

УДК 621.352

Оценка значимости влияния термодинамических факторов на эффективность работы твердооксидных топливных элементов

В. А. Седнин¹⁾, А. А. Чичко¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2015
Belarusian National Technical University, 2015

Реферат. Технологии прямого преобразования энергии топлива в электрическую энергию являются перспективным направлением в энергетике. В последние десятилетия в ряде стран созданы промышленные образцы электростанций на топливных элементах (ячейках), а сами топливные элементы стали коммерческим изделием на мировом энергетическом рынке. Высокий электрический КПД топливных ячеек позволяет говорить о дальнейшем их распространении в составе гибридных установок совместно с газо- и паротурбинными установками, что дает возможность достигать электрического КПД более 70 %. Тем не менее исследования в области повышения эффективности и надежности топливных элементов продолжаются. В частности, научный интерес представляет изучение влияния на эффективность работы твердооксидных топливных элементов термодинамических параметров реакции окисления, состава топлива и продуктов реакции окисления. В статье выполнен краткий анализ влияния вида топлива на эффективность работы твердооксидных топливных элементов. На основе имеющихся в открытой печати экспериментальных данных и данных численного моделирования представлены результаты статистического анализа влияния термодинамических параметров твердооксидного топливного элемента на эффективность его функционирования, а также факторов взаимодействия этих параметров и состава газов на входе в элемент и выходе из него. Приведены диаграммы, которые отражают степень влияния указанных параметров на эффективность работы твердооксидных топливных элементов, определены степени значимости вышеперечисленных факторов. Статистический анализ влияния термодинамических, расходных и концентрационных параметров процесса функционирования твердооксидных топливных элементов показал, что наиболее существенно влияние на эффективность работы элемента в исследованной области оказывают факторы взаимодействия (температура – расход и давление – расход) и концентрации азота N₂ и кислорода O₂. Именно эти параметры должны в первую очередь учитываться в математических моделях, разрабатываемых для оптимизации режимов работы твердооксидных топливных элементов.

Ключевые слова: твердооксидный топливный элемент, термодинамические параметры, концентрация, статистический анализ

Для цитирования: Седнин, В. А. Оценка значимости влияния термодинамических факторов на эффективность работы твердооксидных топливных элементов / В. А. Седнин, А. А. Чичко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2015. № 6, с. 87–97

Адрес для переписки

Седнин Владимир Александрович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Address for correspondence

Sednin Vladimir A.
Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Effect Significance Assessment of the Thermodynamical Factors on the Solid Oxide Fuel Cell Operation

V. A. Sednin¹⁾, A. A. Chichko¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Technologies of direct conversion of the fuel energy into electrical power are an upcoming trend in power economy. Over the last decades a number of countries have created industrial prototypes of power plants on fuel elements (cells), while fuel cells themselves became a commercial product on the world energy market. High electrical efficiency of the fuel cells allows predicting their further spread as part of hybrid installations jointly with gas and steam turbines which specifically enables achieving the electrical efficiency greater than 70 %. Nevertheless, investigations in the area of increasing efficiency and reliability of the fuel cells continue. Inter alia, research into the effects of oxidizing reaction thermodynamic parameters, fuel composition and oxidation reaction products on effectiveness of the solid oxide fuel cells (SOFC) is of specific scientific interest. The article presents a concise analysis of the fuel type effects on the SOFC efficiency. Based on the open publications experimental data and the data of numerical model studies, the authors adduce results of the statistical analysis of the SOFC thermodynamic parameters effect on the effectiveness of its functioning as well as of the reciprocative factors of these parameters and gas composition at the inlet and at the outlet of the cell. The presented diagrams reflect dimension of the indicated parameters on the SOFC operation effectiveness. The significance levels of the above listed factors are ascertained. Statistical analysis of the effects of the SOFC functioning process thermodynamical, consumption and concentration parameters demonstrates quintessential influence of the reciprocative factors (temperature – flow-rate and pressure – flow-rate) and the nitrogen N₂ and oxygen O₂ concentrations on the operation efficiency in the researched range of its functioning. These are the parameters to be considered on a first-priority basis while developing mathematical models for optimizing the solid oxide fuel cells operating modes.

Keywords: solid oxide fuel cell, thermodynamic parameters, concentration, statistical analysis

For citation: Sednin V. A., & Chichko A. A. Effect Significance Assessment of the Thermodynamical Factors on the Solid Oxide Fuel Cell Operation. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2015. No 6, pp. 87–97 (in Russian)

В наше время пристальное внимание уделяется развитию энергетических установок с топливными элементами (ячейками), работающими на различных видах газообразного и жидкого топлива (водород, природный газ, биогаз, биотопливо и пр.) [1–10]. При применении твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ), как правило, рассматриваются гибридные технологические схемы энергетических установок, в состав которых, кроме ТОТЭ, входят газовые и паровые турбины.

Несмотря на то что каждая гибридная установка имеет свою собственную структуру, все они обладают некоторыми общими характеристиками:

- при работе на топливе, отличающемся от водорода Н₂ или монооксида углерода СО, в состав установки должна входить подсистема риформинга (процесс преобразования входного топлива в Н₂ или СО или их смесь). Следует учитывать, что химические процессы в риформинге эндотермичны;

- в случае риформинга исходного топлива при работе ТОТЭ отходящие с анода газы включают в себя остатки нериформированных газов, которые далее могут дожигаться в камерах сгорания в среде продуктов сгорания

с последующим использованием их энергетического потенциала в газо- и паротурбинных установках [11].

