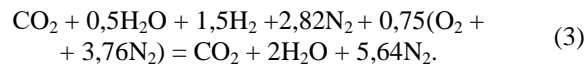
Теплота окисления метанола по уравнению (1) $Q_{\text{H}}^{\text{P}} = 21\,131\text{ кДж/(кг метанола)}$.

Синтез-газ получается при окислении метанола воздухом при коэффициенте расхода $\alpha = 0,5$ по стехиометрическому уравнению:



Экзотермический эффект этой реакции $q_{1x} = -2\,320\text{ кДж на 1 кг синтез-газа}$. Состав синтез-газа: $r_{\text{H}_2} = 25,8$; $r_{\text{CO}_2} = 17,2$; $r_{\text{H}_2\text{O}} = 8,5$; $r_{\text{N}_2} = 48,5$ (% , объемные).

Теплота окисления синтез-газа определяется из стехиометрического уравнения:



$q_x = 2\,689,9\text{ кДж/(кг синтез-газа)}$.

По предварительному расчету для ЭХГ электрической мощностью $Q_3 = 10\text{ кВт}$ потребуется расход синтез-газа с теплотой сгорания $q_x = 2\,689,9\text{ кДж/(кг синтез-газа)}$ и электрическим КПД батареи ТОТЭ $\eta^* = 0,786$ [25, 26].

$$B_{\text{CT}} = Q_3 / (q_x \eta^*), \text{ кг/с}. \quad (4)$$

Для производства B_{CT} в каталитическую горелку необходимо ввести метанола

$$G_{\text{M}} = B_{\text{CT}} \cdot (32 / 134,96), \text{ кг/с}, \quad (5)$$

и первичного воздуха

$$G_{\text{B1}} = G_{\text{M}} \cdot (102,96 / 32), \text{ кг/с}. \quad (6)$$

Электрический КПД ЭХГ (брутто)

$$\eta_s = 10^2 \cdot 10 / (G_{\text{M}} \cdot Q_{\text{H}}^{\text{P}}) \%. \quad (7)$$

4. Тепловой баланс каталитической горелки

Приход теплоты от неполного сгорания метанола q_{x1} с учетом потерь с химическим недожогом (q_3) и в окружающую среду (q_5) $q_{x1} \cdot (1 - q_3 - q_5)$, от нагретого в котле-утилизаторе первичного воздуха (q_{B1}) и пара метанола $q_{\text{п}}$, расходуется на подогрев синтез-газа $C_{\text{CT}} \cdot t$:

$$q_{x1} \cdot (1 - q_3 - q_5) + q_{B1} + q_{\text{п}} = C_{\text{CT}} \cdot t. \quad (8)$$

Теплота, вносимая первичным воздухом,

$$q_{B1} = C_{\text{B}} \cdot t_1 \cdot (102,96 / 134,96)\text{ кДж/(кг синтез-газа)}; \quad (9)$$

теплота, вносимая с паром метанола,

$$q_{\text{п}} = C_{\text{п}} \cdot t_{\text{кип}} \cdot (32 / 134,96)\text{ кДж/(кг синтез-газа)}, \quad (10)$$

где t_1 – температура нагрева первичного воздуха в котле-утилизаторе до $100\text{ }^\circ\text{C}$, $t_{\text{кип}} = 64,5\text{ }^\circ\text{C}$ – температура кипения метанола; C_{B} , $C_{\text{п}}$ – удельные истинные теплоемкости воздуха и пара метанола, $1,01\text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$ и $2,3\text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$ соответственно.

На основе уравнения (8) определяется температура синтез-газа на выходе из каталитической горелки ($t(C_{\text{CT}} = 1,64\text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$) при температуре t ; $q_3 = 0,05$; $q_5 = 0,3$ (приняты).

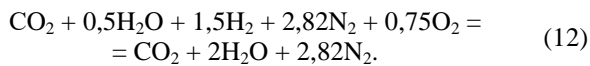
Химический КПД каталитической горелки

$$\eta_X = B_{CT} \cdot q_X \cdot 10^2 / (G_M \cdot Q_H^P) \% \quad (11)$$

5. Синтез-газ в батарее ТОТЭ

Охлажденный в теплообменнике 4 (см. рис. 2) до температуры $t_3 = 700 \text{ }^\circ\text{C}$, синтез-газ поступает в анодный канал, а катодный воздух нагретый в том же теплообменнике до температуры $t_2 = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ поступает в катодный канал (определены из уравнения теплового баланса рекуператора 4).

