

УДК 629.7.036

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ОБЛИК КОМБИНИРОВАННЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК НА БАЗЕ ГТУ И ТОТЭ

© 2011 А. А. Лоскутников¹, И. М. Горюнов², Ф. Г. Бакиров²

¹Открытое акционерное общество “Научно-производственное предприятие “Мотор”, г. Уфа

²Уфимский государственный авиационный технический университет

Рассмотрены возможности повышения эффективности ГТЭ-10/95 в составе КЭУ с твердооксидными топливными элементами (ТОТЭ). Приведены результаты расчетных исследований на номинальном режиме схем и дроссельных характеристик комбинированных энергоустановок (КЭУ) с ТОТЭ.

Газотурбинная установка, топливный элемент, комбинированная энергоустановка.

В целях повышения КПД энергоустановок (ЭУ) разрабатываются и создаются на базе ГТД все более сложные комбинированные ЭУ (КЭУ). В последние годы активно прорабатываются ЭУ с использованием топливных элементов (ТЭ), которые в перспективе могут обеспечить повышение КПД КЭУ до 70-75%. Для достижения максимального коэффициента использования энергии топлив могут применяться различные схемы ЭУ на базе конвертированных авиационных двигателей (АД) и ТЭ. В настоящее время активно разрабатываются все более совершенные и сложные схемы таких КЭУ [7,8].

ТЭ – это устройство, в простейшей схеме которого имеются два электрода с электродными камерами с ионным электролитом между ними. На аноде происходит реакция электроокисления топлива, на катоде – электрохимическое восстановление окислителя. Электроды в ТЭ служат для проведения электрохимических реакций, подвода или отвода электронов. В электролите происходит движение положительно и отрицательно заряженных ионов. Ионный проводник также разделяет окислитель и восстановитель. При работе ТЭ анод и катод замыкаются проводником, по которому электроны двигаются от анода к катоду, совершая работу.

Существует несколько классификаций ТЭ, но наиболее удачной является классификация по типу электролита, учитывающая рабочую температуру ТЭ, ионный характер реакций, а также вид преобразования топлива: щелочные (ЩТЭ), фосфорнокислые (ФКТЭ), протонопроводящие или твердопо-

лимерные (ТПТЭ), с расплавленным карбонатом (РКТЭ) и твердооксидные (ТОТЭ). В ЩТЭ электролитом служит раствор КОН, рабочая температура 90 - 200°C. В ФКТЭ применяется 95 - 98 % фосфорная кислота, рабочая температура 200°C. Ионным проводником в ТПТЭ служит протонообменная мембрана, рабочая температура 80 - 90°C. Электролитом в РКТЭ является расплав карбонатов щелочных металлов. РКТЭ работают при температуре 600 - 700°C [1,7].

В ТОТЭ (SOFC) электрическая проводимость электролитов на основе оксидов циркония и иттрия становится приемлемой при температуре выше 1173К. ТОТЭ наиболее эффективны при совместной работе с газотурбинными установками (ГТУ) за счет рабочей температуры 1173 - 1273К. Основным видом топлива в ТОТЭ служит водород, а окислителем — кислород воздуха. Отличительной способностью ТОТЭ является возможность производить как электроэнергию, так и высокопотенциальную теплоту, которую можно использовать в циклах ГТУ, паротурбинной установки (ПТУ) или (парогазовой установки) ПГУ.

КПД по выработке электроэнергии КЭУ на базе ГТУ и ТЭ может достигать более 70%. В настоящее время диапазон рассматриваемых мощностей таких КЭУ - от 200 кВт до 10 МВт. Крупные корпорации уже проявили интерес к таким КЭУ, продемонстрировав первые КЭУ мощностью 1 МВт (Rolls-Royce Fuel Cell Ltd развивает ТЭ пригодные для КЭУ от 20 кВт до ЭУ мегаваттного класса с КПД порядка 90%) [7].

Рассмотрим основные схемы включения ТЭ при совместной работе с ГТУ [5]:

- КЭУ с замещенной камерой сгорания (КС) ГТУ топливными элементами. Продукты реакции ТЭ поступают в КС ГТУ, затем, срабатываясь на газовой турбине, направляются в регенератор, где повышается температуры воздуха и топлива (природный газ), и далее подаются в котел-утилизатор (КУ), генерирующий пар для ПТУ. КС ГТД используется только в период пуска КЭУ.

- КЭУ на основе ГТУ и ТЭ с внутренней конверсией природного газа, работающая при атмосферном давлении. Природный газ и вода поступают в систему утилизации тепла, где тепловая энергия катодного газа ТЭ используется для выработки пара, смешивающегося с подогретым топливом. Смесь природного газа и пара направляется в реформер, размещенный внутри ТЭ, откуда конвертированный газ поступает на аноды ТЭ. Воздух, сжатый в компрессоре, подогревается сначала в системе утилизации тепла катодным газом ТЭ, а затем в теплообменнике – продуктами сгорания, поступающими из камеры дожигания. Подогретый воздух расширяется в газовой турбине, вращающей компрессор и электрогенератор.

- КЭУ с ТЭ, работающими на продуктах газификации углей (мощностью до 300 МВт и более). В состав КЭУ входит газификатор и ТОТЭ (модули которого работают при двух разных давлениях), ГТУ с регенерацией и промежуточным подводом тепла и ПТУ с промежуточным перегревом пара. Модули ТЭ, работающие при высоком (ВД) и низком (НД) давлениях, замещают соответственно камеры сгорания ГТУ ВД и НД.

С учетом возрастающего интереса к КЭУ на базе ТЭ требуется эффективный, надежный и простой в эксплуатации модуль, способный рассчитывать параметры ТЭ.