Эксергетический анализ систем, который позволяет исследовать влияние плотности тока и температуры на характеристики систем, работающих на водороде и метане, дан в [12]. В [13] сравниваются системы, работающие на водороде и этаноле. Некоторые характеристики оказались выше при работе на водороде, другие – при работе на этаноле, но при одинаковой схеме общая эффективность больше при работе на водороде.

Характеристики гибридной системы ТОТЭ с газовой турбиной, которая создана для работы на метане, но в ходе исследования качества топлива в ней использовали другие виды топлива, представлены [14]. Цель работы заключалась в исследовании влияния замены топлива в гибридной установке, которую спроектировали под определенное топливо – метан. Показано, что при использовании водорода вместо метана чистая выходная мощность гибридной системы снижается до 70 % по сравнению с работой на метане (эффективность которой превышает 75 %).

Эффективность гибридной установки ТОТЭ и газовой турбины на различных видах топлива (метан, этанол, метанол, водород и аммиак) проанализирована [8]. Эксергетический анализ проведен как для всей системы в целом, так и для отдельных элементов системы, таких как теплообменники, газовые турбины, горелки, компрессоры и топливные элементы. Показано, что в данной схеме (с подачей водорода) система имеет наименьшую энергетическую эффективность (70 %) по сравнению с теми же схемами с метаном (78 %), который является наиболее эффективным видом топлива для систем.

Обобщая, можно констатировать, что все исследованные системы, работающие на водороде, имеют самую низкую эффективность в сравнении с системами, работающими на других видах топлива. Объясняется это тем, что отсутствие предварительного риформинга топлива требует компенсации экзотермической теплоты дополнительным объемом первичного топлива. Тем не менее, учитывая хорошие перспективы водорода в качестве будущего универсального топлива [15], представляется важным оптимизация систем ТОТЭ, работающих на данном газе. Эти системы имеют свои особенности (отсутствие какого-либо предварительного риформинга (как упоминалось выше) и также состав остаточных анодных газов, являющихся комбинацией непосредственно водорода и водяного пара, из которого можно с легкостью переработать непрореагировавший водород [16]).

Ранее нами [17] исследовалась схема гибридной системы, работающей на биогазе с риформингом. Анализ показал, что данная система имеет перспективы применения на биогазовых комплексах, так как по электрическому КПД она превосходит когенерационные установки на базе поршневых и газотурбинных двигателей, а по коэффициенту использования топлива не уступает им. Учитывая, что на биогазовых комплексах, как правило, тепловая нагрузка ограничена собственными нуждами, перераспределение мощности в сторону выработки электроэнергии имеет дополнительные преимущества. Все сказанное подтверждает актуальность исследований в области оптимизации гибридных установок на базе ТОТЭ.

Одна из важнейших задач при оптимизации схем с топливными элементами в энергетике – выявление взаимосвязей между термодинамическими параметрами топливных элементов и характеристиками газов, участвующих в функционировании этих элементов. Знание влияния переменных (температуры, давления, состава газов) дает возможность разработчикам топливных элементов оптимизировать их конструкцию, состоящую из модульных блоков, а это в свою очередь позволяет инженерам-технологам максимально увеличить производительность системы. Методология оценки эффективности функционирования топливного элемента строится на основе определения сначала его «идеальной» производительности, а затем введения поправок, связанных с реальными условиями промышленной эксплуатации.

Моделирование гибридной системы ТОТЭ с газовой турбиной в Aspen Plus platform представлено в [18]. В ходе численного исследования рассмотрены варианты работы гибридной системы на сингазе и метане, с рециркуляцией газов с анода и с дополнительным источником воды. Учитывались следующие параметры: температура, давление, расход (массовый, объемный и молярный), а также состав газов, которые были приняты согласно экспериментальным данным [19, 20]. Характеристики оборудования, такие как мощность, работа, эффективность, теплота, вычисляли в ходе численного эксперимента. В табл. 1 представлены пределы изменения характеристик элементов и системы в целом гибридной схемы, полученные в ходе исследования.

Таблица 1

**Обобщенные характеристики параметров гибридной системы ТОТЭ
с газовой турбиной**

Summarized characteristics of the SOFC hybrid system parameters with a gas turbine

Элемент	Мощность, кВт	Удельная работа, кДж/кг воздуха	КПД, %
Компрессор для воздуха	16,700–26,500	130,40	85,0
Компрессор для топлива	1,000	5,00–8,10	85,0
Насос	0,002	0,01	85,0
ТОТЭ	13,700–129,900	103,90–829,10	19,3–58,2
Турбина	46,500–80,100	362,10–394,50	85,0
Общее	42,900–166,300	327,80–1059,40	59,0–75,0

Анализ гибридных схем показал, что для обеспечения риформинга метана можно использовать как газы, выходящие из анода, так и дополнительный источник воды. Характеристики схем (с/без рециркуляции) сильно отличаются друг от друга. Несмотря на то что эффективность и мощность двух систем очень близки, работа цикла с рециркуляцией газов с анода была намного выше, чем в схеме без нее, что означает меньшие денежные затраты на то, чтобы получить одну и ту же мощность для данной системы. Хотя мощность ТОТЭ с рециркуляцией больше, мощность турбины была больше в системе без рециркуляции. Сравнительные характеристики систем, работающих на сингазе и метане, показали, что мощность, работа и ее эффективность на метане больше. Также были промоделирова-

ны системы с разнообразным видом топлива. Показано, что эффективность систем может варьироваться от 59 до 75 % в зависимости от вида топлива.

