



СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

SOLAR ENERGY

СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

SOLAR POWER PLANTS

Статья поступила в редакцию 30.05.18. Ред. рег. № 2662

The article has entered in publishing office 30.05.18. Ed. reg. No. 2662

УДК 536.7 (075.8)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИДА ТОПЛИВА НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА В СОСТАВЕ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ*

С.Е. Щеклеин, А.М. Дубинин

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

doi: 10.15518/isjaee.2018.16-18.012-022

Заключение совета рецензентов: 05.06.18 Заключение совета экспертов: 08.06.18 Принято к публикации: 14.06.18

Представлена универсальная методика, которая даёт возможность рассчитывать: расход синтез-газа и топлива для заданной электрической мощности; температуру в аноде; коэффициент использования топлива; удельные расходы условного топлива по выработке электрической и тепловой энергии; коэффициент полезного действия электрохимического генератора для различных видов природного топлива (метан, уголь, нефтепродукты и др.) и переработанных (метанол, этанол и др.) в синтез-газ с последующим использованием его в ТОТЭ. Исследовано влияние вида топлива: водорода, метана, моторного дизельного топлива, этанола, автомобильного бензина и метанола – на коэффициент использования топлива, удельные расходы на производство электрической и тепловой энергии, коэффициенты полезного действия каталитической горелки, батареи ТОТЭ и электрохимического генератора.

Общий уровень коэффициента использования топлива для энергетической установки когенерационного типа на основе ТОТЭ с водородным топливом и метаном превосходит уровень современных парогазовых теплоэлектроцентралей, а при использовании дизеля, этанола, бензина и метанола – когенерационных теплоэлектроцентралей на базе двигателей внутреннего сгорания. По максимальному коэффициенту использования топлива и минимальному расходу топлива на производство электрической и тепловой энергии на первом месте находится водород, затем по порядку убывания энергетических показателей следуют метан, дизельное топливо, этанол, бензин и метанол. Показано, что по уровню энергетических показателей самым лучшим топливом является водород, а худшим – метанол. Для водорода коэффициент использования топлива и удельные расходы топлива на производство электрической и тепловой энергии, отпускаемой в тепловые сети, составляют 1; 0,122 кг у.т./кВт·ч и 34 кг у.т./ГДж соответственно, а для метанола – 0,359; 0,475 кг у.т./кВт·ч и 83,7 кг у.т./ГДж. Для других видов топлива упомянутые энергетические показатели лежат между указанными значениями.

Ключевые слова: электрохимический генератор; коэффициент использования топлива; удельный расход топлива; водород; метан; дизельное топливо; этанол; бензин; метанол.

*Щеклеин С.Е., Дубинин А.М. Исследование влияния вида топлива на энергетические показатели электрохимического генератора в составе когенерационной установки // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;16-18:12-22.



THE INVESTIGATION OF FUEL TYPE INFLUENCE ON THE ENERGY INDICATORS OF THE ELECTROCHEMICAL GENERATOR IN THE COGENERATION UNIT

S.E. Shcheklein, A.M. Dubinin

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

doi: 10.15518/isjgae.2018.16-18.012-022

Referred 5 June 2018 Received in revised form 8 June 2018 Accepted 14 June 2018

The paper presents a generic technique to calculate the consumption of synthetic gas and fuel for the specified electrical power, temperature in the anode fuel utilization factor, specific expenses of fuel equivalent to develop electric and thermal energy, power efficiency for various natural fuels (methane, coal, petroleum products, etc.) and synthesized ones (methanol, ethanol, etc.) in synthesis gas with subsequent use of it in the SOFC.

The paper researches into the influence of fuel types: hydrogen, methane, motor diesel fuel, ethanol, gasoline and methanol – on fuel utilization factor, specific expenses for the production of electrical and thermal energy, efficiencies of the catalytic burner, fuel cell solid-oxide battery and electrochemical generator. The overall level of fuel utilization for the cogeneration power plant based on SOFC with hydrogen fuel and methane surpasses the level of modern combined-cycle cogeneration plant, and with diesel, ethanol, gasoline, and methanol surpasses the level of cogeneration combined heat and power plant CHPP on the basis of the internal combustion engine.

The investigation has shown that the best fuel is hydrogen and the worst is methanol on the level of energy performance.

For hydrogen, fuel utilization factor and specific expenses of fuel for production of electric and thermal energy releasing in heat networks equal to 1; 0.122 kg equivalent fuel/kWh and 34 kg of equivalent fuel/GJ, respectively, while for methanol, these indicators equal to 0.359; 0.475 kg equivalent fuel/kWh and 83,7 kg of equivalent fuel/GJ. For other fuel types, these energy indicators lie between the specified values.

Key words: electrochemical generator; fuel utilization; specific consumption of fuel; hydrogen; methane; diesel; ethanol; gasoline; methanol.



*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 350, включая 2 монографии, 20 изобретений.

h-index 11

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 350, including 2 monographs, 20 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, 6 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 before 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, 6 inventions.
h-index 4.

1. Введение

Создание эффективных высокотемпературных твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ), которые способны вырабатывать электрическую энергию из водорода, содержащегося в синтез-газе, привело к интенсивному развитию работ по преобразованию природных (метан, уголь, нефтепродукты и пр.) и переработанных (метанол, этанол и пр.) видов топлива в синтез-газ с последующим использованием в ТОТЭ посредством различных технологий. Большая часть исследований посвящена технологиям получения чистого водорода из промежуточного продукта синтез-газа после его разделения на составляющие [1–10]; ограниченное число исследований приводят результаты анализа эффективности ТОТЭ, в которые поступает синтез-газ без предварительного разделения на водород и оксид углерода [11–13]; в ряде работ рассматриваются способы повышения эффективности использования энергии первичных энергоносителей (топлив) путем создания гибридных (в основном ГТУ-ТОТЭ) технологий получения электрической энергии [14–15].