В настоящее время наиболее известные математические модели и программные средства моделирования ГТД это: комплексные математические модели ЦИАМ, ГРАД, DVIGwT, GasTurb, GSP, GECAT, Ebsilon Professional, United cycle, ОГРА, АСТРА и др. Некоторые программы, например GasTurb, АСТРА, ОГРА, предназначены для моделирования определенных схем ГТД, другие (ГРАД,

комплексные математические модели ЦИАМ, DVIGwT GSP, Ebsilon Professional и др.) являются универсальными и предоставляют большие функциональные возможности, обеспечивают естественную среду для создания и модификации модели.

В перечисленных программных комплексах отсутствует возможность расчета ТЭ, выполнения системных исследований рабочих процессов ТЭ, а также КЭУ на их основе. В Объединенном институте высоких температур РАН созданы программные продукты инженерного расчета ЭУ открытого цикла на углеводородном топливе. Основным достоинством работы является использование обращения к свойствам среды термодинамической модели рабочего тела, представляющего собой двухфазную многокомпонентную химически реагирующую систему. На основании этого рассчитывается как термодинамика горения в КС, так и реакции через электролит в ТЭ. Данный программный продукт не рассчитывает пароводяную конверсию углеводородного топлива в ТЭ, а также позволяет производить расчет только основной электрохимической реакции, пренебрегая многоступенчатыми превращениями и смешениями, происходящими в ТЭ. Также программа не позволяет производить расчеты сложных схем КЭУ, состоящих не только из ГТУ и ТЭ, но и ряда других энергетических устройств.

Анализ особенностей работы ТЭ и систем математического моделирования выявил необходимость разработки алгоритма расчета ТОТЭ, который позволит достаточно точно и оперативно проводить расчеты различных схем и режимов работы КЭУ с ТОТЭ. Учет основных значимых факторов элементов ЭУ позволит осуществлять учет влияния изменения физических свойств рабочего тела на характеристики элементов КЭУ.

Основные процессы внутри ТОТЭ для наглядности представлены на рис. 1.



Рис. 1. Схема расчета ТОТЭ

Топливоподготовка проходит с использованием пароводяной конверсии (ПВК) углеводородного топлива в среде водяного па-

ра для выделения водорода и монооксида углерода. В анодной полости ТОТЭ на трехфазной границе твердый электролит-электрод-газ происходит окисление топлива кислородом воздуха, ионизированным на трехфазной границе с катодом и прошедшим через твердый электролит в виде двухзаряженного иона. Протекают основные электрохимические реакции окисления водорода и СО, в результате которых выделяются водяной пар и СО₂ [1,7].

Для прохождения ПВК осуществляется подвод теплоты к стенкам камеры, в которой происходит ПВК.

С учетом вышеперечисленных основных процессов внутри ТОТЭ создан алгоритм расчета ТОТЭ (рис. 2), который реализован в системе моделирования DVIgWt, названный модулем "SOFC" согласно международной классификации.

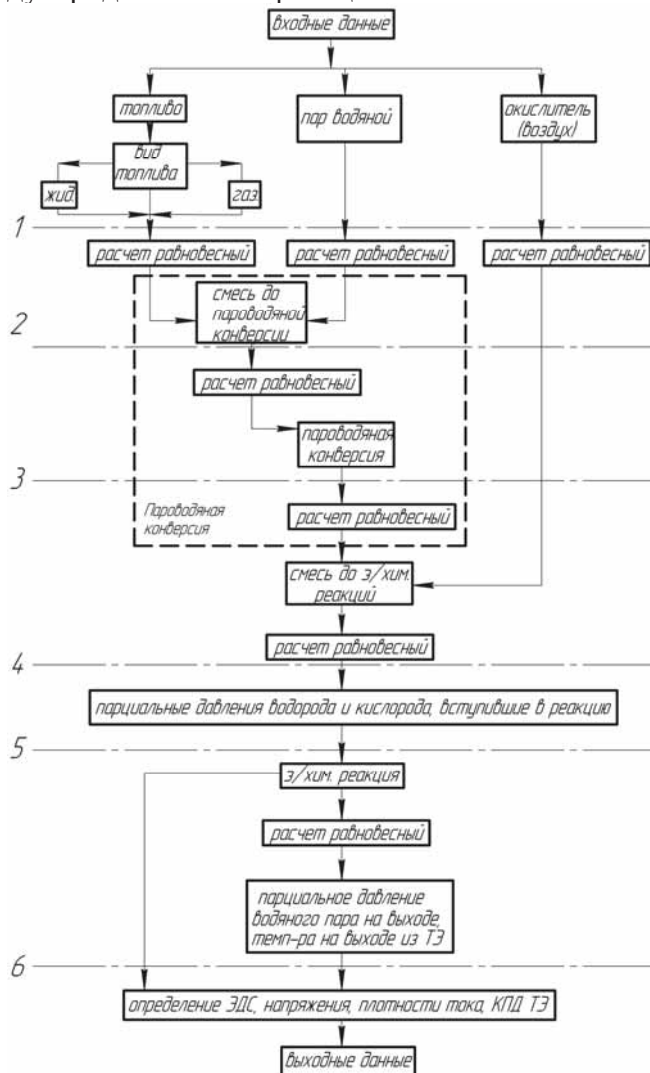


Рис. 2. Алгоритм расчета ТОТЭ

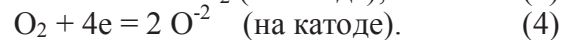
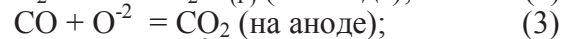
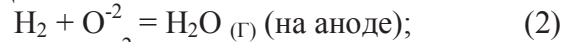
В модуль SOFC входят три информационных потока: топливо, окислитель, водяной пар (см. шаг 1 алгоритма).

