

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТВЁРДООКСИДНОГО ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА НА ВОДОРОДЕ И ЕЁ ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

© 2025

И. М. Горюнов доктор технических наук, старший научный сотрудник,
профессор кафедры авиационных двигателей;
Уфимский университет науки и технологий;
gorjunov@mail.ru

А. А. Никитин аспирант кафедры авиационных двигателей;
Уфимский университет науки и технологий;
aleksandr-nikitin1999@yandex.ru

А. А. Лоскутников кандидат технических наук, главный конструктор ОКБ «Мотор»;
ПАО «ОДК-УМПО», г. Уфа;
alex_loskutnikov@mail.ru

Н. Е. Иванов студент кафедры авиационных двигателей;
Уфимский университет науки и технологий;
Nikita.ivan2001@yandex.ru

Проведён анализ существующих математических моделей, позволяющих выполнять термогазодинамические расчёты газотурбинных двигателей различных термогазодинамических циклов. Было выявлено, что в большинстве моделей отсутствует возможность расчёта при использовании твёрдооксидных топливных элементов или где в качестве топлива используется метан с последующим получением водорода в результате пароводяной конверсии. В настоящей работе разработана математическая модель твёрдооксидного топливного элемента, учитывающая внутренние электрохимические реакции с последующим определением основных электрохимических параметров с применением в качестве топлива водорода. На основе разработанной математической модели проведены расчётные исследования и представлены результаты оценки адекватности модели, которые демонстрируют высокую корреляцию с экспериментальными данными. Разработанная математическая модель реализована в виде модуля в программном комплексе DVIGwT. Программная реализация модели позволит выполнять термогазодинамические расчёты перспективных схем газотурбинных двигателей, включающих твёрдооксидные топливные элементы.

Газотурбинный двигатель; твёрдооксидный топливный элемент; термогазодинамические расчёты; электрохимическая реакция; водород

Цитирование: Горюнов И.М., Никитин А.А., Лоскутников А.А., Иванов Н.Е. Математическая модель твёрдооксидного топливного элемента на водороде и её программная реализация // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2025. Т. 24, № 2. С. 124-135.
DOI: 10.18287/2541-7533-2025-24-2-124-135

Введение

Одним из перспективных направлений совершенствования газотурбинных двигателей (ГТД) является использование альтернативных видов топлива и более эффективных систем их сжигания. Например, применение топливных элементов (ТЭ).

В ТЭ в результате электрохимической реакции преобразуются энергия топлива и окислителя в электрическую энергию [1]. Существуют различные типы топливных элементов (в зависимости от электролита и рабочих температур), но поскольку для ГТД характерна высокая температура рабочего тела, целесообразно рассматривать применение высокотемпературных твёрдооксидных топливных элементов (ТОТЭ). Применение ТОТЭ позволяет создавать гибридные силовые установки (ГСУ) летательных аппаратов и энергетических установок (ЭУ) [1].

Для выполнения параметрических исследований таких систем требуется дальнейшее совершенствование метода термогазодинамических расчётов схем силовых установок, включающих ТОТЭ.

Существующие методы термогазодинамических расчётов, например, ThermoGTE [2], АСТРА [3], АС ГРЭТ [4], GasTurb [5] и др. не позволяют выполнять исследования ГТД на базе ТОТЭ, либо решают данную задачу для определённой конфигурации газотурбинного двигателя.

В работах [6; 7] рассматриваются электрохимические процессы, происходящие в топливных элементах. В статье [8] рассматривается расчёт электродвижущей силы (ЭДС) в твёрдооксидном топливном элементе с учётом изменений энтропии и свободной энергии Гиббса инертных веществ, а также реагентов и продуктов, не участвующих в электрохимических реакциях. В работе [9] при рассмотрении гибридных силовых установок математическая модель ТОТЭ представляется в виде вольтамперной характеристики.

В системе математического моделирования тепловых, энергетических и комбинированных установок (DVIGwT) [10], созданной в УГАТУ Горюновым И.М., в настоящее время реализован модуль «SOFC», который позволяет выполнять расчёты моделей газотурбинных установок различных конфигураций на базе ТОТЭ только с учётом пароводяной конверсии (ПВК) природного газа, но при этом отсутствует возможность осуществлять термогазодинамические расчёты газотурбинных двигателей на базе ТОТЭ без использования ПВК [11].