Для объективного изучения возможностей получения энергии из различных видов топлива целесообразно рассмотреть энергетическую эффективность их использования в условиях однотипной технологии, что позволит определить энергетическую эффективность и требуемый запас топлива для получения равной мощности установки, а в дальнейшем – необходимые затраты энергии на соответствующую конверсию.

В данной статье представлена универсальная методика, позволяющая рассчитывать: расход синтез-газа и топлива для заданной электрической мощности; температуру в аноде; коэффициент использования топлива; удельные расходы условного топлива по выработке электрической и тепловой энергии;

КПД ЭХГ для различных видов топлива. В качестве примера приведен конкретный расчет данных показателей для этанола. Результаты расчетов для других видов топлива приведены в итоговой таблице.

2. Теоретическая часть

В работе [16] проведены расчетные исследования более 220 вариантов работы ТОТЭ с рециркуляцией анодных газов и без нее (топливо – метан). Показано, что высокотемпературные ТОТЭ могут иметь коэффициент использования топлива от 60 % до 80 %, при этом выбор схемы мало влияет на эффективность. В [17] представлен экспериментальный анализ демонстрационной установки электрохимического генератора (ЭХГ) на базе ТОТЭ мощностью 5 кВт (топливо – природный газ). Коэффициент использования топлива доходил до 70 %. Установка проработала более 7 000 часов.

В [18] исследовали энергоустановку на базе батареи ТОТЭ с рециркуляцией анодных газов (топливо – метан). Коэффициент использования топлива составил 60 %.

В работе [19] изучали характеристики энергетической установки мощностью 5 кВт (топливо – природный газ). КПД батареи ТОТЭ равен 73 %, электрический КПД ЭХГ – 51 %. Коэффициент использования топлива составил 52,6 %. Расчетные исследования энергетической установки электрической мощностью 7,3 кВт, работающей на бординском угле, представлены в [20]. Коэффициент использования топлива равен 36,4 %; КПД батареи ТОТЭ – 36,4 %; электрический КПД ЭХГ (брутто) – 13,2 %; химический КПД газогенератора – 36,4 %. Удельные расходы условного топлива на производство электрической энергии 0,338 кг у.т./кВт ч и тепловой энергии, отпускаемой в тепловые сети, составили 93 кг у.т./ГДж. Расчетные исследования [21] проведены на ЭХГ, в качестве топлива использовали природный газ. Электрическая мощность энергоустановки равна 5,33 кВт. Удельные расходы топлива по выработке электриче-



ской энергии составили 0,16 кг у.т./ кВт ч, тепловой – 44,7 кг у. т./ГДж, коэффициент использования топлива – 0,71.

Теоретическим исследованиям энергетических показателей энергоустановки на базе ТОГЭ при использовании в качестве топлива твердых бытовых отходов посвящена публикация [22]. Согласно этой работе, удельный расход условного топлива на производство электрической энергии составил 0,153 кг у.т. /кВт·ч, тепловой энергии – 42,8 кг у.т. /ГДж. В ряде случаев для увеличения КПД ЭХГ советуют создавать гибридные установки с газовой турбиной [23]. В этом

случае электрический КПД энергетической установки составит 66 %, батареи ТОГЭ – 61,5 %.

Во всех исследованиях в качестве окислителя топлива в ТОГЭ использовался воздух или кислород, диссоциированный при высокой температуре из воды или водяного пара.

Для производства синтезированных видов топлива из природных энергоносителей для получения синтез-газа рассматриваются различные технологии, в том числе с использованием ядерной и солнечной энергии [24–26].

Список обозначений	
<u>Буквы греческого алфавита</u>	
α	Коэффициент (расхода) избытка воздуха
η	Коэффициент полезного действия
μ	Молекулярный компонент
ρ	Плотность, кг/м ³
<u>Буквы латинского алфавита</u>	
B	Расход синтез-газа, кг/с
b	Удельный расход топлива, кг у.т. /кВт·ч (кг у.т./ГДж)
G	Расход горючего, кг/с
ΔG	Приращение энергии Гиббса кДж/кг
ΔH	Теплота образования веществ, кДж/кг
M	Стехиометрические коэффициенты в уравнении реакции, масса
m, n, l	Атомные доли компонентов в формуле горючего
Q	Мощность, кВт
q	Удельная потеря теплоты, отн.ед.
r	Объёмная доля компонента в газовой фазе, %
S	Энтропия
ΔS	Изменение энтропии, кДж/К·кг
$T(t)$	Температура К (°С)
<u>Индексы верхние</u>	
0	При стандартных условиях
*	В левой части уравнения реакции
**	При других параметрах
p	Рабочее состояние
<u>Индексы нижние</u>	
1	Для реакции окисления водорода в аноде ТОГЭ
2	На выходе из котла утилизатора
i	Компонент газа в смеси
S	Энтропия
v	Воздух
исп	Использование
n	Нижняя
c	Сажа (углерод)
сг	Синтез-газ
t	На выборку теплоты
x	Химический
э	Электрическая
эт	Этанол
<u>Аббревиатуры</u>	
КПД	Коэффициент полезного действия
ТОГЭ	Твёрдоокисный топливный элемент
ЭДС	Электродвижущая сила
ЭХГ	Электрохимический генератор



3. Экспериментальная часть

3.1. Описание схемы энергетической установки

Принципиальная схема энергетической установки, на которой проводились исследования, представлена на рис. 1.