На 2-м шаге алгоритма рассчитывается смесь топлива и водяного пара для расчета ПВК топлива. К примеру, реакция ПВК метана происходит следующим образом [1,7]:



На 3-м шаге рассчитываются равновесные параметры реакции ПВК. Необходимая часть полученного в результате ПВК водорода и кислород воздуха смешиваются, но без прохождения основной реакции окисления в ТЭ (шаг 4 алгоритма). Производится расчет парциальных давлений водорода и кислорода для основной реакции на входе в основную камеру ТЭ. На 5 шаге алгоритма рассчитывается реакция окисления водорода кислородом воздуха, определяются температуры продуктов реакции, а также парциальные давления продуктов и исходных веществ. Расчет основных электрохимических параметров ТЭ происходит на 6-м шаге алгоритма.

При использовании продуктов ПВК углеводородов на электродах ТОТЭ протекают следующие основные потенциалообразующие реакции:



Суммарные токообразующие реакции в ТОТЭ:



Математическая модель, базирующаяся на законах сохранения массы, энергии и уравнениях электрохимических реакций, служит главным образом для определения ЭДС ТЭ, так как ЭДС представляет собой отношение полной работы, совершаемой источником тока при перемещении единичного заряда по электрической цепи к величине этого заряда. Энергия химической реакции окисления топлива трансформируется в электрическую и тепловую энергию.

К основным параметрам ТОТЭ относятся:

- ЭДС:

$$E_3 = E_0 + \frac{R \cdot T_p}{n \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{p_{\text{H}_2} \cdot \sqrt{\frac{p_{\text{O}_2}}{p_{\text{атм}}}}}{p_{\text{H}_2\text{O}}} \right), \quad (7)$$

где $p_{\text{атм}}$ – стандартное атмосферное давление;
 F – постоянная Фарадея, равная 96500 Кл/ (моль экв);

R – молярная газовая постоянная, равная 8,3144 Дж/(моль · К);

- сопротивление ТЭ в зависимости от расхода водорода на ТЭ и температуры основной электрохимической реакции. Зависимость получена авторами по экспериментальным данным, опубликованным в [1,7], приведена на рис. 3. Значения расхода водорода и сопротивления в точке образмеривания соответствуют расчетному режиму;

- напряжение ЭХГ при максимальной мощности:

$$U_{\max} = \frac{n_1 \cdot E_3}{2}; \quad (8)$$

- удельная работа:

$$a = \frac{n \cdot F \cdot E_3 \cdot M_p}{1000}; \quad (9)$$

- плотность тока:

$$i = \frac{E_3 \cdot R_p}{2}; \quad (10)$$

- плотность мощности ЭХГ:

$$N_q = \frac{E_3^2 \cdot R_p}{4}; \quad (11)$$

- максимальная мощность ЭХГ:

$$N_{\max} = \frac{N_q \cdot S \cdot n_1 \cdot n_2}{1000}; \quad (12)$$

- удельная теплота, выделяемая или поглощаемая ТЭ:

$$q = \frac{n \cdot F \cdot (E_{\text{ch}} - E_3) \cdot M_p}{1000}; \quad (13)$$

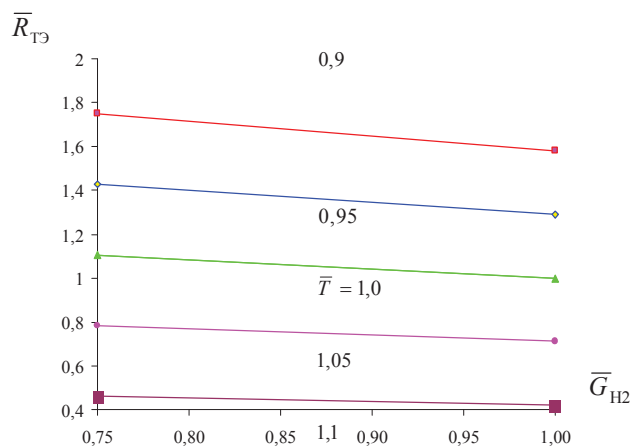


Рис. 3. Зависимость относительного сопротивления от относительного расхода водорода в ТОТЭ и относительной температуры основной электрохимической реакции в ТЭ

- термический КПД:

$$\eta_T = \frac{E_3}{E_{\text{ch}}}; \quad (14)$$

- фарадеевский КПД:

$$\eta_F = \gamma; \quad (15)$$

- эффективный КПД:

$$\eta_e = \frac{E_3 \cdot \eta_F}{2 \cdot E_{\text{ch}}}. \quad (16)$$

Созданный программный модуль SOFC официально зарегистрирован в Российском агентстве по патентам и товарным знакам (РОСПАТЕНТ), свидетельство № 2009613945 от 24.07.2009. Модуль SOFC, встроенный в систему моделирования DVIGwT, позволяет исследовать различные схемы КЭУ на базе ГТД и ТОТЭ.

Для оценки работоспособности и адекватности разработанного алгоритма, программного модуля SOFC в системе DVIGwT выполнены моделирования ячейки ТОТЭ как планарной конструкции, так и трубчатой конструкции в составе электрохимического генератора (ЭХГ) мощностью 1 кВт, описанного в [4].

В системе моделирования DVIGwT с включенным модулем SOFC создана структурная схема модели ТОТЭ, представленная на рис. 4. Номенклатура параметров, передающихся по потокам, а также составы топлива и окислителя соответствуют принятым для программного комплекса DVIGwT [3,4].