Рис. 1. Схема функционирования твёрдооксидного топливного элемента

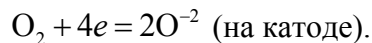
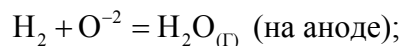
На рис. 1 представлена схема функционирования твёрдооксидного топливного элемента. В ТОТЭ происходят следующие процессы: воздух (окислитель) поступает на катод, топливо (H_2) – на анод. На катоде происходит восстановление кислорода воздуха (O_2) до анионов (O_2^-). Далее анионы кислорода воздуха проникают через мембрану к аноду и окисляют водород (H_2) до водяного пара (H_2O). Более подробно данные процессы описаны в [1].

Анализ алгоритма расчёта твёрдооксидного топливного элемента

На рис. 2 представлен алгоритм расчёта процессов, происходящих в ТОТЭ, аналогичный представленному в [11]. Отличие приведённого на рис. 2 алгоритма заключается в том, что в качестве топлива используется водород, а не метан, как в [11], и, соответственно, отсутствует паровая конверсия метана.

Значения параметров теплофизических свойств рабочих тел и смесей в промежуточных расчётах определяются с использованием методики, реализованной Трусовым Б.Г. (МГТУ им. Н.Э. Баумана) в программной процедуре расчёта состава и параметров равновесного состояния произвольных многокомпонентных многофазных

систем при высокой температуре «Thermo» [12]. Основные уравнения, описывающие химические реакции в ТОТЭ, аналогично [11]:



Основная токообразующая реакция в ТОТЭ:

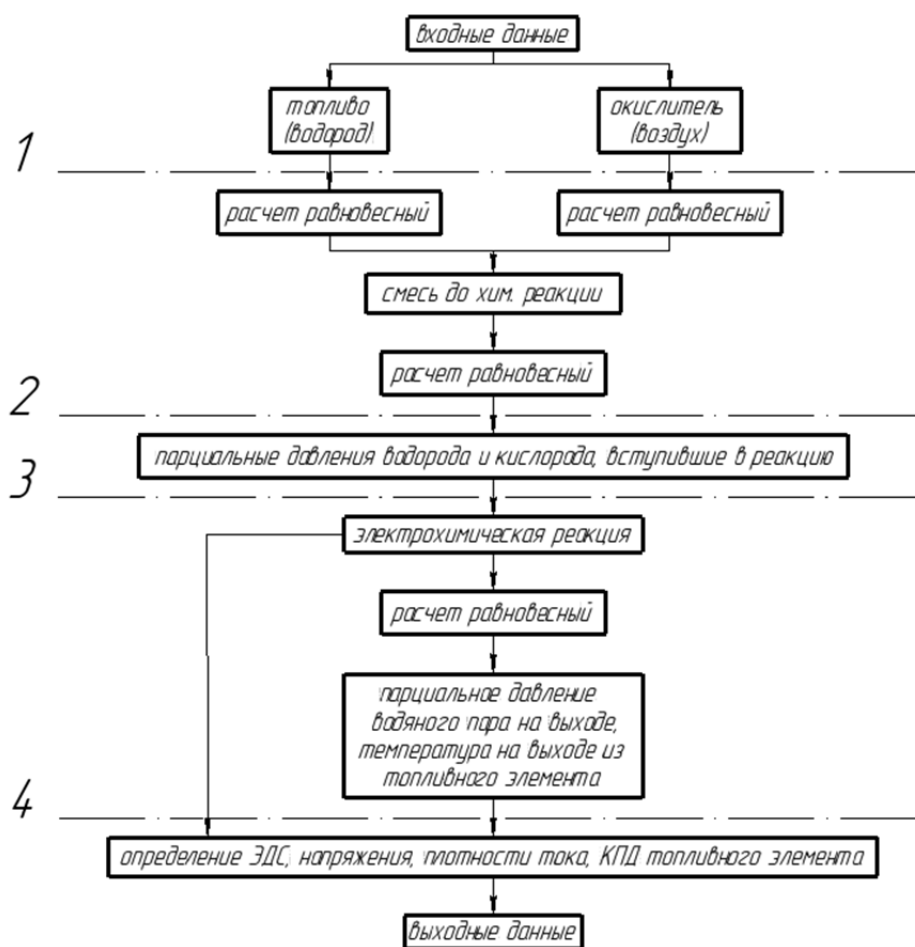
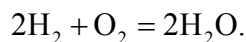


Рис. 2. Алгоритм расчёта твёрдооксидного топливного элемента

Алгоритм расчёта ТОТЭ состоит из следующих этапов:

1. На первом этапе в ТОТЭ поступают окислитель (воздух) с параметрами: $b_{\text{ок}}$ – влагосодержание окислителя; $p_{\text{ок}}^*$ – полное давление окислителя; $\alpha_{\text{ок}}$ – коэффициент избытка окислителя; $G_{\text{ок}}$ – расход окислителя; $T_{\text{ок}}^*$ – полная температура окислителя; и топливо с параметрами: $p_{\text{т}}^*$ – полное давление топлива; $G_{\text{т}}$ – расход топлива; $T_{\text{т}}$ – температура топлива.