В аноде батареи ТОТЭ окисление водорода кислородом, поступающим из электролита, описывается стехиометрическим уравнением (в предположении, что весь водород окисляется):



Экзотермический эффект реакции (12) при стандартных параметрах

$$\Delta H_1^0 = -2689,9 \text{ кДж/(кг синтез-газа)}$$

Температура продуктов окисления в аноде определена экспериментально [6]:

$$T_3^* = t_3^* + 273 = 777 + 273 = 1050 \text{ К} \quad (13)$$

Приращение энергии Гиббса для реакции (12) при температуре 1050 К $\Delta G = 190000 \text{ кДж/(кмоль воды)}$.

ЭДС одного планарного элемента

$$E_3 = \Delta G / (2F), \text{ В} \quad (14)$$

где $F = 9,648 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}$ – число Фарадея.

Топливные элементы обычно работают при изобарно-изотермических условиях. Работа в изобарно-изотермическом процессе равна убыли свободной энергии Гиббса [24], а электрическая мощность равна убыли свободной энергии Гиббса ΔG , кДж/(кг синтез-газа) при T_3^* , умноженной на расход синтез-газа B_{CT} , кг/с:

$$Q_3 = \Delta G_{1050\text{К}} \cdot B, \text{ кВт} \quad (15)$$

где $\Delta G_{1050\text{К}} = 1,5 \cdot 190 \cdot 10^3 / 134,96 = 2111$, кДж/(кг синтез-газа) при $T_3^* = 1050 \text{ К}$, где 1,5 кмольей водорода в уравнении (12).

С другой стороны, электрическая мощность [6]

$$Q_3 = B_{CT} \cdot q_X \cdot \eta, \text{ кВт} \quad (16)$$

Приравняв выражения (15) и (16), определяем электрический КПД (брутто) батареи ТОТЭ $\eta^* = 0,784$. Сравнение с опубликованными аналогичными данными [25, 26] дает удовлетворительные результаты.

6. Тепловой баланс электрохимической части энергетической установки

Мощность, выделенная при окислении водорода в аноде батареи ТОТЭ $B_{CT} \cdot \Delta H_1^0 \cdot \phi$, внесенная синтез-газом, выходящим из охладителя 4 (см. рис. 2) в анодный канал $B_{CT} \cdot C_{CT} \cdot t_3$, и воздухом, поступающим из котла-утилизатора в катодный канал $G_B \cdot C_B \cdot t_2$, равна электрической мощности, отводимой от батареи ТОТЭ Q_3 , мощности частично окисленного синтез-газа, выходящего из анодного канала $B_{CT}^* \cdot C_{CT}^* \cdot t_3^*$, и воздуха, выходящего из катодного канала $G_B^* \cdot C_B^* \cdot t_2^*$, где ϕ – доля окисленного в аноде водорода.

$$B_{CT} \cdot \phi \cdot \Delta H_1^0 + B_{CT} \cdot C_{CT} \cdot t_3 + G_B \cdot C_B \cdot t_2 = Q_3 + C_{CT}^* \cdot B_{CT}^* \cdot t_3^* + C_B^* \cdot G_B^* \cdot t_2^* \quad (17)$$

Температура синтез-газа на входе в анодный канал t_3 принимается $700 \text{ }^\circ\text{C}$, удельная истинная изобарная теплоемкость синтез-газа при $700 \text{ }^\circ\text{C}$ $C_{CT} = 1,557 \text{ кДж/(К} \cdot \text{кг)}$. Определена из уравнения (2).

Расход синтез-газа на выходе из анодного канала найден из уравнения (12):

$$B_{CT}^* = B_{CT} \cdot 158,96 / 134,96, \text{ кг/с} \quad (18)$$

Удельная истинная изобарная теплоемкость синтез-газа на выходе из анодного канала при температуре $t_3^* = 777 \text{ }^\circ\text{C}$ $C_{CT}^* = 1,36 \text{ кДж/(кг синтез-газа)}$ найдена из уравнения (12).