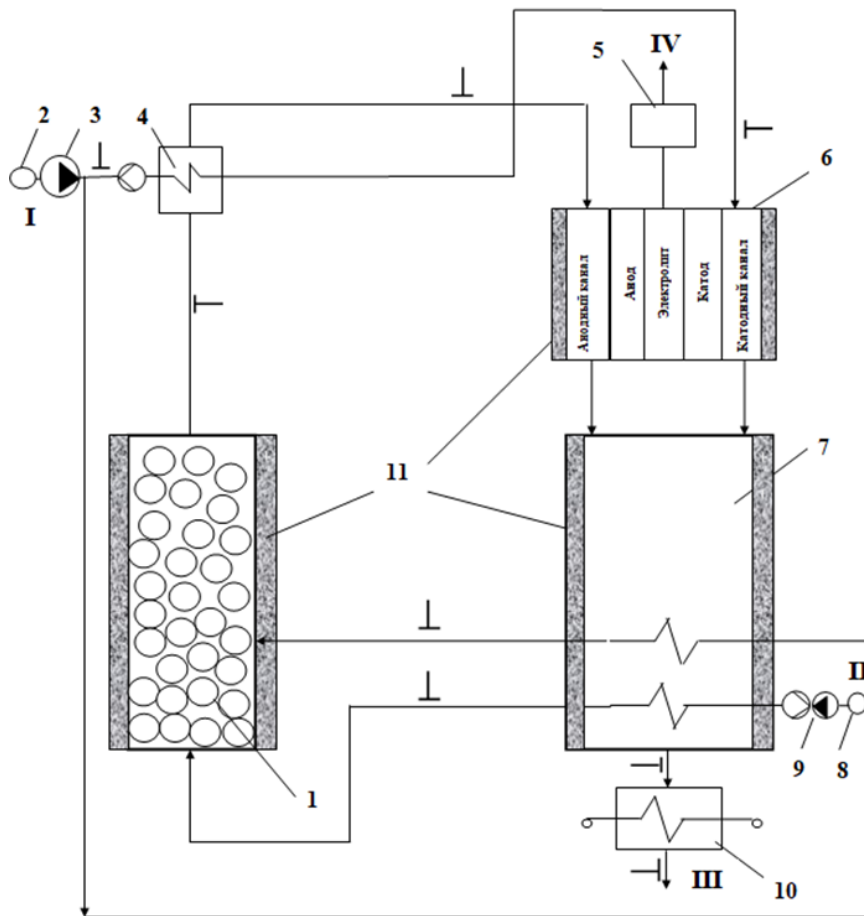


Рис. 1 – Принципиальная схема теплоэлектроцентрали на базе каталитической горелки и батареи ТОТЭ:
 1 – каталитическая горелка; 2 – воздухопровод; 3 – воздуходувка;
 4 – рекуператор; 5 – инвертор с потребителем электрической энергии;
 6 – батарея ТОТЭ; 7 – котел- утилизатор; 8 – коллектор топлива; 9 – насос для подачи топлива; 10 – сетевой подогреватель;
 11 – тепловая изоляция;
 I – ввод воздуха; II – ввод топлива; III – вывод продуктов полного окисления; IV – вывод электрической энергии;
 ○ – датчики расхода; ┌ – датчики температуры

Fig. 1 – Schematic diagram of the thermal power plant based on the catalytic burner and solid fuel cells batteries:
 1 – catalytic burner; 2 – air pipe; 3 – blower; 4 – heat exchanger; 5 – inverter with the consumer of electric power; 6 – cell battery SOFC; 7 – boiler; 8 – fuel manifold; 9 – fuel pump; 10 – power heater; 11 – thermal insulation;
 I – air input; II – fuel input; III – complete oxidation products output; IV – electrical power output.
 ○ – flow sensors; ┌ – temperature sensors

Основой для производства синтез-газа является каталитическая горелка 1, заполненная крупнокусковым алюмоникелевым катализатором КСН-2. В горелку поступает топливо в газо(паро)образном виде из котла-утилизатора 7 и окислитель – воздух, нагретый в котле-утилизаторе при коэффициенте расхода меньшем 1. Синтез-газ из горелки поступает в охладитель 4 и далее в анодный канал батареи ТОТЭ. Часть воздуха из воздуходувки 3 проходит через охладитель 4, нагревается и поступает в катодный ка-

нал батареи ТОТЭ. Электрическая энергия через инвертор 5 поступает к потребителю.

Продукты из анодного канала, содержащие оксид углерода, не до конца окисленный водород и обедненный кислородом воздух из катодного канала поступают в котел-утилизатор 7, в котором идет процесс окисления CO и H₂.

Тепловая мощность, выделяемая при окислении, расходуется на испарение жидкого топлива и подогрев воздуха. Не до конца использованная на собст-

венные нужды в котле-утилизаторе мощность поступает в сетевой подогреватель II для подогрева сетевой воды на нужды горячего водоснабжения.

Для данной технологической схемы проведены расчетные исследования энергетических показателей ряда типовых жидких и газообразных видов топлива: водорода, метана, моторного дизельного топлива, этанола, автомобильного бензина и метанола.

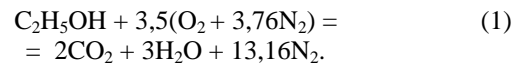
3.2. Моделирование процессов в электрохимическом генераторе

В качестве примера моделирования работы данной установки подробно рассмотрен процесс прямо-

го преобразования этанола в электрическую и тепловую энергию.

Условия, при которых осуществлялось моделирование: топливо C_2H_5OH – этанол, молекулярная масса $\mu_{эТ}$, окислитель – воздух.

Стехиометрическое уравнение полного окисления этанола воздухом имеет следующий вид:



Теплота окисления этанола

$$Q_n^p = [M_{CO_2}(-\Delta H_{CO_2}) + M_{H_2O}(-\Delta H_{H_2O}) - M_{эТ}(-\Delta H_{эТ})] / \mu_{эТ} =$$

$$= [2(-393,8 \cdot 10^3) + 3(-242,02 \cdot 10^3) - 1(-235,46 \cdot 10^3)] / 46 = 27\,785 \text{ кДж/кг этанола}$$

Коэффициент расхода воздуха, ниже которого появляется свободный углерод (сажа) в системе, определяется по методике [27]:

$$\alpha_c = (n-l) / (0,5m + 2n - l),$$

где атомарные доли С, Н и О в формуле этанола $n = 2$; $m = 6$; $l = 1$.