2. На втором этапе выполняется расчёт смеси топлива и окислителя до основной реакции в ТЭ:

– массовый расход смеси топлива и окислителя на входе в ТЭ:

$$G_{\text{осн.к}} = G_{\text{ок}} + G_{\text{т}};$$

– массовые доли окислителя и топлива:

$$g_{\text{ок}} = \frac{G_{\text{ок}}}{G_{\text{осн.к}}};$$

$$g_{\text{т}} = \frac{G_{\text{т}}}{G_{\text{осн.к}}};$$

– удельные объёмы окислителя $\nu_{\text{ок}}$ и топлива $\nu_{\text{т}}$; энтальпии окислителя $i_{\text{ок}}$ и топлива $i_{\text{т}}$; молярные массы газовых фаз окислителя $\mu_{\text{ок}}$ и топлива $\mu_{\text{т}}$; а также теплоёмкости при постоянном объёме для окислителя $c_{\text{вок}}$ и топлива $c_{\text{вт}}$ определяются по [12] в зависимости от температуры и давления, соответственно, окислителя и топлива:

$$\nu_{\text{ок}}, i_{\text{ок}}, \mu_{\text{ок}}, c_{\text{вок}} = f(T_{\text{ок}}, p_{\text{ок}});$$

$$\nu_{\text{т}}, i_{\text{т}}, \mu_{\text{т}}, c_{\text{вт}} = f(T_{\text{т}}, p_{\text{т}});$$

– энтальпия смеси топлива и окислителя:

$$i_{\text{см}} = g_{\text{т}} i_{\text{т}} + g_{\text{ок}} i_{\text{ок}};$$

– температуры смеси в основной камере ТЭ:

$$T_{\text{см}} = \frac{g_{\text{т}} c_{\text{вт}} T_{\text{т}} + g_{\text{ок}} c_{\text{вок}} T_{\text{ок}}}{g_{\text{т}} c_{\text{вт}} + g_{\text{ок}} c_{\text{вок}}};$$

– парциальное давление топлива и окислителя в смеси основной камеры ТЭ:

$$p_{\text{т осн.к}} = \frac{p_{\text{т}} G_{\text{т}} \nu_{\text{т}}}{(G_{\text{т}} \nu_{\text{т}} + G_{\text{ок}} \nu_{\text{ок}})} \cdot \frac{T_{\text{см}}}{T_{\text{т}}};$$

$$p_{\text{ок осн.к}} = \frac{p_{\text{ок}} G_{\text{ок}} \nu_{\text{ок}}}{(G_{\text{т}} \nu_{\text{т}} + G_{\text{ок}} \nu_{\text{ок}})} \cdot \frac{T_{\text{см}} \cdot 1000}{T_{\text{ок}}};$$

– давление смеси основной камеры ТЭ:

$$p_{\text{осн.к}} = p_{\text{т осн.к}} + p_{\text{ок осн.к}}.$$

3. Третий этап заключается в определении парциальных давлений водорода и кислорода, вступивших в реакцию:

– молярные массы газовых фаз окислителя $\mu_{\text{ок}}$ и топлива $\mu_{\text{т}}$, массовые доли водорода g_{H_2} и кислорода g_{O_2} в смеси в ТЭ определяются по [12] в зависимости от температуры $T_{\text{см}}$ смеси и парциальных давлений топлива $p_{\text{т очн.к}}$ и окислителя $p_{\text{ок очн.к}}$ в смеси основной камеры ТЭ:

$$\mu_{\text{ок}}, g_{\text{O}_2} = f(T_{\text{см}}, p_{\text{ок очн.к}});$$

$$\mu_{\text{т}}, g_{\text{H}_2} = f(T_{\text{см}}, p_{\text{т очн.к}});$$

– мольная масса смеси в ТЭ:

$$\mu_{\text{очн.к}} = \frac{1}{g_{\text{т}}/\mu_{\text{т}} + g_{\text{ок}}/\mu_{\text{ок}}};$$