Расход воздуха на входе в катодный канал определяется из уравнения (3) в предположении, что весь водород окисляется в аноде:

$$G_B = B_{CT} \cdot (102,96 / 134,96), \text{ кг/с} \quad (19)$$

Температура воздуха на входе в катодный канал t_2 принимается на $100 \text{ }^\circ\text{C}$ меньше t_3 , то есть $t_2 = t_3 - 100 = 700 - 100 = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ для охлаждения анода. Удельная истинная изобарная теплоемкость воздуха на входе в катодный канал при $600 \text{ }^\circ\text{C}$, $C_B = 1,115 \text{ кДж/(К} \cdot \text{кг)}$.

Расход обедненного кислородом воздуха на выходе из катодного канала $0,75(\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2) - 0,75 \text{ O}_2 = 2,82\text{N}_2$:

$$G_B^* = B_{CT} \cdot (78,96 / 134,96), \text{ кг/с} \quad (20)$$

Температура воздуха на выходе из катодного канала t_2^* принимается на $100 \text{ }^\circ\text{C}$ меньше температуры t_3^* для охлаждения анода, то есть $t_2^* = t_3^* - 100 = 777 - 100 = 677 \text{ }^\circ\text{C}$. Удельная истинная изобарная теплоемкость воздуха на выходе из катодного канала при температуре $677 \text{ }^\circ\text{C}$ $G_B^* = 1,161 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$:



$$B_{CT} = 4,74 \cdot 10^{-3}, \text{ кг/с}; \Delta H_1^0 = -2\,689,9, \text{ кДж/(кг синтез-газа)}; Q_3 = 10,0 \text{ кВт.}$$

Подстановкой в уравнение (17) перечисленных величин определяется доля окисленного водорода $\phi_T = 0,828$ (82,2 %). Сравнение с данными [6] дает удовлетворительную сходимость. Такая большая доля ϕ_T связана с большой разницей концентраций водорода в анодном канале и аноде, так как диффузный поток прямо пропорционально зависит от разности концентраций.

7. Моделирование процессов в котле-утилизаторе

7.1. Баланс мощности котла-утилизатора

Мощность, приходящая с продуктами из анодного канала $C_{CT}^* B_{CT}^* t_3^*$ с воздухом из катодного канала $C_B^* G_B^* t_2^*$, выделившаяся при окислении недоокисленного в аноде водорода $(1 - \phi) \cdot \Delta H_1 \cdot B_{CT}$, с первичным воздухом, поступающим в каталитическую горелку $G_{B1} C_{B1} t_B$, с метанолом $G_M C_M t_M$, расходуется на нагрев первичного воздуха $G_{B1} C_{B1} t_1$, на нагрев до кипения и испарения метанола $G_M [C_M (t_{кип} - t_M) + r_M]$ и на нагрев уходящих продуктов сгорания из котла-утилизатора $G_{yx} C_{yx} t_{yx}$:

$$C_{CT}^* B_{CT}^* t_3^* + C_B^* G_B^* t_2^* + (1 - \phi) \Delta H_1 B_{CT} - G_{B1} C_{B1} (t_1 - t_B) - G_M [C_M (t_{кип} - t_M) + r_M] - G_{yx} C_{yx} t_{yx} = 0. \quad (21)$$

Параметры, входящие в уравнение (21) следующие: $G_{yx} = G_B^* + B_{CT}^* = (2,77 + 5,58) \cdot 10^{-3} = 8,35 \cdot 10^{-3}$, кг/с, расход уходящих из котла-утилизатора продуктов сгорания, удельная относительная истинная теплоемкость уходящих газов при 250 °C $C_{yx} = 1,306$ кДж/(К·кг), температура кипения метанола $t_{кип} = 64,5$ °C, $t_M = 20$ °C, $t_1 = 100$ °C, $C_M = 2,3$ кДж/(К·кг), теплота испарения метанола $r_M = 6\,414$ кДж/кг, $G_M = 1,123 \cdot 10^{-3}$ кг/с.

Подстановка в уравнение (21) известных параметров позволяет определить температуру уходящих газов из котла-утилизатора $t_{yx} = 250$ °C и абсолютную мощность Q_2 с уходящими газами 2,73 кВт. Относительная потеря с уходящими газами из котла-утилизатора

$$q_2 = Q_2 \cdot 10^2 / (B_{CT} \cdot q_X), \%, \quad (22)$$

Химический недожог в котле-утилизаторе $q_2 = 0$ (допущение).