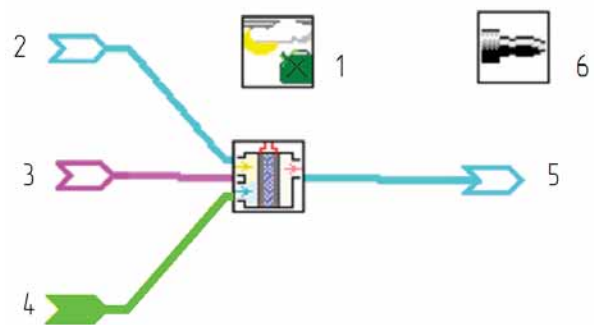


Рис. 4. Структурная схема модели ТОТЭ: 1 — начальные условия; 2 — газовый поток (окислитель); 3 — водяной пар; 4 — топливо; 5 — продукты реакции ТОТЭ; 6 — общие результаты

Сравнение результатов расчета при максимальной мощности ячейки с экспериментальными данными работы [6] приведено в табл. 1.

Таблица 1. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных для единичной ячейки ТОТЭ [6]

Параметры	SOFC	Эксперимент	$\delta P, \%$
$E_o, В$	0,870	0,858	1,38
$i, А/м^2$	849,60	843,20	0,75
$I, А$	0,960	0,953	0,73
$U_{max}, В$	0,420	0,429	2,14
$N_q, Вт/м^2$	371,70	361,53	2,74
$N_{max}, Вт$	0,42	0,409	2,62
$T_p, К$	1223,00	1223,00	0

Отличия экспериментальных параметров и параметров, полученных расчетом в модуле SOFC, не превышают 3 % (максимальное отклонение $\approx 2,74\%$ по величине плотности мощности).

Моделирование ЭХГ модуля ТОТЭ для макета ЭУ мощностью 1 кВт произведено по методике проведения экспериментов, представленной в [10]. ЭХГ состоит из последовательно соединенных 16 батарей ТОТЭ P111-Л305.030, каждая батарея, в свою очередь, - из 8 трубчатых ТОТЭ, соединенных параллельно [10].

Результаты выполненных расчетов ЭХГ приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты сравнения полученных расчетных данных с экспериментальными данными по ЭХГ мощностью 1 кВт [10]

Параметры	SOFC	Эксперимент	$\delta P, \%$
$I, А$	71,4	70	2,29
$U_{max}, В$	7,732	8	-3,35
$N_{max}, Вт$	553,6	560	-1,14
$T_p, К$	1223,0	1223,00	0
Количество последовательных соединений ячеек	16	16	-
Количество параллельных соединений ячеек	8	8	-

Максимальное отклонение рассчитанных характеристик параметров ЭХГ не превышает $\approx 3,35 \%$ в сравнении с экспериментальными данными.

Расхождение экспериментальных и рассчитанных величин объясняется отсутствием учета в программном продукте невлиния катализатора на процессы в ТОТЭ. Необходимо отметить, что и экспериментальные данные также получены с определенной погрешностью.

В целях практического решения проблемы ресурсосбережения, снижения себестоимости электрической и тепловой энергии, в ОАО "НПП "Мотор" разработана блочно - модульная энергетическая установка ГТЭ-10/95БМ номинальной электрической мощностью 8-10 МВт и тепловой производительностью 17-19 Гкал/час с суммарным коэффициентом использования топлива более 80 % [2]. В состав ГТЭ-10/95БМ входит газотурбинный привод ГТП-10/95, который создан на основе конвертирования авиационного двигателя Р95Ш.

Созданная математическая модель ГТЭ-10/95 подверглась проверке адекватности. Отклонение результатов расчетных параметров ГТЭ-10/95, полученных в программном комплексе DVIGwT, в сравнении с экспериментальными данными ОАО НПП "Мотор" не превышает 1 %, что подтверждает адекватность созданной модели.

Рассмотрим различные расчетные схемы КЭУ с ТОТЭ для повышения эффективности ГТЭ-10/95 [9].

Автономный ЭХГ на базе ТОТЭ

Для сравнительного расчета создана модель автономной ЭУ на базе ЭХГ, состоящего из ТОТЭ (рис. 5) [9]:

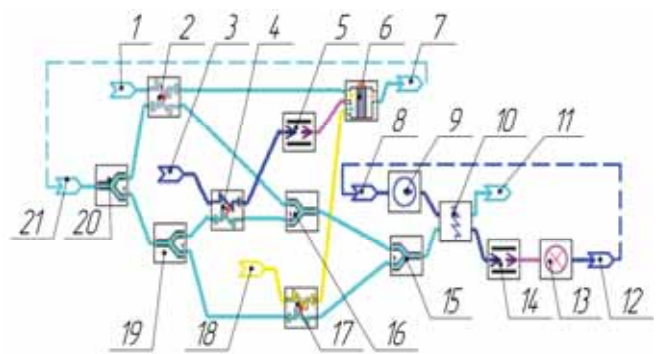


Рис. 5. Структурная схема автономной модели ЭУ на базе ЭХГ:

- 1 – подвод на подогрев воздуха для ТОТЭ; 2 – газозоодушный теплообменник; 3 – подача воды для ТОТЭ; 4 – газовый подогреватель воды; 5,14 – преобразователи потока вода- пар; 6 – ТОТЭ; 7 – продукты реакции ТОТЭ; 8 – вход сетевой воды; 9 – насос котловой воды; 10 – котел-утилизатор (КУ); 11 – выход газов из КУ; 12 – выход сетевой воды; 13 – потребитель тепла; 15, 16 – смесители; 17 – газовый подогреватель топлива; 18 – подача топлива; 19, 20 – отборы газа; 21 – подача продуктов реакции ТОТЭ на подогрев воздуха на входе в ЭХГ

КЭУ на базе ГТЭ-10/95 и ЭХГ из ТОТЭ, работающего на отборе воздуха за КНД

Для ГТЭ-10/95 при номинальной мощности 8 МВт давление воздуха за компрессором низкого давления (КНД) составляет 0,3 МПа. Установим ЭХГ из ТОТЭ, питающийся окислителем, отобранным за КНД (схема № 1) [1,5]. Разработана математическая модель, структурная схема которой приведена на рис. 6.