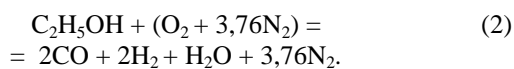
$$\alpha_c = (2-1) / (0,5 \cdot 6 + 2 \cdot 2 - 1) = 0,166.$$

Для последующего расчета с запасом принимается $\alpha = 0,2857$.

Следовательно, коэффициент перед воздухом в стехиометрическом уравнении неполного окисления этанола

$$M_b = 3,5\alpha = 3,5 \cdot 0,2857 = 1.$$

Стехиометрическое уравнение неполного окисления при $\alpha = 0,2857$:



Масса синтез-газа в уравнении (2)

$$G_{сг} = \mu_{эТ} + \mu_{O_2} + 3,76\mu_{N_2} =$$

$$= 46 + 32 + 3,76 \cdot 28 = 183,28 \text{ кг.}$$

Количество киломолей синтез-газа в уравнении (2)

$$\sum_1^4 M_i = M_{CO_2} + M_{H_2} + M_{H_2O} + M_{N_2} =$$

$$= 2 + 2 + 1 + 3,76 = 8,76.$$

Плотность синтез-газа при н.у.

$$\rho_{сг} = G_{сг} / \left(\sum_1^4 M_i \cdot 22,4 \right) =$$

$$= 183,28 / (8,76 \cdot 22,4) = 0,934 \text{ кг/м}^3.$$

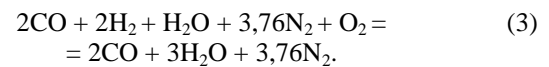
Состав синтез-газа (объемные %): $r_{CO} = 22,83$; $r_{H_2} = 22,83$; $r_{H_2O} = 11,4$; $r_{N_2} = 42,94$. Теплота окисления синтез-газа [28] определяется по формуле Д.И. Менделеева:

$$q_x = (124,6r_{CO} + 108r_{H_2}) / \rho_{сг} = (124,6 \cdot 22,83 + 108 \times$$

$$\times 22,83) / 0,934 = 5\,685 \text{ кДж/(кг синтез-газа)}.$$

Доля в ЭДС от реакции окисления СО в аноде ТОТЭ составляет менее 1 % от доли окисления H_2 , и в расчетах ею обычно пренебрегают. В аноде ТОТЭ окисляется только H_2 [29, 30].

Стехиометрическое уравнение реакции окисления только H_2 из синтез-газа в аноде ТОТЭ:



Теплота окисления H_2 при стандартных параметрах [30]

$$\Delta H_1^0 = [M_{H_2O}(-\Delta H_{H_2O}^0) - M_{H_2}^*(-\Delta H_{H_2}^0)] / G_{сг} =$$

$$= [3(-242,02 \cdot 10^3) - 1(-242,02 \cdot 10^3)] / 183,28 =$$

$$= -2\,641 \text{ кДж/(кг синтез-газа)}.$$

Изменение энергии Гиббса для реакции (3) при стандартных параметрах [31]

$$\Delta G^0 = [M_{H_2O}(-\Delta G_{H_2O}^0) - M_{H_2}^*(-\Delta G_{H_2}^0)] / G_{сг} =$$

$$= [3(-288,74 \cdot 10^3) + 1(-288,74 \cdot 10^3)] / 183,28 =$$

$$= -3\,151 \text{ кДж/(кг синтез-газа)}.$$



Изменение энтропии для реакции (3) при стандартных параметрах [30]

$$\Delta S^0 = [M_{H_2O}(S_{H_2O}^0) - M_{H_2}(S_{H_2}^0)] - M_{H_2O}^*(S_{H_2O}^0) - M_{O_2}(S_{O_2}^0) / G_{cr} =$$

$$= [3 \cdot 188,85 - 2 \cdot 130,67 - 1 \cdot 188,85 - 1 \cdot 205,16] / 183,28 = -0,482 \text{ кДж}/(\text{К} \cdot \text{кг синтез-газа}).$$

Температура продуктов окисления H_2 в аноде [32]

$$T_1 = (\Delta H_1^0 - \Delta G^0) / (\Delta S^0) =$$

$$= (-2\,641 + 3\,151) / |-0,482| = 1\,058 \text{ К (785 } ^\circ\text{C}).$$

Изменение энергии Гиббса при температуре $T_1 = 1\,058 \text{ К}$ кДж/(кг синтез-газа)

$$\Delta G_{1058\text{К}}^{**} = M_{H_2} \Delta G_{1058\text{К}} / G_{cr},$$

где $\Delta G_{1058\text{К}} = 189 \cdot 10^3$ кДж/кмоль воды при температуре 1 058 К.

$$\Delta G_{1058\text{К}}^{**} = 2 \cdot 189 \cdot 10^3 / 183,28 =$$

$$= 2\,062 \text{ кДж}/(\text{кг синтез-газа}),$$

где $M_{H_2} = 2$ – стехиометрический коэффициент у водорода в уравнении (3).

Для электрической мощности батареи ТОТЭ $Q_3 = 10$ кВт потребуется расход синтез-газа [21]

$$B_{cr} = Q_3 / \Delta G_{1058\text{К}}^{**} = 10 / 2\,062 = 4,848 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}.$$

Для производства B_{cr} потребуется ввести расход этанола в каталитическую горелку с учетом тепловой потери в окружающую среду через тепловую изоляцию $q_5 = 0,2$:

$$G_{гр} = B_{cr} (1 + q_5) \mu_{гр} / G_{cr} = 4,848 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 \cdot 46 / 183,28 =$$

$$= 1,459 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с (5,252 кг/ч)}.$$

Мощность с уходящими газами из котла-утилизатора в сетевой подогреватель для подогрева сетевой воды на горячее водоснабжение

$$Q_2 = B_{cr} q_x - Q_3 - i'' G_{гр} = 4,848 \cdot 10^{-3} \cdot 5\,685 - 10 -$$

$$- 2\,308 \cdot 1,459 \cdot 10^{-3} = 14,2 \text{ кВт},$$

где i'' – энтальпия сухого насыщенного пара, кДж/кг.