Мощность подогревателя салона

$$Q_{сп} = G_{yx} C_{yx} (t_{yx}^* - t_{yx}^*), \text{ кВт}, \quad (23)$$

где $t_{yx}^* = 120$ °C – температура уходящих газов после подогревателей салона.

Потеря от химического недожога в КУ принята равной нулю.

Коэффициент использования метанола [11] в энергоустановке

$$\eta_{исп} = (Q_3 + Q_{сп}) / (G_M \cdot Q_H^p). \quad (24)$$

Расход метанола на выработку электрической энергии

$$G_3 = Q_3 \cdot 1 \cdot 3600 / (\eta_{исп} \cdot Q_H^p), \text{ кг/ч.} \quad (25)$$

Удельный расход метанола на выработку электрической энергии

$$b_3 = G_3 / (Q_3 \cdot 1), \text{ кг/кВт·ч.} \quad (26)$$

Расход метанола на отпуск теплоты в тепловые сети

$$G_T = Q_{сп} \cdot 1 \cdot 3600 / (\eta_{исп} \cdot Q_H^p), \text{ кг/ч.} \quad (27)$$

Удельный расход метанола на выработку теплоты, отпускаемой в тепловые сети,

$$b_T = G_T \cdot 10^6 / (Q_{сп} \cdot 1 \cdot 3600), \text{ кг/ГДж.} \quad (28)$$

Небаланс расхода метанола

$$\Delta G_M = G_M - (G_3 + G_T) / 3600. \quad (29)$$

7.2. Баланс мощности ЭХГ

Входящая мощность

$$Q_{ВХ} = \eta_X \cdot G_M \cdot Q_H^p, \text{ кВт.} \quad (30)$$

Выходящая мощность

$$Q_{ВЫХ} = Q_3 + Q_{yx}, \text{ кВт.} \quad (31)$$

Небаланс мощности

$$\Delta Q = Q_{ВЫХ} - Q_{ВХ}, \text{ кВт.} \quad (32)$$

7.3. Материальный баланс ЭХГ

Расход реагентов на входе

$$G_{ВХ} = G_M + G_{B1} + G_B, \text{ кг/с.} \quad (33)$$



Расход реагентов на выходе

$$G_{\text{ВЫХ}} = B_{\text{СТ}}^* + G_{\text{В}}^*, \text{ кг/с.} \quad (34)$$

$$\Delta G = G_{\text{ВЫХ}} - G_{\text{ВХ}}, \text{ кг/с.} \quad (35)$$

Результаты расчета сведены в таблицу.

Небаланс расхода

Таблица

Результаты расчетов для номинального режима работы энергоустановки

Table

The results of calculations for the nominal mode of operation of the power plant

Наименование характеристики	Обозначение	Размерность	Формула	Значение
Расход синтез-газа	$B_{\text{СТ}}$	кг/с	(4)	$4,74 \cdot 10^{-3}$
Расход метанола	$G_{\text{М}}$	кг/с	(5)	$1,123 \cdot 10^{-3}$
Расход первичного воздуха	$G_{\text{В1}}$	кг/с	(6)	$3,62 \cdot 10^{-3}$
Электрический КПД ЭХГ	$\eta_{\text{б}}$	(%)	(7)	42,1
Теплота от первичного воздуха, поступающего в горелку	$q_{\text{в1}}$	кДж/кг	(9)	77
Теплота, внесенная паром метанола	$q_{\text{п}}$	кДж/кг	(10)	35
Температура синтез-газа на выходе из каталитической горелки	t	°С	(8)	988
Химический КПД каталитической горелки	$\eta_{\text{х}}$	%	(11)	53,7
Температура продуктов окисления водорода в аноде	t_3^*	К, °С	(13)	1050 777
ЭДС одного планарного элемента	E_0	В	(14)	0,985
Электрическая мощность батареи ТОТЭ	Q_3	кВт	(15)	10
Электрический КПД батареи ТОТЭ	η	%	(16)	78,4
Расход синтез-газа на выходе из анодного канала	$B_{\text{СТ}}^*$	кг/с	(18)	$5,58 \cdot 10^{-3}$
Расход воздуха в катодный канал	$G_{\text{В}}$	кг/с	(19)	$3,616 \cdot 10^{-3}$
Расход обедненного кислородом воздуха на выходе из катодного канала	$G_{\text{В}}^*$	кг/с	(20)	$2,77 \cdot 10^{-3}$
Доля окисленного в аноде водорода	φ	%	(17)	82,2
Температура, уходящих из котла-утилизатора газов	$t_{\text{ух}}$	°С	(21)	250
Относительные потери с уходящими из котла-утилизатора газами	q_2	(%)	(22)	21,4
Мощность подогревателя салона	$Q_{\text{СП}}$	кВт	(23)	1,417
Коэффициент использования метанола в энергоустановке	$\eta_{\text{ИСП}}$	(%)	(24)	48,1
Абсолютный расход метанола на выработку электроэнергии	G_0	кг/ч	(25)	3,54
Удельный расход метанола на выработку электроэнергии	b_0	кг/кВт·ч	(26)	0,354
Абсолютный расход метанола на выработку тепловой энергии	GT	кг/ч	(27)	0,5
Удельный расход метанола на выработку тепловой энергии	b_T	кг/ГДж	(28)	98
Небаланс расхода метанола	$\Delta G_{\text{М}}$	кг/с	(29)	0
Входящая в ЭХГ мощность	$Q_{\text{ВХ}}$	кВт	(30)	12,74
Выходящая мощность	$Q_{\text{ВЫХ}}$	кВт	(31)	12,73
Небаланс мощности	ΔQ	кВт	(32)	0,01
Расход реагентов на входе в ЭХГ	$G_{\text{ВХ}}$	кг/с	(33)	8,359
Расход реагентов на выходе из ЭХГ	$G_{\text{ВЫХ}}$	кг/с	(34)	8,35
Небаланс расхода	ΔG	кг/с	(35)	0,009