– объёмная доля и парциальное давление водорода в смеси в ТЭ:

$$r_{\text{H}_2} = \frac{g_{\text{т}} g_{\text{H}_2} \mu_{\text{очн.к}}}{\mu_{\text{H}_2}},$$

$$p_{\text{H}_2} = r_{\text{H}_2} p_{\text{очн.к}};$$

– объёмная доля и парциальное давление кислорода в смеси в ТЭ:

$$r_{\text{O}_2} = \frac{g_{\text{ок}} g_{\text{O}_2} \mu_{\text{очн.к}}}{\mu_{\text{O}_2}},$$

$$p_{\text{O}_2} = r_{\text{O}_2} p_{\text{очн.к}};$$

– массовая доля водорода и кислорода в основной электрохимической реакции:

$$g_{\text{H}_2 \text{реак}} = \frac{g_{\text{H}_2}}{g_{\text{H}_2} + g_{\text{O}_2}};$$

$$g_{\text{O}_2 \text{реак}} = \frac{g_{\text{O}_2}}{g_{\text{H}_2} + g_{\text{O}_2}};$$

– удельные объёмы кислорода ν_{O_2} и водорода ν_{H_2} , а также энтальпии кислорода i_{O_2} и водорода i_{H_2} в смеси в ТЭ определяются по [12] в зависимости от температуры $T_{\text{см}}$ смеси и парциальных давлений кислорода p_{O_2} и водорода p_{H_2} в смеси в ТЭ:

$$\nu_{\text{O}_2}, i_{\text{O}_2} = f(T_{\text{см}}, p_{\text{O}_2});$$

$$\nu_{H_2}, i_{H_2} = f(T_{cm}, p_{H_2});$$

– парциальное давление водорода и кислорода в смеси основной реакции:

$$p_{H_2 \text{ реак}} = \frac{p_{H_2} \nu_{H_2}}{\nu_{H_2} + g_{O_2} \nu_{O_2}};$$

$$p_{O_2 \text{ реак}} = \frac{p_{O_2} \nu_{O_2} g_{O_2}}{\nu_{H_2} + g_{O_2} \nu_{O_2}}.$$

4. На четвёртом этапе рассчитывается равновесное состояние смеси основной реакции окисления водорода кислородом воздуха с образованием паров воды. Определяются парциальные давления и температура продуктов реакции:

– давление основной реакции в ТЭ:

$$p_{\text{реак}} = p_{H_2 \text{ реак}} + p_{O_2 \text{ реак}};$$

– температура $T_{\text{реак}}$, суммарное число молей системы $M_{\text{реак}}$, энтальпия $i_{\text{реак}}$ реакции и парциальное давление водяного пара $p_{H_2O \text{ реак}}$ основной реакции определяются по [12] в зависимости от температуры T_{cm} смеси и давления $p_{\text{реак}}$ основной реакции в ТЭ:

$$M_{\text{реак}}, i_{\text{реак}}, T_{\text{реак}}, p_{H_2O \text{ реак}} = f(T_{cm}, p_{\text{реак}});$$

– давление топлива в смеси до основной реакции:

$$p_{T \text{ см}} = \frac{p_{\text{осн.к}} g_T \mu_{\text{осн.к}}}{\mu_T};$$

– энтропия $s_{T \text{ вх}}$, газовая постоянная $R_{T \text{ вх}}$ топлива в смеси до основной реакции в ТЭ определяются по [12] в зависимости от температуры T_{cm} смеси и давления топлива $p_{T \text{ см}}$ в смеси до основной реакции:

$$s_{T \text{ вх}}, R_{T \text{ вх}} = f(T_{cm}, p_{T \text{ см}});$$

– давление окислителя в смеси до основной реакции:

$$p_{O_2 \text{ см}} = \frac{p_{\text{осн.к}} g_{O_2} \mu_{\text{осн.к}}}{\mu_{O_2}};$$

– энтропия $s_{O_2 \text{ вх}}$, газовая постоянная $R_{O_2 \text{ вх}}$ окислителя в смеси до основной реакции в ТЭ определяются по [12] в зависимости от температуры T_{cm} смеси и давления $p_{O_2 \text{ см}}$ окислителя в смеси до основной реакции:

$$s_{\text{ок вх}}, R_{\text{ок вх}} = f(T_{\text{см}}, p_{\text{ок см}});$$

– изменение энтропии смеси при смешении до основной реакции:

$$\Delta s_{\text{см}} = g_{\text{т}} R_{\text{т вх}} \ln \left(\frac{\mu_{\text{т}}}{g_{\text{т}} \mu_{\text{осн.к}}} \right) + g_{\text{ок}} R_{\text{ок вх}} \ln \left(\frac{\mu_{\text{ок}}}{g_{\text{ок}} \mu_{\text{осн.к}}} \right);$$