Проанализированы статистические взаимосвязи между термодинамическими параметрами гибридной системы с ТОТЭ и газовой турбиной, факторами, учитывающими взаимодействие термодинамических параметров, а также концентрационными характеристиками газов, образующихся в системе. В качестве факторов принимали: термодинамические параметры (температуру t и давление p), расход топлива s , характеристики составов газов на входе и выходе топливного элемента (концентрации H_2O , CO , CO_2 , CH_4 , H_2 , N_2 , O_2). Как дополнительные характеристики модели использовали факторы взаимодействия термодинамических и расходных параметров, полученных через их произведение tp , ts , ps .

Так как при обработке данных статистическими методами обычно имеется разброс по значениям коэффициента информативности, что характеризует неустойчивость изучаемых взаимосвязей, то для подтверждения статистических зависимостей требуется увеличение числа наблюдений либо исходных данных. Поскольку в данной работе невозможно было увеличивать число наблюдений, то устойчивость результатов проверяли на увеличении числа данных, внесенных в матрицы, различных схем с топливными элементами.

Гистограмма распределения коэффициентов информативности для термодинамической характеристики температуры t (y_1) по отношению к продуктам химических реакций топливного элемента представлена на рис. 1. Как видно из рис. 1, наиболее информативной по отношению к температуре является концентрация CH_4 . Невысокой информативностью по отношению к температуре обладает группа, связанная с O_2 .

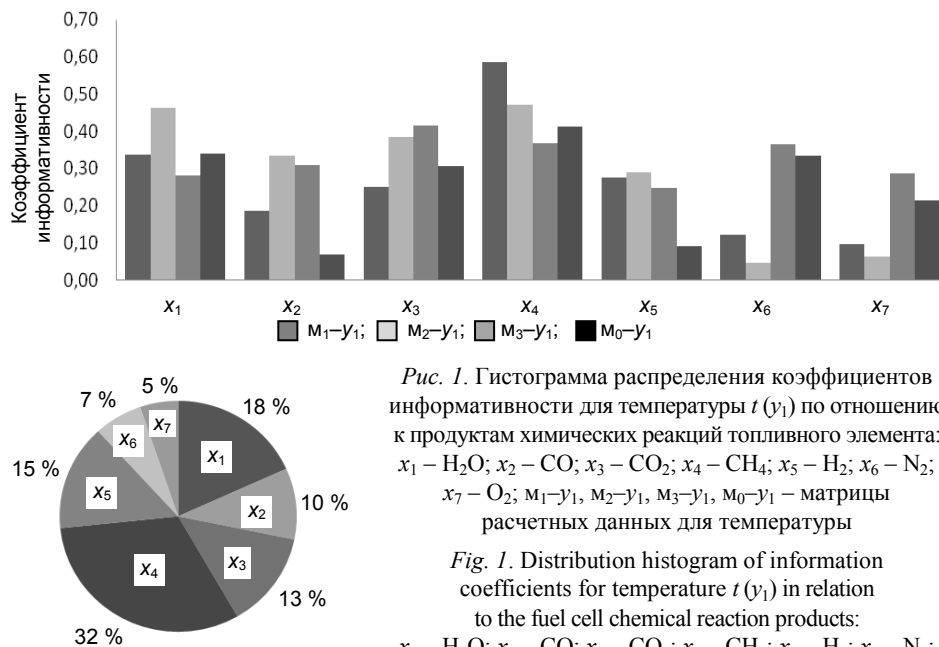


Рис. 1. Гистограмма распределения коэффициентов информативности для температуры t (y_1) по отношению к продуктам химических реакций топливного элемента: $x_1 - H_2O$; $x_2 - CO$; $x_3 - CO_2$; $x_4 - CH_4$; $x_5 - H_2$; $x_6 - N_2$; $x_7 - O_2$; M_1-y_1 , M_2-y_1 , M_3-y_1 , M_0-y_1 – матрицы расчетных данных для температуры

Fig. 1. Distribution histogram of information coefficients for temperature t (y_1) in relation to the fuel cell chemical reaction products: $x_1 - H_2O$; $x_2 - CO$; $x_3 - CO_2$; $x_4 - CH_4$; $x_5 - H_2$; $x_6 - N_2$; $x_7 - O_2$; M_1-y_1 , M_2-y_1 , M_3-y_1 , M_0-y_1 – calculated data matrices for the temperature

Гистограмма распределения коэффициентов информативности для давления p (y_2) по отношению к продуктам химических реакций топливного элемента приведена на рис. 2. Для давления практически все термодинамические параметры химических реакций оказались информативными. Но, как видно из рисунка, наиболее информативной является концентрация CO_2 , а наименее – метана CH_4 . Однако для различных матриц для давления, так же как и для температуры, имеется неустойчивость.