Допустимый расход отбираемого воздуха за КНД для ЭХГ составляет не более 4 % от расхода на входе в КНД. Температура пароводяной конверсии (ПВК) не менее 925 К [1,7], а для основной реакции в ГТЭ 1197 - 1293 К [1,7]. Результаты расчета параметров КЭУ приведены в табл. 1.

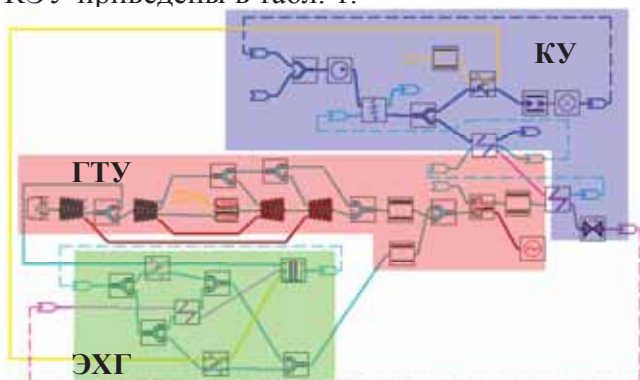


Рис. 6. Структурная схема КЭУ с ЭХГ, работающим на отборе воздуха за КНД (схема № 1)

В ЭХГ состоит из батареи ТОТЭ, газового теплообменника для подогрева входящего воздуха, пароперегревателя для получения необходимых параметров пара, газового подогревателя топлива. Топливо, направляемое в ЭХГ, предварительно подогревается водой, нагретой в КУ. В ЭХГ смешиваются сжатый воздух с топливом, прошедшим предварительную ПВК, пар для которой генерируется из части питательной воды в КУ, состоящей из пароперегревателя, испарителя и экономайзера. В выхлопном тракте ГТУ устанавливается КУ, в котором за счёт тепла выхлопных газов генерируются водяной пар, а также вода для горячего водоснабжения. Генерируемый пар частично расходуется на нужды ЭХГ.

КЭУ на базе ГТЭ-10/95 с замененной КС на ЭХГ на ТОТЭ

Принципиальная схема такой КЭУ [9] приведена на рис. 7 (схема № 2). Топливо

подаётся только в ЭХГ. Температуру продуктов реакции ЭХГ, которая частично понижена за счёт подогрева входящих в ЭХГ воздуха и топлива, необходимо повысить до температуры газов на выходе из камеры сгорания в ГТЭ на расчетном режиме. Суммарные затраты топлива в ЭХГ и камере дожигания позволяют существенно повысить мощность всей КЭУ, структурная схема которой приведена на рис. 7.



Рис. 7. Структурная схема модели КЭУ с ГТЭ-10/95 с замененной камерой сгорания на ЭХГ на базе ТОТЭ (схема № 2)

Расходы воздуха, топлива и пара, в ЭХГ были смоделированы по расходу воздуха в ГТЭ-10/95 [11]. Поддерживаемые в процессе расчета схемы температурные напоры на холодных концах различных теплообменных аппаратов выбраны по рекомендациям [4].

КЭУ на базе каскада низкого давления ГТЭ-10/95 и ЭХГ

В данной КЭУ [9] (схема № 3) (математическая модель представлена на рис. 8) ЭХГ питается воздухом с давлением 0,3 МПа, а продукты химической реакции сбрасываются в ТНД. Значения температур ПВК и основной реакции в ЭХГ удовлетворяют требованиям [7,11]. Температура уходящих после КУ газов равна 100°C.

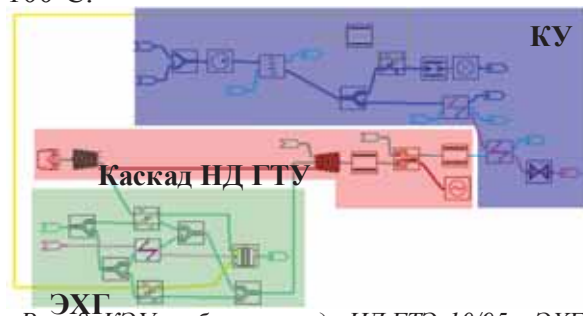


Рис. 8. КЭУ на базе каскада НД ГТЭ-10/95 и ЭХГ на базе ТОТЭ, питающегося воздухом с P=0,3 МПа (схема № 3)

Количество параллельно (13 шт.) и последовательно (11520 шт.) соединенных ячеек ТОТЭ для ЭХГ подобрано по расходу воздуха в ЭХГ [11].

Расчетные исследования схем КЭУ на номинальном режиме

Результаты расчетных исследований описанных выше схем приведены в табл. 3 [9].

Автономная ЭУ с ЭХГ на базе ТОТЭ при электрической мощности в 11906,3 кВт имеет электрический КПД 24,88 %, при этом 7987,8 кВт теплоты передается потребителю. Схема КЭУ на базе ГТЭ-10/95 и ЭХГ, работающего на отборе воздуха за КНД, характеризуется минимальной модернизацией исходной ГТЭ. Вырабатываемая электроэнергия 8543 кВт и электрический КПД 22,75 % достаточно низкие.