– энтропия смеси до основной реакции:

$$s_{\text{см вх}} = g_{\text{т}} s_{\text{т вх}} + g_{\text{ок}} s_{\text{ок вх}} + \frac{\Delta s_{\text{см}}}{1000};$$

– относительный расход топлива:

$$q_{\text{т}} = \frac{G_{\text{т}}}{G_{\text{ок}}};$$

– коэффициент избытка окислителя:

$$\alpha_{\text{ок см}} = \frac{1 - b_{\text{ок}}}{q_{\text{т}} L_0};$$

– энтропия $s_{\text{см вых}}$ и энтальпия $i_{\text{см вых}}$ смеси на выходе из ТЭ определяются по [12] в зависимости от температуры $T_{\text{см}}$ смеси, давления $p_{\text{осн.к}}$ смеси основной камеры ТЭ и коэффициента избытка окислителя $\alpha_{\text{ок см}}$:

$$s_{\text{см вых}}, i_{\text{см вых}} = f(T_{\text{см}}, p_{\text{осн.к}}, \alpha_{\text{ок см}}).$$

– энтальпия смеси на выходе из ТЭ:

$$i_{\text{тэ вых}} = i_{\text{см вых}} - T_{\text{см}} (s_{\text{см вых}} - s_{\text{см вх}}).$$

– температура $T_{\text{тэ вых}}$ смеси на выходе из ТЭ определяются по [12] в зависимости от энтальпии $i_{\text{тэ вых}}$ смеси на выходе из ТЭ, давления $p_{\text{осн.к}}$ смеси основной камеры ТЭ и коэффициента избытка окислителя $\alpha_{\text{ок см}}$:

$$T_{\text{тэ вых}} = f(i_{\text{тэ вых}}, p_{\text{осн.к}}, \alpha_{\text{ок см}}).$$

5. В результате определяются основные электрохимические параметры ТЭ [11]: E_0 – ЭДС топливного элемента; i – плотность тока; I – сила тока электрохимического генератора (ЭХГ); U_{max} – напряжение ЭХГ при максимальной мощности; N_q – плотность мощности ЭХГ; N_{max} – максимальная мощность ЭХГ; $T_{\text{реак}}$ – температура реакции.

Математическая модель ТОТЭ реализована в соответствии с алгоритмом, представленном на рис. 2, в программном модуле SOFC2 [13] в системе DVIGwT. Для проверки работоспособности математической модели смоделирована ячейка ТОТЭ по экспериментальным данным РФЯЦ – ВНИИТФ [14]. Рабочее окно с деревом проекта и схемой модели ТОТЭ приведено на рис. 3.

Перечень параметров, характеризующих рабочие тела, соответствуют параметрам, используемым в программном комплексе DVIGwT [10; 15].

В качестве исходных данных, необходимых для моделирования ячейки ТОТЭ, использовались следующие параметры:

- площадь рабочей поверхности $F_{\text{рп}} = 0,0113 \text{ м}^2$;
- полное внутренне сопротивление ТОТЭ $R = 0,34 \text{ Ом}$;
- расход водорода $G_{\text{т}} = 0,153 \cdot 10^{-6} \text{ кг/с}$;
- расход воздуха $G_{\text{ок}} = 3,83 \cdot 10^{-6} \text{ кг/с}$.

Результаты расчёта ячейки ТОТЭ в сравнении с данными [11; 14] приведены в табл. 1.