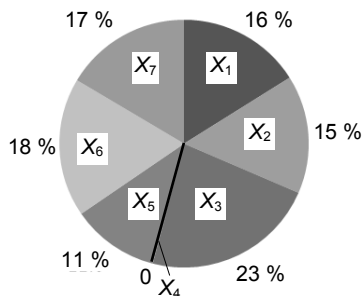
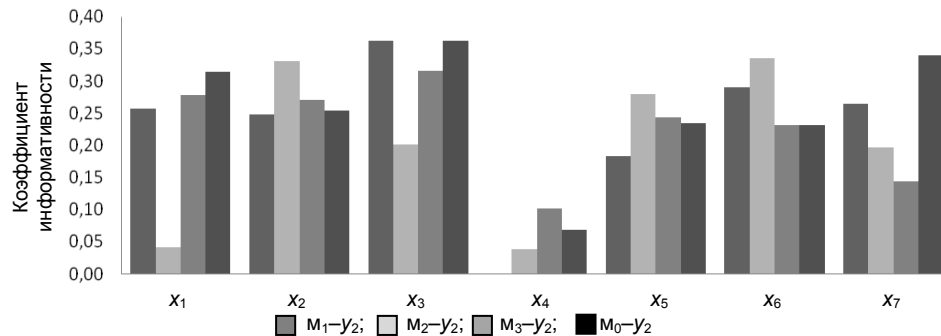


Рис. 2. Гистограмма распределения коэффициентов информативности для термодинамической характеристики p (y_2) по отношению к продуктам химических реакций топливного элемента: $x_1 - \text{H}_2\text{O}$; $x_2 - \text{CO}$; $x_3 - \text{CO}_2$; $x_4 - \text{CH}_4$; $x_5 - \text{H}_2$; $x_6 - \text{N}_2$; $x_7 - \text{O}_2$; M_1-y_2 , M_2-y_2 , M_3-y_2 , M_0-y_2 – матрицы расчетных данных для температуры

Fig. 2. Distribution histogram of information coefficients for thermodynamical characteristic p (y_2) in relation to the fuel cell chemical reaction products: $x_1 - \text{H}_2\text{O}$; $x_2 - \text{CO}$; $x_3 - \text{CO}_2$; $x_4 - \text{CH}_4$; $x_5 - \text{H}_2$; $x_6 - \text{N}_2$; $x_7 - \text{O}_2$; M_1-y_2 , M_2-y_2 , M_3-y_2 , M_0-y_2 – calculated data matrices for the temperature

Гистограмма распределения коэффициентов информативности для расхода s (y_3) по отношению к продуктам химических реакций топливного элемента показана на рис. 3. Наиболее информативными по отношению к расходу являются концентрации азота N_2 и кислорода O_2 . Невысокой информативностью по отношению к расходу обладает группа, связанная с продуктом CH_4 . Причем для расхода также практически все термодинамические продукты химических реакций оказались довольно информативными. Как можно видеть из представленных данных, расход наиболее тесно связан с продуктами химических реакций.

Гистограмма распределения коэффициентов информативности для фактора взаимодействия tp (y_4) по отношению к продуктам химических реакций топливного элемента представлена на рис. 4. Как видно из рисунка, наиболее информативным по отношению к этому параметру является продукт химической реакции CH_4 . Подобный результат наблюдался и для фактора температуры. Как и для температуры, для различных матриц фактор tp по отношению к другим продуктам химических реакций является неустойчивым.

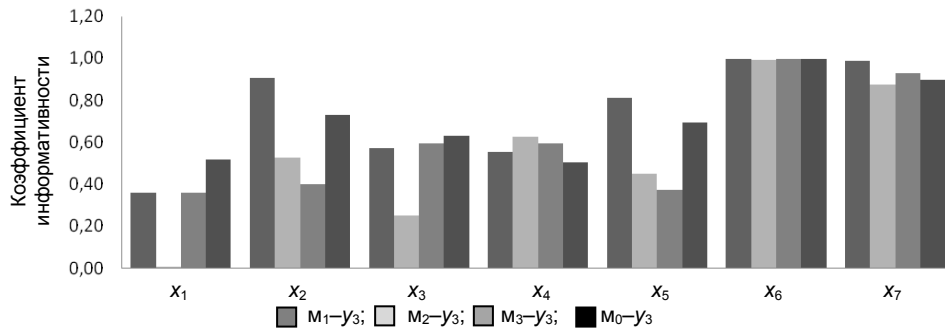


Рис. 3. Гистограмма распределения коэффициентов информативности для термодинамической характеристики s (y_3) по отношению к продуктам химических реакций топливного элемента: $x_1 - H_2O$; $x_2 - CO$; $x_3 - CO_2$; $x_4 - CH_4$; $x_5 - H_2$; $x_6 - N_2$; $x_7 - O_2$; M_1-y_3 , M_2-y_3 , M_3-y_3 , M_0-y_3 – матрицы расчетных данных для температуры