8. Обсуждение результатов исследования

Расчеты параметров схемы энергетической установки показали, что электрический КПД равен 42,1 %, КПД батареи ТОТЭ 78,4 %, что согласуется с данными [25, 26]. Уровень температуры в аноде составляет 777 °С и ЭДС – 0,985 В одного планарного топливного элемента, что находится в интервале значений, приведенных в [6, 7]; доля окисленного водорода в аноде составляет 82,2 % и соответствует данным [6, 24]. Удельные расходы условного топлива на выработку электрической энергии равны 0,255 кг у.т./кВт·ч и тепловой энергии – 70,6 кг у.т./ГДж, что согласуется с данными [27].

9. Заключение

Метанол возможно применять для работы электрохимического генератора простой конструкции на базе ТОТЭ.

Теплота сгорания продуктов воздушной конверсии метанола составляет 2 689,9 кДж/(кг синтез-газа); химический КПД каталитической горелки – 53,7 %; ЭДС топливного элемента – 0,985 В; доля водорода, окисленного в аноде, – 82,2 %; температура окисления водорода в аноде ТОТЭ – 777 °С; КПД батареи ТОТЭ – 78,4 %. Электрическая мощность ЭХГ равна 10 кВт; электрический КПД ЭХГ – 42,1 %; температура уходящих газов из котла-утилизатора – 250 °С; удельная потеря с уходящими газами из котла-утилизатора – 21,4 %.

Удельные расходы метанола:

- на производство электрической энергии $G_{\text{Э}} = 0,354$ кг/кВт·ч (0,255 кг у.т./кВт ч);
- тепловой энергии $G_{\text{Т}} = 98$ кг/ГДж (70,6 кг у.т./ГДж).

Полученные результаты показали, что по энергетической эффективности применение метанола для работы электрохимического генератора для энергетической установки транспортного средства соответствует уровню лучших современных двигателей внутреннего сгорания.

Благодарности

Статья подготовлена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Контракт №02.А03.21.0006).

Acknowledgments

This article has been prepared with the financial support of the Government of the Russian Federation (Contract No. 02.A03.21.0006).

Список литературы

- [1] Шпильрайн, Э.Э. Введение в водородную энергетику / Э.Э. Шпильрайн, С.П. Малышенко, Г.Г. Кулешов. – М.: Энергоатомиздат. – 1984. – 264 с.
- [2] Shcheklein, S.E. Stoichiometric analysis of air oxygen consumption in modern vehicles using natural

and synthetic fuels / S.E. Shcheklein, A.M. Dubinin // IOP Conf. Series. – 2018. – Vol. 177. – P. 012020.