Таблица 3. Результаты расчета в системе DVIGwT базовой ГТЭ-10/95, автономного ЭХГ и рассматриваемых схем КЭУ с ЭХГ

Параметр	ГТЭ-10/95	ЭХГ	Сх. №1	Сх. №2	Сх. №3
N_3 , кВт	8000	–	8000	8000	1212,7
$n_{кнд}$, об/мин	9636,25	–	9627,6	9621,64	9680,3
$n_{квд}$, об/мин	10385,7	–	10422,3	10350,7	–
G_v , кг/с	55,27	–	56,20	54,98	55,24
$p_{кнд}^*$, кПа	280,7	–	271,0	280,8	285,8
$T_{кнд}^*$, К	403,35	–	400,15	403,37	405,61
$p_{кс}^*$, кПа	660,3	–	648,9	<u>659,8</u>	–
$T_{кс}^*$, К	1116,45	–	1130,63	<u>1060,62</u>	–
G_t , кг/с	0,718	–	0,722	<u>0,390</u>	–
$\alpha_{кс}$	4,361	–	4,236	<u>2,289</u>	–
$T_{твд}^*$, К	969,20	–	981,69	924,56	–
$G_{тнд}$, кг/с	55,07	–	53,77	56,40	56,97
$T_{тнд}^*$, К	866,2	–	877,7	828,0	561,6
$p_{ст}^*$, кПа	105,3	–	105,3	105,3	105,0
$T_{ст}^*$, К	733,0	–	738,8	702,4	541,6
$N_{ЭХГ}$, кВт	-	11906,3	543,0	12630,4	12791,6
$n_{ЭХГ}$, Вт/м ²	-	820,26	850,06	870,15	427,07
$i_{ЭХГ}$, А/м ²	-	2027,7	2085,34	2088,46	1059,62
$T_{оснр}^*$, К	-	1223,4	1264,8	1293,0	1295,3
$T_{ПВК}^*$, К	-	1073,2	1020,00	1293,1	1295,3
I , А	-	2554,9	858,2	2631,5	2755,0
U , В	-	0,405	0,408	0,417	0,403
$G_{тЭХГ}$, кг/с	-	0,973	0,0417	0,971	1,026
Q , кВт	21433,2	7987,8	21946,8	17522,0	7264,5
$N_{\Sigma КЭУ}$, кВт	8000	11906	8543,0	20630,4	14004,3
η_3 , %**	22,63	24,88	22,75	30,82	27,75

* - параметры даны для камеры дожигания, так как камера сгорания в схеме отсутствует.

** - параметр рассчитан по отношению электрической мощности к теплоте сжигания топлива.

Схема с замененной камерой сгорания на ЭХГ в ГТЭ-10/95 требует значительных переделок, однако экономический эффект от такого вложения компенсируется повышением электрической суммарной мощности КЭУ до 20630,4 кВт (в 2,56 раза больше мощности базовой ГТЭ) и повышением КПД по выработке электроэнергии до 30,82

% (на 8,19 % абсолютных по отношению к базовой ГТЭ). Схема КЭУ на базе каскада НД ГТЭ-10/95 и ЭХГ на базе ТОТЭ, питающегося воздухом с давлением 0,3 МПа, требует также значительных переделок, при этом суммарная электрическая мощность 14004,3 кВт в 1,75 раза больше мощности базовой ГТЭ и электрический КПД достига-

ет 27,75% (больше на 5,12 % абсолютных по отношению к базовой ГТЭ).

Изменение параметров ГТУ при дросселировании КЭУ с ЭХГ влияет на протекание химических реакций ТОГЭ [1,7]: параметры воздуха и водяного пара для ПВК изменяются на переменных режимах работы ГТУ в составе КЭУ. По результатам расчетов построены дроссельные характеристики исходной ГТЭ, автономного ЭХГ и трех схем КЭУ (при условии обеспечения регулирования ЭХГ в составе ГТУ). Для базовой ГТЭ-10/95 и двух исследуемых схем параметры получены в диапазоне приведенных частот вращения ротора КНД ($n_{пр\ КНД}$), соответствующих N_3 от 8 до 2 МВт, для третьей схемы от 1,2 МВт до 0,050 МВт. 4-процентный отбор в схеме №1 ведет также к увеличению на 4% расхода продуктов сгорания в свободной турбине, что требует раскрытия сопловых аппаратов свободной турбины на 4% для обеспечения режима работы ГТЭ как у базовой ГТЭ-10/95. Суммарная электрическая мощность (N_3) базовой ГТУ и схем №1,2,3 КЭУ с падением $n_{пр\ КНД}$ уменьшается (рис. 9) [9].

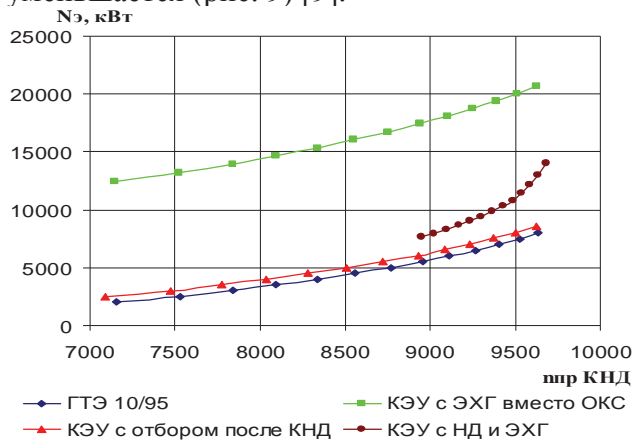


Рис. 9. Зависимость общей электрической мощности ЭУ от $n_{пр\ КНД}$

При $n_{пр\ КНД} = 9627$ об/мин N_3 базовой ГТЭ 8000 кВт, схеме № 1 – N_3 КЭУ увеличена на 6,79%, в схеме № 2 N_3 возросла в 2,58 раза по сравнению с базовой ГТЭ, в схеме №3 достигает 14 МВт. Резкое увеличение N_3 в схеме №2 объясняется более высокими термодинамическими параметрами входных потоков веществ в ЭХГ, что повлекло резкое увеличение как мощности ЭХГ, так и расхода топлива. Следовательно, N_3 в КЭУ, в целом, увеличилась.