Fig. 3. Distribution histogram of information coefficients for thermodynamical characteristic s (y_3) in relation to the fuel cell chemical reaction products: $x_1 - H_2O$; $x_2 - CO$; $x_3 - CO_2$; $x_4 - CH_4$; $x_5 - H_2$; $x_6 - N_2$; $x_7 - O_2$; M_1-y_3 , M_2-y_3 , M_3-y_3 , M_0-y_3 – calculated data matrices for the temperature

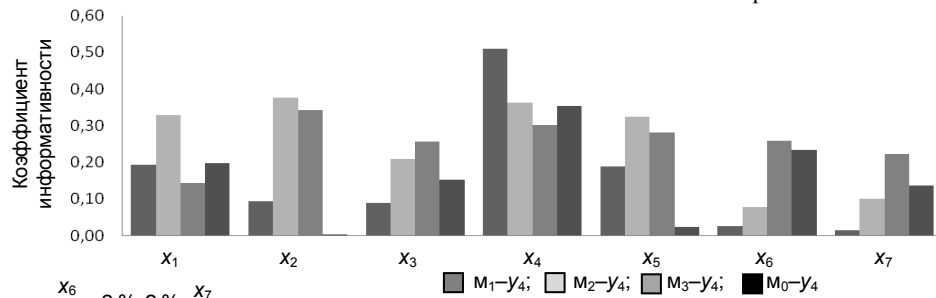
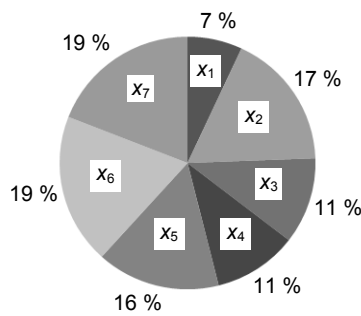
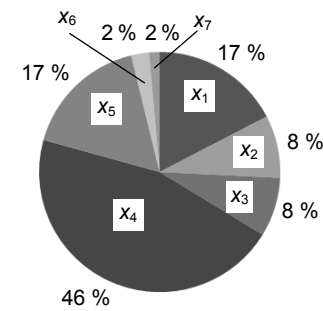


Рис. 4. Гистограмма распределения коэффициентов информативности для термодинамической характеристики y_4 по отношению к продуктам химических реакций топливного элемента: $x_1 - H_2O$; $x_2 - CO$; $x_3 - CO_2$; $x_4 - CH_4$; $x_5 - H_2$; $x_6 - N_2$; $x_7 - O_2$; M_1-y_4 , M_2-y_4 , M_3-y_4 , M_0-y_4 – матрицы (таблицы) расчетных данных для произведения температуры и давления

Fig. 4. Distribution histogram of information coefficients for thermodynamical characteristic y_4 in relation to the fuel cell chemical reaction products: $x_1 - H_2O$; $x_2 - CO$; $x_3 - CO_2$; $x_4 - CH_4$; $x_5 - H_2$; $x_6 - N_2$; $x_7 - O_2$; M_1-y_4 , M_2-y_4 , M_3-y_4 , M_0-y_4 – calculated data matrices (tables) for the product of temperature and pressure



Гистограмма распределения коэффициентов информативности для термодинамической характеристики параметра взаимодействия ts (y_5) по отношению к продуктам химических реакций топливного элемента показана на рис. 5. Как видно из рисунка, наиболее информативными по отношению к этому параметру являются продукты химической реакции азота N_2 и кислорода O_2 . Подобный результат наблюдался и для фактора расхода.

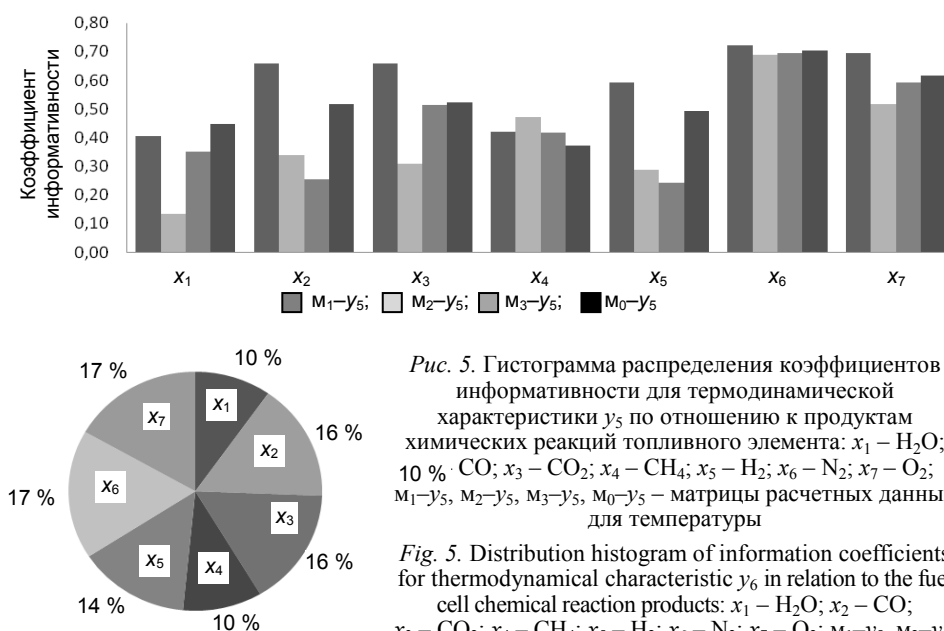


Рис. 5. Гистограмма распределения коэффициентов информативности для термодинамической характеристики y_5 по отношению к продуктам химических реакций топливного элемента: $x_1 - H_2O$; $10\% \cdot CO$; $x_3 - CO_2$; $x_4 - CH_4$; $x_5 - H_2$; $x_6 - N_2$; $x_7 - O_2$; M_1-y_5 , M_2-y_5 , M_3-y_5 , M_0-y_5 – матрицы расчетных данных для температуры

