

Николаенко А. С.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТВЕРДООКСИДНОГО ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА
НА СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТ

Николаенко А. С.

A. S. Nikolaenko

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТВЕРДООКСИДНОГО ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА
НА СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТ**

**MATHEMATICAL MODEL OF SOLID OXIDE FUEL CELLS' OPERATION IN A STEADY
STATE**



Николаенко Анна Сергеевна – бакалавр техники и технологии по направлению «Теплоэнергетика», студент магистратуры кафедры «Тепловые энергетические установки» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681008, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Розы Люксембург, д. 26, кв. 15; 89242278240. E-mail: anka_nikolaenko@mail.ru.

Ms. Anna S. Nikolaenko - Bachelor of Engineering Technology, specialization: heat power engineering, ME student at the Department of Heat&power Plants, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). 681008, Komsomolsk-on-Amur, 26, Rose Luxembourg St., flat 15; 89242278240. E-mail – anka_nikolaenko@mail.ru.

Аннотация. Показана необходимость дальнейшего совершенствования тепловых электрических станций на примере гибридной энергоустановки (ГибЭУ), состоящей из топливных элементов с твердым оксидным электролитом (ТОТЭ) и газовой турбины. Впервые разработана математическая модель работы ТОТЭ на стационарных режимах работы. На базе математической модели выявлена зависимость мощности топливного элемента от параметров его эксплуатации и намечен путь дальнейших исследований.

Summary. The paper considers the necessity of further improvement of thermal power plants, as exemplified by a hybrid power plant consisting of Solid Oxide Electrolyte Cells (SOEC) and by a gas turbine. The first mathematical model of the performance of a SOFC in steady state is offered. Based on the model, the dependence of the capacity of a fuel cell on the parameters of its operation is shown and the plan of further investigations is suggested.

Ключевые слова: гибридная энергоустановка, твердооксидные топливные элементы, анод, катод, электролит, математическая модель.

Key words: hybrid power plant, solid oxide fuel cell, anode, cathode, electrolyte, mathematical model.

УДК 621.352

В настоящее время большое внимание уделяется разработке ГибЭУ на базе высокотемпературных топливных элементов (ТЭ) и газовой (или паровой) турбины или парогазовой установки для совместного производства электроэнергии [1; 3; 4]. Отличительной особенностью таких энергоустановок является использование принципа прямого преобразования химической энергии топлива в электрическую, минуя традиционные стадии преобразования энергии (химическая – тепловая – механическая – электрическая). Благодаря этому экономичность ГибЭУ почти вдвое выше, чем у традиционных, и КПД может достигать от 70 до 85 % с учетом утилизации тепла. Из-за отсутствия непосредственного химического контакта топлива с окислителем в ТЭ количество удельных выбросов вредных компонентов при работе ГибЭУ почти на 1,5 – 2,5 порядка ниже выбросов от традиционных энергоустановок [1; 3].

Простейший ТЭ представляет собой электрохимический элемент, состоящий из двух не расходующихся электродов, разделенных электролитом. В процессе работы к одному электроду (аноду) непрерывно подводят топливо, к другому (катоде) – окислитель, а на выходе получают электричество и высокопотенциальное тепло [4].

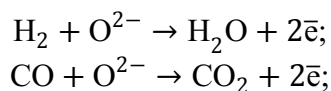


Из всех существующих на сегодняшний день типов ТЭ для стационарной энергетики наиболее предпочтительны твердооксидные (ТОТЭ), так как в состав их электродов не входят катализаторы на основе благородных металлов, что делает их нечувствительными к наличию оксида углерода в топливном газе. Рабочая температура ТОТЭ составляет около 1000 °С. При такой высокой температуре процессы на электродах протекают с большой скоростью при невысоких поляризациях.

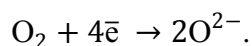
На аноде ТОТЭ топливо (H_2 и CO) окисляется, что сопровождается выделением свободных электронов, поступающих во внешнюю электрическую цепь, а одновременно образующиеся положительные ионы удерживаются на границе анод – электролит (H^+ , CO^+). На другом конце электрической цепи электроны подходят к катоду, на котором идет реакция восстановления (присоединения электронов окислителем до O^{2-}). Отрицательно заряженные ионы кислорода перемещаются через электролит к аноду, где взаимодействуют с положительными ионами топлива.

Токообразующие реакции могут быть представлены уравнениями:

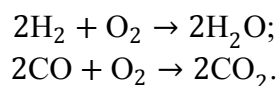
- на аноде



- на катоде



Суммарная реакция, протекающая на единичном ТОТЭ, выглядит как взаимодействие топлива с окислителем:



Электролитом в ТОТЭ обычно является керамика на основе диоксида циркония, например $(ZrO_2)_{0.92}(Y_2O_3)_{0.08}$, анодами – кермет никеля с диоксидом циркония, катодами – полупроводники, например $Sr_xLa_{(1-x)}MnO_3$, $Sr_xLa_{(1-x)}CoO_3$.