[3] Shcheklein, S.E. Analysis of nitrogen oxide emissions from modern vehicles using hydrogen or other natural and synthetic fuels in combustion chamber / S.E. Shcheklein, A.M. Dubinin // International Journal of Hydrogen Energy. – 2020. – Vol. 45. – P. 1151–1157.

[4] Щеклеин, С.Е. Исследование влияния вида топлива на энергетические показатели электрохимического генератора в составе когенерационной установки / Щеклеин С.Е., Дубинин А.М. // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2018. – № 16–18. – С. 12–22.

[5] Peters, R. Analysis of solid-oxide fuel cell system concepts with anode recycling/ R. Peters [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2013. – Vol. 38. – P. 6809–6815.

[6] Мунц В.А. Исследование характеристик энергетической установки 5 кВт на твердоокисных топливных элементах с паровым риформингом природного газа / В.А. Мунц [и др.] // Теплоэнергетика. – 2015. – № 11. – С. 15–20.

[7] Halinen, M. Experimental analysis on performance and durability of SOFC demonstration unit / M. Halinen [et al.] // Fuel Cells. – 2010. – Vol. 10. – No. 3. – P. 440.

[8] Weber, A. Materials and concepts for solid oxide fuel cells (SOFCs) in stationary and mobile applications / A. Weber, E. Ivers-Tiffée // Journal of Power Sources. – 2004. – Vol. 127. – P. 273–283.

[9] Коровин, Н.В. Топливные элементы и электрохимические энергоустановки: состояние развития и проблемы / Н.В. Коровин // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2004. – № 10. – С. 8–14.

[10] Липилин, А.С. Состояние и будущее индивидуальной энергетики / А.С. Липилин // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2009. – № 9. – С. 139–152.

[11] Veziroglu, T.N. 21st century's energy: hydrogen energy system / T.N. Veziroglu, S. Sahin // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2019. – № 4–6. – С. 14–27.

[12] Гольцов, В.А. Современное состояние водородной экономики и водородного транспорта: экономика, технологии / В.А. Гольцов [и др.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). Спецвыпуск. – 2003. – P. 21–22.

[13] Гусев, А.Л. Экономическая, энергетическая, экологическая и геополитическая безопасность в России в XXI веке. Нужна ли водородная энергия в России? / А.Л. Гусев, Ю.П. Дядученко, В.М. Чертов // Экономика, экология и общество в России в XXI веке. – С.-Пб., 2004. – Т. 1.

[14] Гусев А.Л., Исмагилов З.Р. [и др.] Проект МНТЦ № 3937. Топливный процессор на основе биоэтанола. Разработка топливного процессора для



паровой конверсии биоэтанола, производящего 5 м³ синтез-газа в час для электростанций на основе топливных элементов [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<http://www.istc.int/ru/project/687CE14D98BE75D5C3257543003F4C79> – (Дата обращения: 15.04.2020).

[15] Чертов, В.М. Авто-катализаторы или электрохимические генераторы водорода? / В.М. Чертов, А.Л. Гусев // Драгоценные металлы. Драгоценные камни. – 2004. – Т. 6. – № 126. – С. 80–85.

[16] Гусев, А.Л. Основные экологические проблемы Нижегородской области и пути развития водородной экономики / А.Л. Гусев // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2006. – № 1. – С. 13–25.

[17] Bruce, A. Babcock The Impact of US Biofuel Policies on Agricultural Price Levels and Volatility / A. Bruce // International Centre for Trade and Sustainable Development (ICTSD). – 2011. – Issue Paper No. 35. – 38 p.

[18] Дубинин, А.М. Минитеплоэлектроцентральный на основе реактора для воздушной конверсии метана и электрохимического генератора / А.М. Дубинин, С.Е. Щеклеин // Теоретические основы химической технологии. – 2019. – Т. 53. – № 1. – С. 78–86.

[19] Shcheklein, S.E. Thermodynamic modeling of cogeneration mini CHP using air conversion of diesel fuel and electrochemical generator / S.E. Shcheklein, A.M. Dubinin // International Journal of Energy Production and Management. – 2019. – Vol. 4. – P. 273–286.

[20] Shcheklein, S.E. Production of liquid fuel from wood / S.E. Shcheklein, A.M. Dubinin // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management (SGEM). – 2019. – Vol. 9. – P. 409–416.