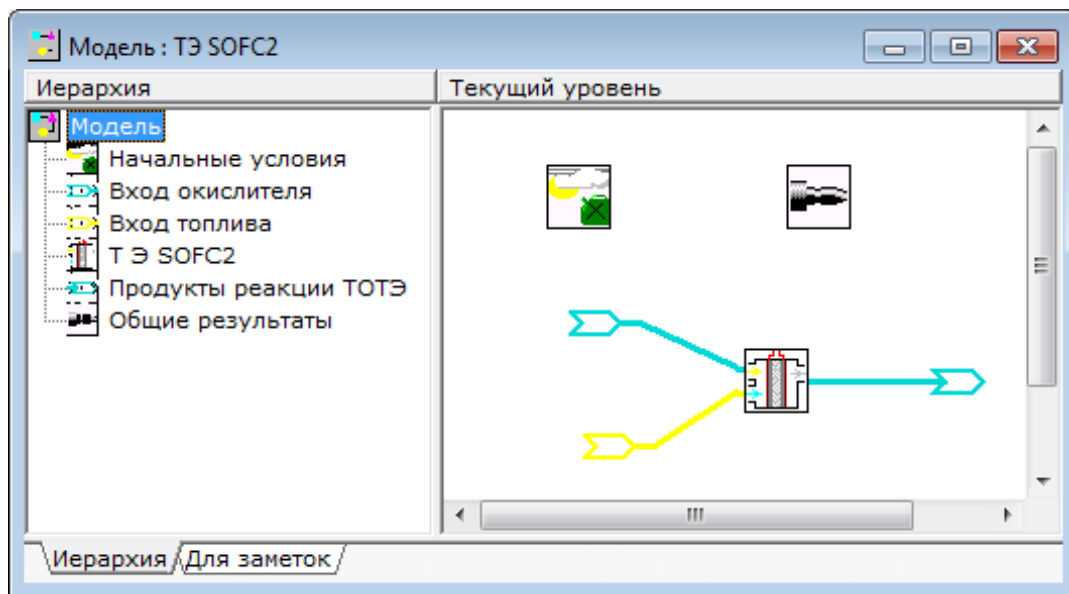


Рис. 3. Рабочее окно с деревом проекта и схемой модели твёрдооксидного топливного элемента

Таблица 1. Результаты расчёта в сравнении с экспериментальными данными

Параметр	РФЯЦ – ВНИИТФ	SOFC2	$\delta, \%$
$E_{\text{э}}, \text{В}$	0,858	0,855	0,35
$i, \text{А/м}^2$	843,204	840,636	0,30
$I, \text{А}$	0,9528	0,9499	0,30
$U_{\text{max}}, \text{В}$	0,429	0,427	0,47
$N_q, \text{Вт/м}^2$	361,535	359,26	0,63
$N_{\text{max}}, \text{Вт}$	0,409	0,406	0,73
$T_{\text{реак}}, \text{К}$	1223,00	1223,00	0

На основании данных табл. 1 следует, что погрешность расчётных данных по сравнению с экспериментальными не превышает 0,73%. Наличие расхождения обусловлено тем, что в математической модели ТОТЭ не учитывается влияние катализатора и электролита на внутренние процессы в топливном элементе.

Заключение

В отличие от ряда работ, в которых математическая модель твёрдооксидного топливного элемента представлена в виде вольтамперной характеристики, в разработанной математической модели учитываются внутренние электрохимические реакции, происходящие в твёрдооксидном топливном элементе. В программном комплексе DVIGwT на основе разработанной математической модели создан программный модуль SOFC2.

Результаты, полученные при моделировании ячейки твёрдооксидного топливного элемента, демонстрируют высокую корреляцию с экспериментальными данными, что подтверждает точность описания рабочих процессов и применимость разработанной математической модели твёрдооксидного топливного элемента.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственного задания № FEUE-2023-0007 (УУНиТ).

Библиографический список

1. Горюнов И.М., Никитин А.А., Иванов Н.Е., Лукин Ю.М. Применение топливных элементов для увеличения эффективности газотурбинного двигателя // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Информационные технологии как основа прогрессивных научных исследований» (25 июня 2024 г., Саратов). Уфа: Аэтерна, 2024. С. 24-28.
2. Термогазодинамические расчёты ГТД. <http://thermogte.ru/>
3. Ткаченко А.Ю., Кузьмичёв В.С., Кулагин В.В., Крупенич И.Н., Рыбаков В.Н. Автоматизированная система термогазодинамического расчёта и анализа (АСТРА-4) газотурбинных двигателей и энергетических установок // Материалы докладов международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (28-30 июня 2011 г., Самара). Ч. 2. Самара: СГАУ, 2011. С. 80-82.
4. Автоматизированная система газодинамических расчётов энергетических турбомашин (АС ГРЭТ).
<https://projects.kgeu.ru/innovatsionnyerazrabotkiinauchnyeproektyvoblastiteploenergetiki/asgret/>
5. GasTurb. <https://www.gasturb.com/index.php>
6. Коровин Н.В. Топливные элементы и электрохимические энергоустановки. М.: Издательство МЭИ, 2005. 280 с.
7. Коровин Н.В. Электрохимическая энергетика. М.: Энергоатомиздат, 1991. 264 с.
8. Яновский Л.С., Байков А.В., Аверьков И.С. Анализ электрохимических реакций в твёрдооксидном топливном элементе: новый подход // Горение и взрыв. 2013. № 6. С. 231-234.
9. Захаренков Е.А. Исследование и оптимизация схем и параметров гибридных электростанций на основе топливных элементов и газотурбинных установок. Автореферат дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2009. 20 с.