Топливом в ТЭ могут являться водород, различные углеводороды и оксид углерода. Окислитель – кислород, в том числе кислород воздуха.

В данной работе рассмотрена ГибЭУ на основе ТОТЭ, высокопотенциальное тепло которых используется в газотурбинной установке (ГТУ). На рис. 1 представлена схема физических процессов гибридной энергоустановки. Воздух из атмосферы засасывается компрессором 1, где сжимается до необходимого давления и подается в рекуператор 2, куда одновременно направляются уходящие газы из газовой турбины 9. После нагрева в рекуператоре сжатый воздух направляется в батарею ТЭ со стороны катода 5. Топливо (метан) после подогрева в теплообменнике 10 горячими продуктами, поступающими из газовой турбины, подается на конверсию в реформер 3, куда одновременно поступает водяной пар из системы 11. В реформере исходное топливо взаимодействует с водяным паром, на каждый моль метана при конверсии образуется 4 моль топлива (H_2 и CO). Продукты конверсии метана подаются на анод 4 ТЭ, где происходит электрохимическая реакция, в результате которой химическая энергия топлива преобразуется в электроэнергию. Выработавшийся в ТЭ постоянный ток преобразуется в переменный посредством инвертора 7. После инвертора электрическая энергия подается в электрическую сеть. Отработавший поток анодных газов, состоящий в основном из диоксида углерода и водяного пара, смешивается с катодным воздухом в камере сгорания 8 и дожигается. Продукты горения после камеры сгорания направляются в газовую турбину, расширяясь, их потенциальная энергия преобразуется в механическую работу, которая частично расходуется на привод компрессора 1, а оставшаяся часть направляется в электрогенератор 12, где преобразуется в электрическую энергию. После турбины уходящие газы проходят через теплообменники, где охлаждаются, отдавая свое тепло сначала воздуху, а затем топливу и воде. После охлаждения газы направляются в дымовую трубу [6].

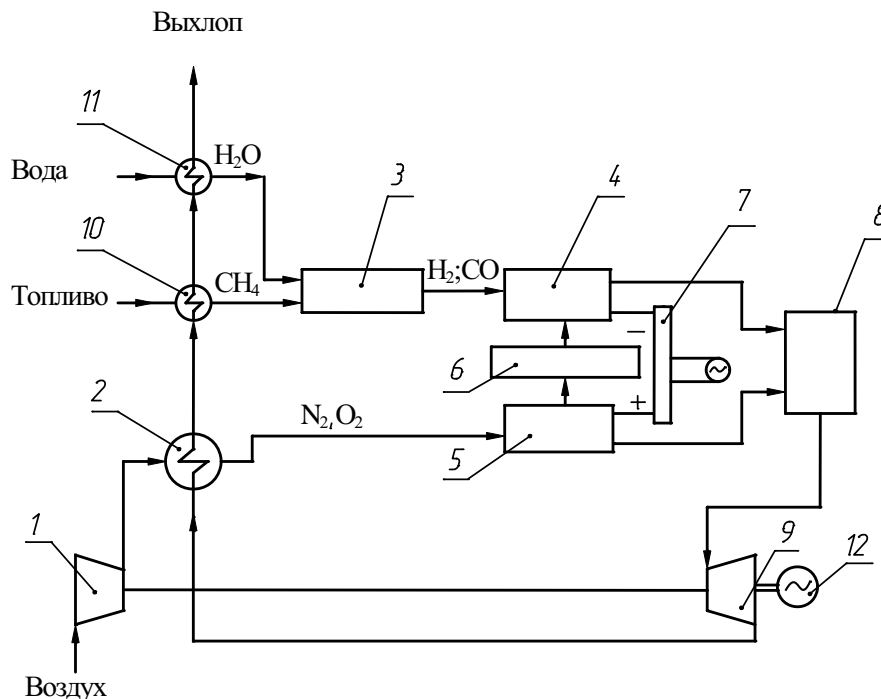


Рис. 1. Схема физических процессов гибридной энергоустановки: 1 – компрессор; 2 – рекуператор; 3 – реформер; 4 – анод; 5 – катод; 6 – электролит; 7 – инвертор; 8 – камера сгорания; 9 – газовая турбина; 10 – подогреватель; 11 – система нагрева, испарения воды и перегрева пара; 12 – электрогенератор

Проектируя систему управления технологическим процессом, разработчик должен быть уверен, что в любой ситуации система будет действовать эффективно. Поэтому при проектировании и наладке система управления должна быть подвергнута всестороннему исследованию в различных режимах.

Самый достоверный способ проверки работоспособности системы управления – натурные испытания на действующем оборудовании. Однако данный способ дорог, трудоемок и не позволяет исследовать аварийные режимы работы установки. В связи с этим возникает необходимость проведения исследований на моделях реальных объектов и систем управления [5].