[21] Shcheklein, S.E. Steam gasification of waste tires for the purpose of methanol production / S.E. Shcheklein, A.M. Dubinin, A.V. Matveev // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management (SGEM). – 2018. – Vol. 18. – P. 175–182.

[22] Shcheklein, S.E. Methanol production based on direct-flow gas generator and nuclear reactor / S.E. Shcheklein, A.M. Dubinin // Atomic Energy. – 2018. – Vol. 124. – P. 91–97.

[23] Olah, G.A. Beyond oil and gas: the methanol economy / G.A. Olah, A. Goepfert, G.K. Surya Prakash // Weinheim, WILEY-VCH Verlag. – 2009. – 350 p.

[24] Баскаков, А.П. Физико-химические основы тепловых процессов / А.П. Баскаков, Ю.В. Волкова. – М.: Теплотехник. – 2013. – 173 с.

[25] Коровин, Н.А. Топливные элементы и электрохимические энергоустановки / Н.А. Коровин. – М.: Изд. МЭИ. – 2005. – 278 с.

[26] Собянин, В.А. Высокотемпературные твердоокисные топливные элементы и конверсия метана / В.А. Собянин // Российский Химический Журнал (Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева). – 2003. – Т. 47. – № 6. – С. 62–70.

[27] Яковлев, Б.В. Повышение эффективности систем теплофикации и теплоснабжения / Б.В. Яковлев. – М.: Новости теплоснабжения, 2008. – 448 с.

References

[1] Shpil'rajn E.E., Malysenko S.P., Kuleshov G.G. Introduction to hydrogen energy (Vvedenie v vodorodnyuyu energetiku). Moscow: Energoatomizdat Publ., 1984; 264 p. (in Russ.).

[2] Shcheklein S.E., Dubinin A.M. Stoichiometric analysis of air oxygen consumption in modern vehicles using natural and synthetic fuels/IOP Conf. Series: 177:012020 (in Eng.).

[3] Shcheklein S.E., Dubinin A.M. Analysis of nitrogen oxide emissions from modern vehicles using hydrogen or other natural and synthetic fuels in combustion chamber. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020;45(1):1151–1157 (in Eng.).

[4] Shcheklein S.E., Dubinin A.M. The investigation of fuel type influence on the energy indicators of the electrochemical generator in the cogeneration unit (Issledovanie vliyaniya vida topliva na energeticheskie pokazateli elektrohimicheskogo generатора v sostave kogeneracionnoj ustanovki). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2018;16–18:12–22 (in Russ.).

[5] Peters R., Deja R., Blum L., Pennanen J., Kiviahio J., Hakala T. Analysis of solid-oxide fuel cell system concepts with anode recycling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013;38(16):6809–6820 (in Eng.).

[6] Munc V.A., Volkova YU.V., Plotnikov N.S., Dubinin A.M. i dr. Studying the characteristics of a 5 kW power installation on solid-oxide fuel cells with steam reforming of natural gas (Issledovanie harakteristik energeticheskoy ustanovki 5 kVt na tverdookisnyh toplivnyh elementah s parovym riformingom prirodnoy gaza). *Teploenergetika*, 2015;62(11):15–20 (in Russ.).

[7] Halinen M., Saarinen J., Noponen M. I., Vinke C., Kiviahio J. *Experimental analysis on performance and durability of SOFT demonstration unit. Fuel Cells*, 2010;10(3):440 (in Eng.).

[8] Weber A., Ivers-Tiffée E. Materials and concepts for solid oxide fuel cells (SOFCs) in stationary and mobile applications. *Journal of Power Sources*, 2004;127(1–2):273–283 (in Eng.).

[9] Korovin N.V. Fuel cells and electrochemical power plants: state of development and problems (Toplivnye elementy i elektrohimicheskie energoustanovki: sostoyanie razvitiya i problem). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2004;(18)10:8–14 (in Russ.).

[10] Lipilin A.S. The state and future of individual energy (Sostoyanie i budushchee individual'noy energetiki). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2009;(77)9:139–152 (in Russ.).

[11] Veziroglu T.N., Sahin S. 21st century's energy: hydrogen energy system. *International Scientific Journal*



for *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2019;4-6:14-27 (in Eng.).

[12] Gol'cov V.A., Veziroglu T.N., Gol'cova L.F., Gusev A.L. The current state of the hydrogen economy and hydrogen transport: economy, technology (Sovremennoe sostoyanie vodorodnoj ekonomiki i vodorodno-go transporta: ekonomika, tekhnologii). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2003;(S1):21-22 (in Russ.).