Fig. 5. Distribution histogram of information coefficients for thermodynamical characteristic y_5 in relation to the fuel cell chemical reaction products: $x_1 - H_2O$; $x_2 - CO$; $x_3 - CO_2$; $x_4 - CH_4$; $x_5 - H_2$; $x_6 - N_2$; $x_7 - O_2$; M_1-y_5 , M_2-y_5 , M_3-y_5 , M_0-y_5 – calculated data matrices for the temperature

Гистограмма распределения коэффициентов информативности для термодинамической характеристики параметра взаимодействия p_s (y_6) по отношению к продуктам химических реакций топливного элемента приведена на рис. 6. Как видно из рисунка, наиболее информативными по отношению к этому параметру являются продукты химической реакции азота N_2 и кислорода O_2 . Подобный результат наблюдался и для фактора расхода и температуры с энтропией.

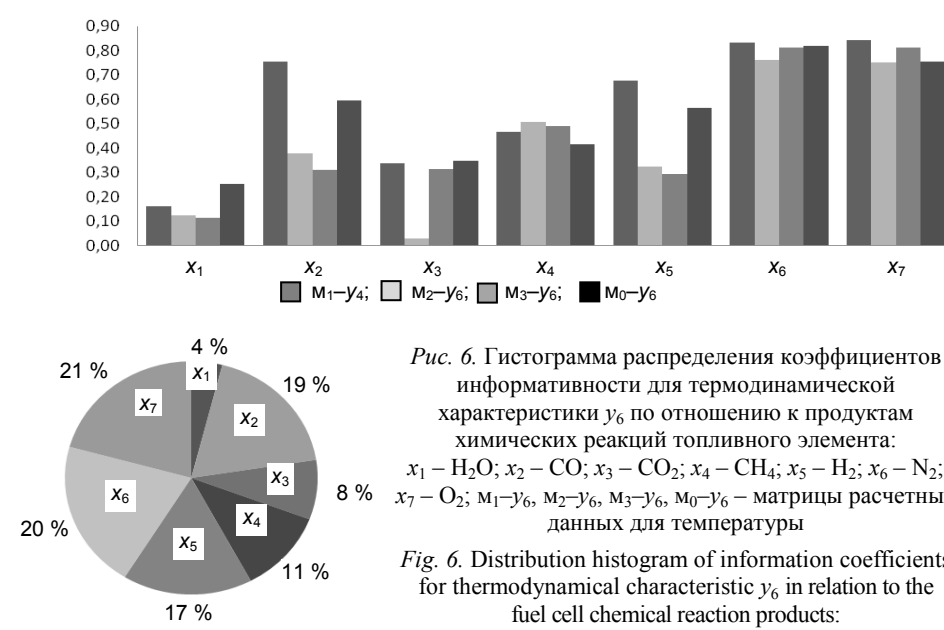


Рис. 6. Гистограмма распределения коэффициентов информативности для термодинамической характеристики y_6 по отношению к продуктам химических реакций топливного элемента: $x_1 - H_2O$; $x_2 - CO$; $x_3 - CO_2$; $x_4 - CH_4$; $x_5 - H_2$; $x_6 - N_2$; $x_7 - O_2$; M_1-y_6 , M_2-y_6 , M_3-y_6 , M_0-y_6 – матрицы расчетных данных для температуры

Fig. 6. Distribution histogram of information coefficients for thermodynamical characteristic y_6 in relation to the fuel cell chemical reaction products: $x_1 - H_2O$; $x_2 - CO$; $x_3 - CO_2$; $x_4 - CH_4$; $x_5 - H_2$; $x_6 - N_2$; $x_7 - O_2$; M_1-y_6 , M_2-y_6 , M_3-y_6 , M_0-y_6 – calculated data matrices for the temperature

ВЫВОДЫ

1. Совершенствование технологии прямого преобразования с применением твердопливных элементов требует использования гибридных схем энергетических установок с более глубокой утилизацией энергии топлива. При этом могут быть эффективно применены широкая гамма видов топлива и большое разнообразие структурных технологических схем. С научной и практической точек зрения представляет интерес как структурная оптимизация технологических схем, так и оптимизация режимов работы их элементов и в первую очередь самих топливных элементов.