Для отображения явлений в сложных системах применяют математические модели. Тепловую схему ГибЭУ изображают в форме графа (см. рис. 2). Математическая модель объекта исследования представляет систему балансовых уравнений, реализующих граф системы в математической форме.

Анализ полученных балансовых уравнений показывает, что математическая модель ТОГЭ представляет ниже приведенную систему уравнений:

1 уравнение теплового баланса реформера

$$0,47G_{IX}^{CH_4} C_p t_{IX} + 0,53G_X^{H_2O} C_p t_X = (0,82G_{XI}^{CO} C_p + 0,18G_{XI}^{H_2} C_p) t_{XI};$$

2 уравнение теплового баланса анода

$$(0,82G_{XI}^{CO} C_p + 0,18G_{XI}^{H_2} C_p) t_{XI} + 1,6G_{XVII}^{O^{2-}} C_p t_{XVII} = N_{XVIII} + \\ + (1,35G_{XII}^{H_2O} C_p + 0,03G_{XII}^{H_2} C_p + 0,12G_{XII}^{CO} C_p + 1,1G_{XII}^{CO_2} C_p) t_{XII};$$

Николаенко А. С.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТВЕРДОКСИДНОГО ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА
НА СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТ**

рассмотрение каждого из этих параметров приводит к выводу, что целесообразно в качестве параметра оптимизации принять максимальную мощность ТЭ.

Для решения этой задачи необходимо выразить мощность ТЭ через все расчетные параметры:

$$N_{XVIII} = (0,82G_{XI}^{CO} C_p + 0,18G_{XI}^{H_2} C_p) t_{XI} + 1,6G_{XVII}^{O^{2-}} C_p t_{XVII} - (1,35G_{XII}^{H_2O} C_p + 0,03G_{XII}^{H_2} C_p + 0,12G_{XII}^{CO} C_p + 1,1G_{XII}^{CO_2} C_p) t_{XII}. \quad (1)$$

На основе приведенной формулы математическую зависимость мощности ТЭ от параметров математической модели можно представить в функциональной форме:

$$N_{XVIII} = f(G_{XI}^{CO}, G_{XI}^{H_2}, G_{XVII}^{O^{2-}}, G_{XII}^{H_2O}, G_{XII}^{H_2}, G_{XII}^{CO}, G_{XII}^{CO_2}, t_{XI}, t_{XII}, t_{XVII}).$$

В настоящее время во всех развитых странах проводятся исследования в области ТЭ. Ряд работ [4; 6] показывает, что электрическая мощность ТЭ можно выразить:

$$N_{TЭ} = \frac{G_{H_2} \eta_f n_e F}{1000 M_{H_2}} U_{TЭ}.$$

Применительно к нашей математической модели эта зависимость будет иметь вид:

$$N_{TЭ} = \frac{(0,82G_{XI}^{CO} + 0,18G_{XI}^{H_2}) \eta_f n_e F}{1000(M_{CO} 0,82 + M_{H_2} 0,18)} U_{TЭ}, \quad (2)$$

где $G_{XI}^{H_2}$ – расход водорода, кг/с; G_{XI}^{CO} – расход оксида углерода, кг/с; n_e – число электронов, участвующих в реакции; F – постоянная Фарадея, Кл/моль; η_f – коэффициент использования топлива в ТЭ; $U_{TЭ}$ – напряжение ТЭ, В; M_{CO} , M_{H_2} – молярная масса CO и H₂, г/моль.

Сопоставление формул (1) и (2) приводит к следующей функциональной зависимости мощности ТЭ от его параметров:

$$N_{TЭ} = f(U_{TЭ}, G_{CO}, G_{H_2}, G_{O^{2-}}, G_{H_2O}, G_{CO_2}, \eta_f, t_{ex}^{pear}, t_{вых}^{газ}, M_{H_2}, M_{CO}, F).$$

Дальнейшее исследование данной зависимости должно позволить разработать инженерную методику расчета оптимальных параметров ГибЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коровин, Н. В. Электрохимическая энергетика / Н. В. Коровин. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 264 с.
2. Коровин, Н. В. Расчет коэффициента полезного действия гибридной электростанции с высокотемпературным топливным элементом / Н. В. Коровин, А. С. Седлов // Теплоэнергетика. – 2007. – № 2. – С. 49-53.
3. Лидоренко, Н. С. Электрохимические генераторы / Н. С. Лидоренко, Г. Ф. Мучник. – М.: Энергоиздат, 1982. – 448 с.
4. Лыкова, С. А. Высокоэффективные гибридные энергоустановки на основе топливных элементов / С. А. Лыкова // Теплоэнергетика. – 2002. – № 1. – С. 50-55.
5. Попырин, Л. С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок / Л. С. Попырин. – М.: Энергия, 1978. – 416 с.
6. A High Efficiency PSOFC / ATS – Gas Turbine Power System. Final report. Siemens Westinghouse.