Коэффициент использования [33] топлива

$$\eta_{исп} = (Q_2 + Q_3) / (Q_H^p G_{гр}) = (14,2 + 10) / (1,459 \cdot 10^{-3} \times$$

$$\times 27\,785) = 0,596 \text{ (59,6 \%)}.$$

Химический КПД каталитической горелки

$$\eta_x = B_{cr} q_x / G_{гр} Q_H^p = (4,848 \cdot 10^{-3} \cdot 5\,685) / (1,459 \cdot 10^{-3} \times$$

$$\times 27\,785) = 0,6798 \text{ (67,98 \%)}.$$

Электрический КПД батареи ТОТЭ

$$\eta^* = Q_3 / B_{cr} q_x = 10 / (4,848 \cdot 10^{-3} \cdot 5\,685) =$$

$$= 0,363 \text{ (36,3 \%)}.$$

КПД ЭХГ (брутто)

$$\eta_b = Q_3 / (G_{гр} Q_H^p) = 10 / (1,459 \cdot 10^{-3} \cdot 27\,785) =$$

$$= 0,247 \text{ (24,7 \%)}.$$

Расход этанола на производство электрической энергии

$$G_{гр} = Q_3 \cdot 3600 / (\eta_{исп} Q_H^p) =$$

$$= 10 \cdot 3\,600 / (0,596 \cdot 27\,785) = 2,17 \text{ кг/ч}.$$

Расход этанола на выработку теплоты для сетевого подогревателя

$$G_T = G_{гр} - G_3 = 5,252 - 2,17 = 3,082 \text{ кг/ч}.$$

Удельный расход этанола на производство 1 кВт ч электроэнергии

$$b_3 = G_3 / Q_3 = 2,17 / 10 = 0,217 \text{ кг н.т./кВт} \cdot \text{ч}$$

$$(0,205 \text{ кг у.т./кВт} \cdot \text{ч}).$$

Удельный расход метанола на выработку 1 ГДж теплоты для тепловых сетей

$$b_T = G_T \cdot 10^6 / (Q_2 \cdot 3600) = 3,082 \cdot 10^6 / (14,2 \cdot 3\,600) =$$

$$= -65,6 \text{ кг н.т. / ГДж (62,1 кг у.т. / ГДж)}.$$

По представленной методике проведен анализ зависимости энергетических показателей и для остальных ранее перечисленных видов топлива. Результаты представлены в таблице.



Таблица
Зависимость энергетических показателей ЭХГ от вида топлива и окислителя**
Table
Dependence of ECG energy indicators on the kind of fuel and oxidizer**

№	Топливо	Энергетические показатели					
		$\eta_{исп}$ о/е	$b_э$ кг у.т./кВт·ч	b_T кг у.т./ГДж	η_x о/е	η^* о/е	$\eta_э$ о/е
1	Водород	1	0,122	34	–	0,785	0,785
2	Метан	0,755	0,162	45	0,756	0,49	0,374
3	Дизель	0,637	0,192	53,4	0,682	0,387	0,264
4	Этанол	0,596	0,205	62,1	0,679	0,363	0,247
5	Бензин	0,556	0,22	61,3	0,598	0,299	0,179
6	Метанол	0,359	0,475	83,7	0,447	0,786	0,352

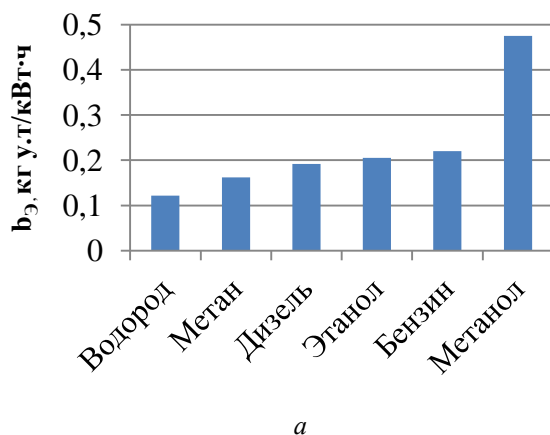
(**) со всеми топливами в качестве окислителя использован воздух

На основании данных таблицы можно сделать вывод о том, что наилучшие энергетические показатели демонстрирует водород. Затем следуют метан, моторное дизельное топливо, этанол, автомобильный бензин и метанол. Коэффициент использования топлива для перечисленных видов топлива различается в 2,1 раза.

Самым нежелательным топливом для энергоустановки на базе ТОТЭ является метанол как по коэффициенту использования топлива, так и по удельным расходам условного топлива на выработку электроэнергии и теплоты для целей теплоснабжения потребителей.

4. Обсуждение результатов расчетных исследований

Полученные расчетные значения коэффициента использования топлива (топливо – метан, окислитель – воздух) 75,5 %, удельного расхода условного топлива на выработку электроэнергии 0,162 кг у.т./кВт ч и теплоты 45 кг у.т./ГДж находятся в интервалах, приведенных в [16, 17], что подтверждает правильность предложенной методики расчета.



На рис. 2. приведен график коэффициентов использования топлива, а на рис. 3а и 3б – удельные расходы топлива на производство электрической энергии и теплоты для рассмотренных видов топлива.