10. Горюнов И.М. Термогазодинамические расчёты ГТД и теплоэнергетических установок с использованием системы DVIGwT // Вестник УГАТУ. 2006. Т. 7, № 1 (14). С. 61-70.
11. Лоскутников А.А., Горюнов И.М., Бакиров Ф.Г., Липилин А.С., Кулаев В.В. Разработка модуля термодинамического расчёта твёрдооксидных топливных элементов SOFC // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т. 6, № 10. С. 186-190.
12. Трусов Б. Г. Программная система TERRA для моделирования фазовых и химических равновесий в плазмохимических системах // Сб. материалов 3 Международного симпозиума по теоретической и прикладной плазмохимии (16-21 сентября 2002 г., Плёс, Россия). Т. 1. Иваново: Ивановский государственный химико-технологический университет, 2002. С. 217-220.
13. Горюнов И.М., Никитин А.А., Иванов Н.Е. Модуль термогазодинамического расчёта твёрдооксидных топливных элементов (SOFC2): свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024686059; опубли. 05.11.2024; бюл. № 11.
14. Белов Д.В., Устюгов А.В., Чухарев В.Ф. Исследование электрических характеристик планарного твёрдооксидного топливного элемента // Сборник научно-технических статей «Твёрдооксидные топливные элементы». Снежинск: Издательство РФЯЦ – ВНИИТФ, 2003. С. 334-339.
15. Горюнов И.М. Структурно-параметрический синтез и анализ ГТД и ЭУ // Вестник УГАТУ. 2008. Т. 11, № 2 (29). С. 30-38.

MATHEMATICAL MODEL OF A HYDROGEN SOLID OXIDE FUEL CELL AND ITS SOFTWARE IMPLEMENTATION

© 2025

- I. M. Gorjunov** Doctor of Science (Engineering), Senior Researcher,
Professor of the Department of Aircraft Engines;
Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation;
gorjunov@mail.ru
- A. A. Nikitin** Postgraduate Student of the Department of Aircraft Engines;
Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation;
aleksandr-nikitin1999@yandex.ru
- A. A. Loskutnikov** Candidate of Science (Engineering), Chief Designer of JDB Motor;
PJSC "UEC-UMPO", Ufa, Russian Federation;
alex_loskutnikov@mail.ru
- N. E. Ivanov** Student of the Department of Aircraft Engines;
Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation;
Nikita.ivan2001@yandex.ru

An analysis of the existing mathematical models allowing thermogasdynamic calculations of gas turbine engines of various thermogasdynamic cycles is carried out. It was found that most models do not allow calculation with solid oxide fuel cells or in case methane is used as fuel, with subsequent production of hydrogen as a result of steam-water conversion. Therefore, a mathematical model of a solid oxide fuel cell has been developed that considers internal electrochemical reactions followed by the determination of the main electrochemical parameters with hydrogen used as fuel. Computational studies have been carried out on the basis of the developed mathematical model, and the results of evaluating its adequacy are presented that demonstrate a high correlation with the experimental data, which confirms the accuracy of the description of work processes and the applicability of the developed mathematical model of a solid oxide fuel cell. The developed mathematical model is

implemented as a module in the DVIGwT software package. The application of the developed mathematical model of a solid oxide fuel cell and its software implementation will allow performing thermogasodynamic calculations of advanced schemes of gas turbine engines, including solid oxide fuel cells, and will also reduce time costs and technical risks when performing a large complex of design calculations.