2. Статистический анализ влияния термодинамических, расходных и концентрационных параметров процесса функционирования твердооксидных топливных элементов показал, что наиболее существенное влияние на эффективность работы твердооксидных топливных элементов в исследованной области оказывают факторы взаимодействия (температура – расход и давление – расход) и концентрации азота N_2 и кислорода O_2 . Именно эти факторы должны в первую очередь учитываться при исследовании и оптимизации режимов работы твердооксидных топливных элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Akkaya, A. V. An Analysis of SOFC/GT CHP System Based on Exergetic Performance Criteria / A. V. Akkaya, B. Sahin, H. H. Erdem // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2008. Vol. 33, No 10. P. 2566–2577.
2. A Review of Integration Strategies for Solid Oxide Fuel Cells / X. Zhang [et al.] // *Journal of Power Sources*. 2010. Vol. 195, No 3. P. 685–702.
3. Zabihian, F. A Review on Modeling of Hybrid Solid Oxide Fuel Cell Systems / F. Zabihian, A. Fung // *International Journal of Engineering*. 2009. Vol. 3, No 2. P. 85–119.
4. Huang, B. Solid Oxide Fuel Cell: Perspective of Dynamic Modeling and Control / B. Huang, Y. Qi, M. Murshed // *Journal of Process Control*. 2011. Vol. 21, No 10. P. 1426–1437.
5. Cheddie, D. F. Integration of a Solid Oxide Fuel Cell into a 10 MW Gas Turbine power Plant / D. F. Cheddie // *Energies*. 2010. Vol. 3, No 4. P. 754–769.
6. Thermal-Economic-Environmental Analysis and Multi-Objective Optimization of an Internal-Reforming Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Hybrid System / A. Shirazi [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012. Vol. 37, No 24. P. 19111–19124.
7. Mahalingam, A. Clean Electricity Production by Solid Oxide Fuel Cell-Waste Heat Recovery Boiler Arrangement in Conjunction with a Gas Turbine / A. Mahalingam, M. Vaish, S. Agarwal // *Proceedings of the 2nd International Conference on Environmental Science and Development, International Proceedings of Chemical, Biological and Environmental Engineering (IPCBE)*. – Singapore: IACSIT Press, 2011. Vol. 4. P. 255–258.
8. Arsalis, A. Thermoeconomic Modeling and Parametric Study of Hybrid Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine-Steam Turbine Power Plants Ranging from 1.5 MWe to 10 MWe / A. Arsalis, M. R. Von Spakovsky, F. Calise // *Journal of Fuel Cell Science and Technology*. 2009. Vol. 6, No 1. P. 0110151–01101512.
9. Patel, H. C. Thermodynamic Analysis of Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Systems Operating with Various Biofuels / H. C. Patel, T. Woudstra, P. V. Aravind // *Fuel Cells*. 2012. Vol. 12, No 6. P. 1115–1128.
10. Exergy Analysis of an Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Hybrid System Fed with Ethanol / A. Stamatis [et al.] // *Energies*. 2012. Vol. 5, No 11. P. 4268–4287.
11. Ugartemendia, J. Operating Point Optimization of a Hydrogen Fueled Hybrid Solid Oxide Fuel Cell-Steam Turbine (SOFC-ST) Plant / J. Ugartemendia, J. X. Ostolaza, I. Zubia // *Energies*. – 2013. Vol. 6, No 10. P. 5046–5068.

12. Chan, S. H. Energy and Exergy Analysis of Simple Solid Oxide Fuel-Cell Power Systems / S. H. Chan, C. F. Low, O. L. Ding // *Journal of Power Sources*. 2002. Vol.103, No 2. P. 188–200.
13. Characteristics and Performance of Electrolyte-Supported Solid Oxidefuel Cells under Ethanol and Hydrogen / R. Muccillo [et al.] // *Journal of the Electrochemical Society*. 2008. Vol. 155, No 3. P. B232–B235.
14. Li, Y. Performance Study of a Solid Oxide Fuel Cell and Gas Turbine Hybrid System Designed for Methane Operating with Non-Designed Fuels / Y. Li, Y. Weng // *Journal of Power Sources*. 2011. Vol. 196, No 8. P. 3824–3835.
15. Blagojević, V. A. Hydrogen Economy: Modern Concepts, Challenges and Perspectives / V. A. Blagojević [et al.] // *Hydrogen Energy – Challenges and Perspectives*. – Rijeka, Croatia: InTech, 2012. Chapter: 1. P. 3–28.
16. Holmes, M. Hydrogen Separation Membranes. Technical Report [Electronic resource] // University of North Dakota. 2010. – Mode of access: <http://www.undeerc.org/ncht/>. Date of access: 26.09.2013.
17. Седнин, В. А. Энергетическая система биогазовых комплексов на базе топливных элементов / В. А. Седнин, А. А. Чичко, А. А. Матявин // *Энергия и Менеджмент*. 2014. № 4–5. С. 8–12.
18. Jradi, M. Tri-Generation Systems: Energy Policies, Prime Movers, Cooling Technologies, Configuration and Operations Strategies / M. Jradi, S. Riffat // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 32. P. 396–415.
19. Macro Level Modeling of a Tubular Solid Oxide Fuel Cell / T. Suther [et al.] // *Sustainability*. 2010. Vol. 2, No 11. P. 3549–3560.
20. Effects of Operating and Design Parameters on the Performance of a Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine System / T. Suther [et al.] // *International Journal of Energy Research*. 2010. No 35 (7). P. 616–632.