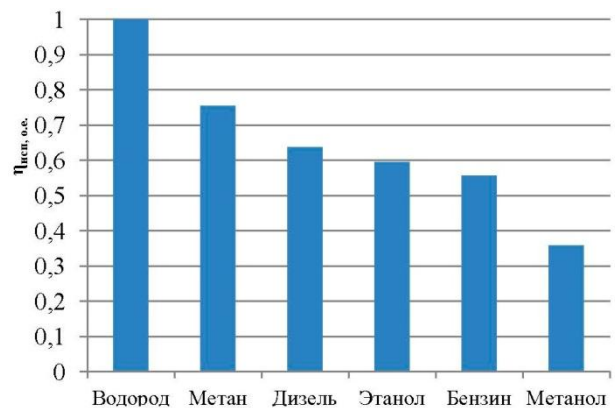


Рис. 2 – График коэффициентов использования разных видов топлива

Рис. 2 – Diagram of the fuel utilization ratio of various types of fuel

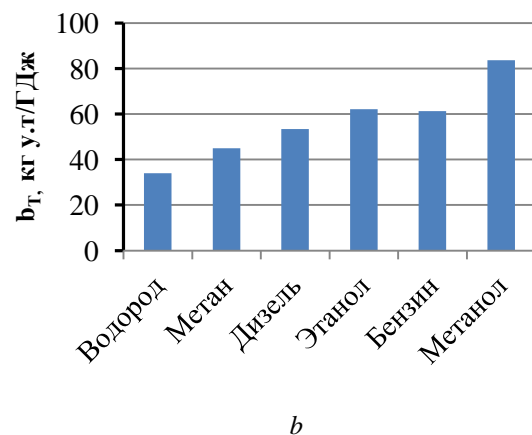


Рис. 3 – Графики удельных расходов разных видов топлива на производство электрической энергии (а) и теплоты (б) для целей теплоснабжения

Fig. 3 – Diagram of the specific fuel consumption for the production of electricity (a) and heat for heat supply purposes (b) for various types of fuels

Очевидно, что чем выше теплота окисления топлива, тем больше коэффициент использования топлива и меньше удельный расход топлива на производство электрической энергии и теплоты для целей теплоснабжения.

Общий уровень коэффициента использования топлива для энергетической установки когенерационного типа на основе ТОТЭ с водородным топливом и метаном превосходит уровень современных парогазовых ТЭЦ, а при использовании дизеля, этанола, бензина и метанола превосходит уровень когенерационных ТЭЦ на базе ДВС.

5. Заключение

Исследования влияния вида топлива на энергетические показатели электрохимических генераторов на основе ТОТЭ выявили следующее:

- Общий уровень коэффициента использования топлива для энергетической установки когенерационного типа на основе ТОТЭ с водородным топливом и метаном ($0,75 \div 1$) превосходит уровень современных парогазовых ТЭЦ ($0,5 \div 0,6$), а при использовании дизеля, этанола, бензина и метанола ($0,35 \div 0,65$) превосходит уровень когенерационных ТЭЦ на базе ДВС ($0,25 \div 0,55$).

- По максимальному коэффициенту использования топлива и минимальному расходу топлива на производство электрической и тепловой энергии на первом месте находится водород ($0,122 \text{ кг у.т./кВт} \cdot \text{ч}$ и 34 кг у.т./ГДж), за ним по порядку убывания энергетических показателей следуют метан ($0,162 \text{ кг у.т./кВт} \cdot \text{ч}$ и 45 кг у.т./ГДж), дизельное топливо ($0,192 \text{ кг у.т./кВт} \cdot \text{ч}$ и $53,4 \text{ кг у.т./ГДж}$), этанол ($0,205 \text{ кг у.т./кВт} \cdot \text{ч}$ и $62,1 \text{ кг у.т./ГДж}$), бензин ($0,22 \text{ кг у.т./кВт} \cdot \text{ч}$ и $61,3 \text{ кг у.т./ГДж}$) и метанол ($0,475 \text{ кг у.т./кВт} \cdot \text{ч}$ и $83,7 \text{ кг у.т./ГДж}$).

Благодарность

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

Acknowledgment

The paper was prepared with the financial support of the Government of the Russian Federation (Contract №02.А03.21.0006).

Список литературы

[1] Lykova, S.A. Highly efficient hybrid power generation systems based on fuel cells / S.A. Lykova // Thermal Engineering. – 2002. – Vol. 49. – No. 1. – P. 54–60.
 [2] Sgobbi, A. How far away is hydrogen? Its role in the medium and long-term decarbonisation of the European energy system / A. Sgobbi // International Journal of Hydrogen Energy. – 2016. – Vol. 41. – No. 1. – P. 19–35.

[3] Grigor'yants, R.R. Thermodynamic model and analysis of hybrid power installations built around solidoxide fuel cells and gas-turbine units / R.R. Grigor'yants // Thermal Engineering. – 2008. – Vol. 55. – No. 9. – P. 790–794.

[4] Dubinin, A.M. Experimental and theoretical study of the effectiveness of the production of hydrogen by steam conversion of methane using circulating fluidized bed technology / A.M. Dubinin [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2016. – Vol. 41. – No. 20. – P. 8433–8437.

[5] Dubinin, A.M. Modeling the process of producing hydrogen from methane / A.M. Dubinin // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2013. – Vol. 47. – No. 6. – P. 697–701.

[6] Beznosova, D.S. Prospects for using hybrid power installations on the basis of solid-oxide fuel cells integrated with intracycle coal gasification / D.S. Beznosova // Thermal Engineering. – 2011. – Vol. 58. – No. 9. – P. 774–778.

[7] Dubinin, A.M. Determining maximum capacity of an autothermal fluidized-bed gas generator / A.M. Dubinin // Thermal Engineering. – 2009. – Vol. 56. – No. 5. – P. 421–425.

[8] Shigarov, A.B. Modeling of membrane reactor for steam methane reforming: From granular to structured catalysts / A.B. Shigarov // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2012. – Vol. 46. – No. 2. – P. 97–107.

[9] Kurganov, V.A. High-Temperature HeatShielding Panels with Thermochemical Cooling Based on the Reaction of Steam Conversion of Methane / V.A. Kurganov // High Temperature. – 2000. – Vol. 38. – No. 6. – P. 926–937.