Gas turbine engine; solid oxide fuel cell; thermogasodynamic calculations; electrochemical reaction; hydrogen

Citation: Gorjunov I.M., Nikitin A.A., Loskutnikov A.A., Ivanov N.E. Mathematical model of a hydrogen solid oxide fuel cell and its software implementation. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2025. V. 24, no. 2. P. 124-135. DOI: 10.18287/2541-7533-2025-24-2-124-135

References

1. Goryunov I.M., Nikitin A.A., Ivanov N.E., Lukin Yu.M. *Primenenie toplivnykh elementov dlya uvelicheniya effektivnosti gazoturbinnogo dvigatelya. Sbornik Statey Mezhdunarodnoy Nauchno-Prakticheskoy Konferentsii «Informatsionnye Tekhnologii Kak Osnova Progressivnykh Nauchnykh Issledovaniy» (June, 25, 2024, Saratov)*. Ufa: Aeterna Publ., 2024. P. 24-28. (In Russ.)
2. *Termogazodinamicheskie raschety GTD* [Thermogasodynamic calculations of GTE]. Available at: <http://thermogte.ru>
3. Tkachenko A.Yu., Kuzmichev V.S., Kulagin V.V., Krupenich I.N., Rybakov V.N. Computer-aided system of gas turbine engines and powerplants thermogasdynamic design and analysis (ASTRA-4). *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference named after N.D. Kuznetsov «Trends in Engine Development» (June, 28-30, 2011, Samara)*. Part 2. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2011. P. 80-82. (In Russ.)
4. *Avtomatizirovannaya sistema gazodinamicheskikh raschetov energeticheskikh turbomashin (AS GRET)* [Automatic system of gasdynamic calculations of power turbomachines]. Available at: <https://projects.kgeu.ru/innovatsionnyerazrabotkiinauchnyeproektyvoblastiteploenergetiki/asgret/>
5. GasTurb. Available at: <https://www.gasturb.com/index.php>
6. Korovin N.V. *Toplivnye elementy i elektrokhimicheskie energoustanovki* [Fuel cells and electrochemical power plants]. Moscow: MPEI Publ., 2005. 280 p.
7. Korovin N.V. *Elektrokhimicheskaya energetika* [Electrochemical power engineering]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1991. 264 p.
8. Yanovsky L.S., Baykov A.V., Averkov J.S. Analysis of electrochemical reactions in solid oxide fuel cells: a new approach. *Gorenie i Vzryv*. 2013. No. 6. P. 231-234. (In Russ.)
9. Zakharenkov E.A. *Issledovanie i optimizatsiya skhem i parametrov gibridnykh elektrostantsiy na osnove toplivnykh elementov i gazoturbinnikh ustanovok. Avtoreferat dis. ... kand. tekhn. nauk* [Research and optimization of schemes and parameters of hybrid power plants based on fuel cells and gas turbine power plants. Abstract of Thesis for a Candidate Degree in Science (Engineering)]. Moscow, 2009. 20 p.
10. Goryunov I.M. Thermogasdynamic calculations GTE and heat power installations with use of a system DVIGwT. *Vestnik UGATU*. 2006. V. 7, no. 1 (14). P. 61-70. (In Russ.)
11. Loskutnikov A.A., Gorjunov I.M., Bakirov F.G., Lipilin A.S., Kulaev V.V. Engineering of thermodynamical calculations module of solid oxide fuel cells. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2010. V. 6, no. 10. P. 186-190. (In Russ.)
12. Trusov B. G. Programmaya sistema TERRA dlya modelirovaniya fazovykh i khimicheskikh ravnovesiy v plazmokhimicheskikh sistemakh. *Sb. Materialov 3 Mezhdunarodnogo Simpoziuma po Teoreticheskoy i Prikladnoy Plazmokhimii (September,*

16-21, 2002, Plyos, Russia). V. 1. Ivanovo: Ivanovo State University of Chemistry and Technology Publ., 2002. P. 217-220. (In Russ.)

13. Goryunov I.M., Nikitin A.A., Ivanov N.E. *Modul' termogazodinamicheskogo rascheta tverdooksidnykh toplivnykh elementov (SOFC2)* [Module for thermogasdynamic calculation of solid oxide fuel cells (SOFC2)]. Certificate of state registration of computer program no. 2024686059, 2024. (Publ. 05.11.2024, bull. no. 11)

14. Belov D.V., Ustyugov A.V., Chukharev V.F. Issledovanie elektricheskikh kharakteristik planarnogo tverdooksidnogo toplivnogo elementa. *Sbornik Nauchno-Tekhnicheskikh Statey «Tverdooksidnye Toplivnye Elementy»*. Snezhinsk: RFNC – VNIITF Publ., 2003. P. 334-339. (In Russ.).

15. Goryunov I.M. Structure and parameter synthesis and analyses of air turbine engines and energetic installations. *Vestnik UGATU*. 2008. V. 11, no. 2 (29). P. 30-38. (In Russ.)