[13] Gusev A.L., Dyaduchenko Yu.P., Chertov V.M. Do hydrogen energy in Russia need? (Nuzhna li vodorodnaya energiya v Rossii?). *Ekonomika, ekologiya i obshchestvo v Rossii v XXI veke. S.-Pb.*: 2004; Vol. 1. (in Russ.).

[14] Gusev A.L., Ismagilov Z.R. et al. Proekt MNTC No. 3937. Development of a bioethanol steam reforming fuel producing 5m³ of pyngas per hour for fuel-cell-based power plants (Toplivnyj processor na osnove bioetanola. Razrabotka toplivnogo processora dlya parovoj konversii bioetanola, proizvodnyashchego 5 m³ sintezgaza v chas dlya elektrostancij na osnove toplivnyh elementov) [E-resource]. Available on: <http://www.istc.int/ru/project/687CE14D98BE75D5C3257543003F4C79> (04.15.2020) (in Russ.).

[15] Chertov V.M., Gusev A.L. Auto-catalysts or electrochemical hydrogen generators? (Avto-katalizatory ili elektrohimicheskie generatory vodoroda?). *Dragocennye metally. Dragocennye kamni*, 2004;126(6):80-85 (in Russ.).

[16] Gusev A.L. The main environmental problems of Nizhny Novgorod region and the way of transition to a hydrogen economy (Osnovnye ekologicheskie problemy Nizhegorodskoj oblasti i puti razvitiya vodorodnoj ekonomiki). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2006;33(1):13-25 (in Russ.).

[17] Babcock B.A. The Impact of US Biofuel Policies on Agricultural Price Levels and Volatilit. International Centre for Trade and Sustainable Development (ICTSD). 2011; Issue Paper No. 35: 38 (in Eng.).

[18] Dubinin A.M., Shcheklein S.E. A heat electro-power ministration based on both a reactor for air methane conversion and an electrochemical generator (Miniteploelektrocentral' na osnove reaktora dlya

vzduшной konversii metana i elektrohimicheskogo generatora). *Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii*, 2019;53(1):78-86 (in Russ.).

[19] Shcheklein S.E., Dubinin A.M. Thermodynamic modeling of cogeneration mini CHP using air conversion of diesel fuel and electrochemical generator. *International Journal of Energy Production and Management*, 2019; 4(4):273-286 (in Eng.).

[20] Shcheklein S.E., Dubinin A.M. Production of liquid fuel from wood. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management (SGEM)*, 2019;19(4.1):409-416 (in Eng.).

[21] Shcheklein S.E., Dubinin A.M., Matveev A.V. Steam gasification of waste tires for the purpose of methanol production. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management (SGEM)*, 2018;18(4.2):175-182 (in Eng.).

[22] Shcheklein S.E., Dubinin A.M. Methanol production based on direct-flow gas generator and nuclear reactor. *Atomic Energy*, 2018;124(2):91-97 (in Eng.).

[23] Olah G.A., Goepfert A., Surya Prakash G.K. Beyond oil and gas: the methanol economy. Weinheim, WILEY-VCH Verlag, 2009; 350 p. (in Eng.).

[24] Baskakov A.P., Volkova Yu.V. Physics and chemical foundations of thermal processes (Fiziko-himicheskie osnovy teplovyh processov). Moscow: Teploekhn Publ., 2013; 173 p. (in Russ.).

[25] Korovin N.A. Fuel cells and electrochemical power plants (Toplivnye elementy i elektrohimicheskie energoustanovki). Moscow: Izd. MEI, 2005; 278 p. (in Russ.).

[26] Sobyenin V.A. High-temperature solid-oxy fuel cells and methane conversion (Vysokotemperaturnye tverdookisnye toplivnye elementy i konversiya metana). *Rossijskij Himicheskij Zhurnal (Zhurnal Rossijskogo himicheskogo obshchestva im. D.I. Mendeleeva)*, 2003; 47(6):62-70. (in Russ.).

[27] Yakovlev, B.V. Improving the efficiency of heating and heating systems (Povyshenie effektivnosti sistem teplofikacii i teplosnabzheniya). Moscow: Novosti teplosnabzheniya Publ., 2008; 448 p. (in Russ.).

Транслитерация по BSI