[10] Lakhete, P. Modeling process intensified catalytic plate reactor for synthesis gas production / P. Lakhete // Chemical Engineering Science. – 2014. – Vol. 110. – P. 13–19.

[11] Kurteeva, A.A. Single solid-oxide fuel cells with supporting Ni-cermet anode / A.A. Kurteeva // High Temperature. – 2011. – Vol. 47. – No. 12. – P. 1381–1388.

[12] Takeguchi, T. Study on steam reforming of CH_4 and C_2 hydrocarbons and carbon deposition on Ni-YSZ cermets / T. Takeguchi // Journal of Power Sources. – 2002. – Vol. 112. – P. 588–595.

[13] Chen, B. Exergy analysis and CO_2 emission evaluation for steam methane reforming / B. Chen // International Journal of Hydrogen Energy. – 2012. – Vol. 37. – No. 4. – P. 3191–3200.

[14] Yan, Y. Properties of thermodynamic equilibrium-based methane autothermal reforming to generate hydrogen / Y. Yan // International Journal of Hydrogen Energy. – 2013. – Vol. 38. – No. 35. – P. 15744–15750.

[15] Barona, J. Combustion of hydrogen in a bubbling fluidized bed / J. Barona // Combustion and Flame. – 2009. – Vol. 156. – No. 5. – P. 975–984.

[16] Peters, R. Analysis of Solid-Oxide Fuel Cell System Concepts with Anode Recycling / R. Peters [et



al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2013. – No. 38. – P. 6809–6820.

[17] Halinen, M. Experimental analysis on Performance and Durability of SOFT Demonstration unit / M. Halinen [et al.] // *Fuel Cells*. – 2010. – Vol. 10. – No. 3. – P. 440–452.

[18] Halinen, M. Effect of anode off-gas recycling on reforming of natural gas for solid oxide fuel cell system / M. Halinen, O. Thomann, J. Kiviaho // *Fuel Cells*. – 2012. – Vol. 12. – No. 5. – P. 754–760.

[19] 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. – P. 15–20.

[20] Dubinin, A.M. Mini coal-fired CHP plant on the basis of synthesis gas generator (CO + H₂) and electrochemical current generator / A.M. Dubinin, S.E. Shcheklein // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2017. – Vol. 42. – P. 26048–26058.

[21] Дубинин, А.М. Мини ТЭЦ на базе конвертора метана с заторможенным псевдоожиженным слоем и электрохимического генератора / А.М. Дубинин [и др.] // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE)*. – 2017. – № 19–21. – С. 1–11.

[22] Shcheklein, S.E. Solid wastes (SW) converting into electric and thermal energy using a gasifier and an electrochemical generator / S.E. Shcheklein, A.M. Dubinin // *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. WIT Press. Energy and sustainability. – 2017. – Vol. 224. – P. 451–462.

[23] Final Report. Scale-up of Planar SOFC Stack technology for MW-Level combined Cycle System. Submitted to NETL. – Oct. 3, 2003. – 83p.

[24] Столяревский, А.Я. Технология получения синтез-газа для водородной энергетики / А.Я. Столяревский // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE)*. – 2005. – № 2. – С. 26–32.

[25] Orhan, M.F. Approaches for integrated hydrogen production based on nuclear and renewable energy sources: Energy and exergy assessments of nuclear and solar energy sources in the United Arab Emirates / M.F. Orhan, H. Kahraman, B.S. Babu // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2017. – Vol. 42. – P. 2601–2616.

[26] 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. – No. 2. – P. 91–97.

[27] Баскаков, А.П. Нагрев и охлаждение металлов в кипящем слое / А.П. Баскаков. – М.: *Металлургия*, 1974. – 272 с.

[28] Карапетьянц, М.Х. Химическая термодинамика. Изд. 3-е, перераб. и доп. / М.Х. Карапетьянц. – М.: *Химия*, 1975. – 584 с.

[29] Коровин, Н.В. Электрохимическая энергетика / Н.В. Коровин. – М.: *Энергоатомиздат*, 1991. – 264 с.

[30] 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.

[31] *Теплофизические свойства веществ* / Под ред. Н.Б. Варгафтика. – М.: *Госэнергоиздат*, 1956.

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

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

References

[1] Lykova S.A. Highly efficient hybrid power generation systems based on fuel cells. *Thermal Engineering*, 2002;49(1):54–60 (in Eng.).

[2] Sgobbi A. How far away is hydrogen? Its role in the medium and long-term decarbonisation of the European energy system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016;41(1):19–35 (in Eng.).

[3] Grigor'yants R.R. Thermodynamic model and analysis of hybrid power installations built around solidoxide fuel cells and gas-turbine units. *Thermal Engineering*, 2008;55(9):790–794 (in Eng.).

[4] Dubinin A.M., Shcheklein S.E., Tuponogov V.G., Ershov M.I., Kagramanov Y.A. Experimental and theoretical study of the effectiveness of the production of hydrogen by steam conversion of methane using circulating fluidized bed technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016;41(20):8433–8437 (in Eng.).

[5] Dubinin A.M. Modeling the process of producing hydrogen from methane. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2013;47(6):697–701 (in Eng.).

[6] Beznosova D.S. Prospects for using hybrid power installations on the basis of solid-oxide fuel cells integrated with intracycle coal gasification. *Thermal Engineering*, 2011;58(9):774–778 (in Eng.).

[7] Dubinin A.M. Determining maximum capacity of an autothermal fluidized-bed gas generator. *Thermal Engineering*, 2009;56(5):421–425 (in Eng.).

[8] Shigarov A.B. Modeling of membrane reactor for steam methane reforming: From granular to structured catalysts. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2012;46(2):97–107 (in Eng.).

[9] Kurganov V.A. High-Temperature HeatShielding Panels with Thermochemical Cooling Based on the Reaction of Steam Conversion of Methane. *High Temperature*, 2000;38(6):926–937 (in Eng.).