С уменьшением $n_{пр\ КНД}$ суммарные расходы топлива для камеры сгорания – в базовой ГТЭ, для камеры сгорания и ЭХГ - в схеме №1, для камеры дожигания - в схеме №2 и расход на ЭХГ в схеме №3, уменьшаются. При $n_{пр\ КНД} = 9627$ об/мин, соответствующем номинальному режиму работы базовой ГТЭ, расход топлива в базовой схеме равен 0,718 кг/с, в схеме №1 составляет 0,763 кг/с, в схеме №2 на 52,8% больше расхода базовой схемы и составляет 1,36 кг/с, в схеме №3 достигает 1,026 кг/с. При снижении $n_{пр\ КНД}$ в схемах № 1,3 и базовой ГТЭ – η_3 уменьшается, а в схеме № 2 – η_3 возрастает и при $n_{пр\ КНД} \approx 7100$ об/мин достигает 35 %, в то время как у базовой ГТЭ – $\eta_3 = 12\%$, а в схеме № 1 – $\eta_3 = 14\%$ (рис. 10). В схеме № 3 при минимальном значении $n_{пр\ КНД} = 8900$ об/мин $\eta_3 = 17\%$. В схеме № 2 N_3 снижается не так интенсивно, как уменьшается суммарный расход топлива на КЭУ при дроссельных режимах [9].

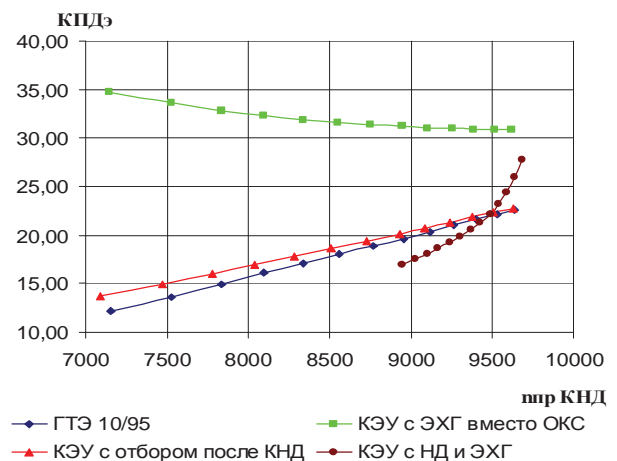


Рис. 10. Зависимость КПД ЭУ от $n_{пр\ КНД}$

Повышение электрического КПД с уменьшением $n_{пр\ КНД}$ есть следствие распределения N_3 между ГТЭ и ЭХГ с учетом того, что ЭХГ работает практически на стационарном режиме. Расход воздуха во входное устройство уменьшается со снижением $n_{пр\ КНД}$ во всех рассматриваемых схемах КЭУ и базовой ГТЭ. Приведенная частота вращения КВД ($n_{пр\ КВД}$) при уменьшении $n_{пр\ КНД}$ снижается как для базовой ГТЭ, так и для трех схем КЭУ. Особенностью для всех трех схем является наличие максимума при $n_{пр\ КНД} = 8300$ об/мин. Для всех рассматриваемых ЭУ переданная потребителю теплота ($Q_{пот}$) снижается с уменьшением $n_{пр\ КНД}$ (рис. 8). При значении $n_{пр\ КНД} = 7100$ об/мин в

схеме № 1 $Q_{\text{пот}} = 11300$ кВт, в базовой ГТЭ 11000 кВт, а в схеме № 1 – 9300 кВт. В схеме № 3 при $n_{\text{пр КНД}} = 8900$ об/мин, $Q_{\text{пот}} = 4000$ кВт [9].

Выводы

Разработанная и реализованная в системе математического моделирования DVIGwT математическая модель ТОТЭ - SOFC, учитывающая внутренние электрохимические процессы в ТОТЭ, с достаточной для инженерных расчетов точностью позволяет определять параметры ТОТЭ на различных режимах работы.

Адекватность описания рабочих процессов и применимость разработанной математической модели SOFC подтверждается согласованностью результатов расчетов ТОТЭ с экспериментальными данными.

Рассмотрены несколько схем повышения эффективности ГТЭ-10/95 при совместной работе с ТОТЭ. Автономная ЭУ с ЭХГ на базе ТОТЭ при электрической мощности в 11906,3 кВт имеет электрический КПД 24,88 %, при этом вырабатывается 7987,8 кВт теплоты.

КЭУ на базе ГТЭ-10/95 и ЭХГ, работающем на отборе воздуха за КНД, характеризуется минимальной модернизацией исходной ГТЭ. Однако вырабатываемая электроэнергия и КПД по выработке сравнительно невысокие ($\eta_3 = 22,75$ % при электрической мощности 8543,0 кВт). КЭУ с замененной камерой сгорания на ЭХГ в ГТЭ-10/95 требует значительных переделок базовой ГТЭ, но при этом достигается повышение электрической суммарной мощности КЭУ до 20630,4 кВт с электрическим КПД 30,82 % на номинальном режиме. КЭУ на базе каскада НД ГТУ и ЭХГ характеризуется значительной доработкой базовой ГТЭ при вырабатываемой номинальной электрической мощности 11906,3 кВт, с электрическим КПД 24,88 %. Анализ дроссельных характеристик показывает, что со снижением приведенной частоты вращения КНД в схемах № 1,3 и базовой ГТЭ - η_3 уменьшается, а в схеме №2 - η_3 возрастает и при $n_{\text{пр КНД}} \approx 7100$ об/мин достигает 35 %. Электрическая мощность в схеме №2 падает при снижении приведенной частоты вращения КНД с 9621 до 7146, при этом мощность КЭУ уменьшается с 20630 до 12436 кВт (на 39,72 % от номинала), в то время как в базовой схеме

при таком же диапазоне изменения приведенной частоты вращения КНД снижается электрическая мощность с 8 до 2 МВт (75% от номинала).