Поступила 31.08.2015 Подписана в печать 21.10.2015 Опубликована онлайн 16.12.2015

REFERENCES

1. Akkaya A. V., Sahin B., & Erdem H. H. (2008) An Analysis of SOFC/GT CHP System Based on Exergetic Performance Criteria. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33 (10), 2566–2577. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2008.03.013.
2. Zhang X., Chan S. H., Li G., Ho H. K., Li J., & Feng Z. (2010) A Review of Integration Strategies for Solid Oxide Fuel Cells. *Journal of Power Sources*, 195 (3), 685–702. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2009.07.045.
3. Zabihian F. A., & Fung A. (2009) Review on Modeling of Hybrid Solid Oxide Fuel Cell Systems. *International Journal of Engineering*, 3 (2), 85–119.
4. Huang B., Qi Y., & Murshed M. (2011) Solid Oxide Fuel Cell: Perspective of Dynamic Modeling and Control. *Journal of Process Control*, 21 (10), 1426–1437. DOI: 10.1016/j.jprocont.2011.06.017.
5. Cheddie D. F. (2010). Integration of a Solid Oxide Fuel Cell into a 10 MW Gas Turbine Power Plant. *Energies*, 3 (4), 754–769. DOI: 10.3390/en3040754.
6. Shirazi A., Najafi B., Aminyavari M., Rinaldi F. & Taylor R. A. (2012) Thermal-Economic-Environmental Analysis and Multi-Objective Optimization of an Internal-Reforming Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Hybrid System. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37 (24), 19111–19124. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.09.143.
7. Mahalingam A., Vaish M., & Agarwal S. (2011) Clean Electricity Production by Solid Oxide Fuel Cell-Waste Heat Recovery Boiler Arrangement in Conjunction with a Gas Turbine. *Proceedings of the 2nd International Conference on Environmental Science and Development, International Proceedings of Chemical, Biological and Environmental Engineering (IPCBE)*. Singapore, IACSIT Press, Vol. 4, 255–258.
8. Arsalis A., Von Spakovsky M. R., & Calise F. (2009) Thermo-economic Modeling and Parametric Study of Hybrid Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine-Steam Turbine Power Plants Ranging From 1.5 MWe to 10 MWe. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 6 (1), 0110151–01101512. DOI: 10.1115/1.2971127.

9. Patel H. C., Woudstra T., & Aravind P. V. (2012) Thermodynamic Analysis of Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Systems Operating with Various Biofuels. *Fuel Cells*, 12 (6), 1115–1128. DOI: 10.1002/fuce.201200062.
10. Stamatis A., Vinni C., Bakalis D., Tzorbatzoglou F., & Tsiakaras P. (2012) Exergy Analysis of an Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Hybrid System Fed with Ethanol. *Energies*, 5 (11), 4268–4287. DOI: 10.3390/en5114268.
11. Ugartemendia J., Ostolaza J. X., & Zubia I. (2013) Operating Point Optimization of a Hydrogen Fueled Hybrid Solid Oxide Fuel Cell-Steam Turbine (SOFC-ST) Plant. *Energies*, 6 (10), 5046–5068. DOI: 10.3390/en6105046.
12. Chan S. H., Low C. F., & Ding O. L. (2002) Energy and Exergy Analysis of Simple Solid Oxide Fuel-Cell Power Systems. *Journal of Power Sources*, 103 (2), 188–200. DOI: 10.1016/S0378-7753(01)00842-4.
13. Muccillo R., Muccillo E. N. S., Fonseca F., & De Florio D. Z. Characteristics and Performance of Electrolyte-Supported Solid Oxide Fuel Cells under Ethanol and Hydrogen. *Journal of the Electrochemical Society*, 155 (3), B232–B235. DOI: 10.1149/1.2828024.
14. Li Y., & Weng Y. (2011) Performance Study of a Solid Oxide Fuel Cell and Gas Turbine Hybrid System Designed for Methane Operating with Non-Designed Fuels. *Journal of Power Sources*, 196 (8), 3824–3835. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2011.01.011.
15. Blagojević V. A., Minić Dejan G., Grbović Novaković J., & Minic Dragica M. (2012) Hydrogen Economy: Modern Concepts, Challenges and Perspectives. *Hydrogen Energy – Challenges and Perspectives, Chapter: 1*. InTech: Rijeka, Croatia, 3–28. DOI: 10.5772/46098.
16. Holmes M. (2010) Hydrogen Separation Membranes. Technical Report. *University of North Dakota*. Available at: <http://www.undeerc.org/ncht/>. (Accessed on 26 September 2013).
17. Sednin V. A., Chichko A. A., & Matyavin A. A. (2014) Energy System of the Biogas Complexes Based on the Fuel Elements. *Energija i Menadžment [Energy and Management]*, 4–5, 8–12 (in Russian).
18. Jradi M., & Riffat S. (2014) Tri-Generation Systems: Energy Policies, Prime Movers, Cooling Technologies, Configuration and Operation Strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 396–415. DOI: 10.1016/j.rser.2014.01.039.
19. Suther T., Fung A., Koksal M., & Zabihian F. (2010) Macro Level Modeling of a Tubular Solid Oxide Fuel Cell. *Sustainability*, 2 (11), 3549–3560. DOI: 10.3390/su2113549.
20. Suther T., Fung A., Koksal M., & Zabihian F. (2010) Effects of Operating and Design Parameters on the Performance of a Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine System. *International Journal of Energy Research*, 35 (7), 616–532. DOI: 10.1002/er.1722.