[10] Lakhete P. Modeling process intensified catalytic plate reactor for synthesis gas production. *Chemical Engineering Science*, 2014;110:13–19 (in Eng.).

[11] Kurteeva A.A. Single solid-oxide fuel cells with supporting Ni-cermet anode. *High Temperature*, 2011;47(12):1381–1388 (in Eng.).

[12] Takeguchi T. Study on steam reforming of CH₄ and C₂ hydrocarbons and carbon deposition on Ni-YSZ



cermets. *Journal of Power Sources*, 2002;112:588–595 (in Eng.).

[13] Chen B. Exergy analysis and CO₂ emission evaluation for steam methane reforming. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012;37(4):3191–3200 (in Eng.).

[14] Yan Y. Properties of thermodynamic equilibrium-based methane autothermal reforming to generate hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013;38(35):15744–15750 (in Eng.).

[15] Barona J. Combustion of hydrogen in a bubbling fluidized bed, *Combustion and Flame*, 2009;156(5):975–984 (in Eng.).

[16] Peters R., Deja R., Blum L., Pennanen J., Kiviaho J., Hakala N. Analysis of Solid-Oxide Fuel Cell System Concepts with Anode Recycling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013;38(38):6809–6820 (in Eng.).

[17] Halinen M., Saarinen I., Noponen M., Vinke I.C., Kiviaho J. Experimental analysis on Performance and Durability of SOFC Demonstration unit. *Fuel Cells*, 2010;10(3):440–452 (in Eng.).

[18] Halinen M., Thomann O., Kiviaho J. Effect of anode off-gas recycling on reforming of natural gas for solid oxide fuel cell system. *Fuel Cells*, 2012;12(5):754–760 (in Eng.).

[19] Munts V.A., Volkova Y.V., Plotnikov N.S., Dubinin A.M., Tuponogov V.G., Chernishev V.A. Studying the characteristics of a 5 kW power installation on solid-oxide fuel cells with steam reforming of natural gas. *Thermal Engineering*, 2015;62(11):779–784 (in Eng.) / (Munc V.A., Volkova Yu.V., Plotnikov N.S. et al. Issledovanie harakteristik ehnergeticheskoy ustanovki 5 kVt na tverdoookisnyh toplivnyh ehlementah s parovym riformingom prirodno go gaza. *Teploehnergetika*, 2015;(11):15–20 (in Russ.).

[20] Dubinin A.M., Shcheklein S.E. Mini coal-fired CHP plant on the basis of synthesis gas generator (CO + H₂) and electrochemical current generator. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017;42:26048–26058 (in Eng.).

[21] Dubinin A.M., Shcheklein S.E., Tuponogov V.G., Ershov M.I. Mini CHP based on the electrochemical generator and impeded fluidized bed reactor for methane steam reforming (Mini TEHC na baze konvertora metana s zatormozhennym psevdoozhizhennym sloem i ehlektrohimicheskogo generatora). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2017;(19–21):95–105 (in Russ.).

[22] Shcheklein S.E., Dubinin A.M. Solid wastes (SW) converting into electric and thermal energy using a

gasifier and an electrochemical generator. WIT Transactions on Ecology and the Environment. WIT Press. *Energy and sustainability*, 2017;224:451–462 (in Eng.).

[23] Zhang X., Chan S.H., Li G., Ho H.K., Li J., Feng Z. A review of integration strategies for solid oxide fuel cells. *J.Power Sources*, 2010;195:685–702 (in Eng.).

[24] Stolyarevskiy A.Ya. Process of production of synthesis gas for hydrogen energy (Tekhnologiya polucheniya sintez-gaza dlya vodorodnoj ehnergetiki). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2005;(22):26–32 (in Russ.).

[25] Orhan M. F., Kahraman H., Babu B.S. Approaches for integrated hydrogen production based on nuclear and renewable energy sources: Energy and exergy assessments of nuclear and solar energy sources in the United Arab Emirates. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017;42:2601–2616 (in Eng.).

[26] Shcheklein S.E., Dubinin A.M. Methanol Production Based on Direct-Flow Gas Generator and Nuclear Reactor. *Atomic Energy*, 2018;124(2):91–97.

[27] Baskakov A.P. Heating and cooling of metals in the fluidized bed (*Nagrev i ohlazhdenie metallov v kipiyashchem sloe*). Moscow: Metallurgiya Publ., 1974, 272 p. (in Russ.).

[28] Karapetyants M.K. Chemical thermodynamics (Himicheskaya termodinamika): 3rd ed. Moscow: Himiya Publ., 1975, 584 p. (in Russ.).

[29] Korovin N.V. Electrochemical power industry (Elektrohimicheskaya ehnergetika). Moscow: Energoatomizdat Publ., 1991, 264 p. (in Russ.).

[30] Sobyenin V.A. High-temperature solid oxide fuel cells and methane conversion (Vysokotemperaturnye tverdoookisnye toplivnye ehlementy i konversiya metana). *Russian Chemical Journal (Journal of Russian Chemical Society named after D.I. Mendeleev)*, 2003;47(6):62–70 (in Russ.).

[31] Thermal-physical properties of substances (Teplofizicheskie svoystva veshchestv). Ed. by Vagraftic N.B. Moscow: Gosenergoizdat Publ., 1956 (in Russ.).

[32] Baskakov, A.P., Volkova, Y.V., Physicochemical Principles of Thermal Processes: A Handbook (Fiziko-himicheskie osnovy teplovyh processov). Moscow: Teplotekhnika Publ., 2013, 173 p. (in Russ.).

[33] Yakovlev B.V. Increase in efficiency of central heating and heat supply systems (Povyshenie ehffektivnosti sistem teplofikacii i teplosnabzheniya). Moscow: Novosti teplosnabzheniya Publ., 2008, 448 p. (in Russ.).

Транслитерация по BSI