Очевидно, что для создания ЭУ с более высокими КПД по выработке электроэнергии необходимо осуществлять сквозное проектирование КЭУ на базе ГТД и ТЭ, а не приспособливать друг к другу имеющиеся ГТД и батареи ТЭ.

Библиографический список

1. Борисов, В.Н. Введение в термодинамику топливного элемента [Текст] / В.Н. Борисов, И.Г. Лукашенко, М.А. Ахлюстин // Твердооксидные топливные элементы: Сб. науч. – техн. статей. – Снежинск: Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2003. - С. 9 – 15.
2. Газотурбинная энергоустановка ГТЭ-10/953-002. Руководство по эксплуатации и техническому обслуживанию. ГТП 953.00.0.0000РЭ [Текст] - Уфа: ФГУП “НПП”Мотор”, 2004. – 458 с.
3. Горюнов, И.М. Структурно-параметрический синтез и анализ ГТД и ЭУ [Текст] / И.М. Горюнов // Вестн. УГАТУ. – Уфа. УГАТУ, 2008. Т. 11, № 2 (29). – С. 30 – 38.
4. Горюнов, И.М. Термогазодинамические расчеты ГТД и теплоэнергетических установок с использованием системы DVIGwT [Текст] / И.М. Горюнов // Вестн. УГАТУ, 2006. Т 7, № 1 (14). - С. 61–70.
5. Захаренков, Е.А. Исследование и оптимизация схем и параметров гибридных электростанций на основе топливных элементов и газотурбинных установок [Текст]: автореф. дисс. ... канд. техн. наук по специальности 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы/ Е.А. Захаренков – М.: МЭИ (ТУ), 2009. – 20 с.
6. Белов, Д.В. Исследование электрических характеристик планарного твердооксидного топливного элемента [Текст] / Д.В. Белов, А.В. Устюгов, В.Ф. Чухарев // Твердооксидные топливные элементы: Сборник научно-технических статей. – Снежинск: Издательство РФЯЦ – ВНИИТФ, 2003. - С. 334 – 339.
7. Коровин, Н.В. Топливные элементы и электрохимические энергоустановки [Текст] / Н.В. Коровин. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 280 с.
8. Липилин, А.С. Состояние и будущее

индивидуальной энергетики [Текст] / А.С. Липилин // Альтернативная энергетика и экология: междунаро. науч. журнал 2009. №9(77). - С. 139-152.

9. Лоскутников, А.А. Моделирование комбинированных энергоустановок на основе авиационного ГТД и топливных элементов в компьютерной среде [Текст]: автореферат дисс. ... канд. техн. наук. по специальности 05.07.05 – Тепловые. электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов/ А.А. Лоскутников. Уфа: УГАТУ, 2010. – 16 с.

10. Чухарев, В.Ф. Электрохимический модуль твердооксидного топливного элемента для макета энергоустановки мощностью 1 кВт [Текст] / В.Ф. Чухарев, Б.М. Бочков, В.В. Кулаев [и др.] // Твердооксидные топливные элементы: Сб. науч.- техн. статей. – Снежинск: Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2003. - С. 352 – 357.

11. High Efficiency PSOFC / ATS – Gas Turbine Power System. Final report. National Energy Technology Laboratory. Siemens Westinghouse Power Corp, 2001. – 180 p.

THERMODYNAMIC SHAPE OF THE COMBINED POWER INSTALLATIONS, BASED ON GTU AND SOLID OXIDE FUEL CELLS

©2011 А. А. Loskutnikov¹, I. M. Gorjunov², F. G. Bakirov²

¹ Joint-stock company “Scientific-and-production enterprise “Motor”, Ufa

²Ufa State Aviation Technical University

The consideration of solid oxide fuel cell's calculation algorithm to raise the possibilities of program complex DVIGWT. The results of testing SOFC's calculation research were compared with experiment's results. Combined power installations; solid oxide fuel cell; steam-water conversion; structural – parameter synthesis and analyses.

Turbo jet, fuel cell, combined power plant.

Информация об авторах

Лоскутников Александр Александрович - кандидат технических наук, инженер-конструктор первой категории ОАО «Научно-производственное предприятие «Мотор», г. Уфа. E- mail: alex_loskutnikov@mail.ru. Область научных интересов: моделирование комбинированных энергоустановок и топливных элементов.

Горюнов Иван Михайлович - доктор технических наук, профессор кафедры авиационных двигателей Уфимского государственного авиационного технического университета, заведующий НИЛ САПР-Д. E - mail: gorjunov@mail.ru. Область научных интересов: автоматизация проектирования, доводки, изготовления и эксплуатации ГТД и ЭУ.

Бакиров Федор Гайфуллович - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой авиационной теплотехники и теплоэнергетики Уфимского государственного авиационного технического университета. E - mail: fgbakirov@rambler.ru. Область научных интересов: автоматизация проектирования, доводки, изготовления и эксплуатации ГТД и ЭУ.

Loskutnikov Alexander Alexandrovich - Candidate of Technical Sciences, the design engineer of JSC “Scientific-and-production enterprise “Motor”, Ufa. E - mail: alex_loskutnikov@mail.ru. Area of research: Modeling of the combined power installations on the basis of aviation turbo jet and fuel elements.

Gorjunov Ivan Michailovich - Doctor of Technical Sciences, the professor of chair of aviation engines of Ufa State Aviation Technical University, manager of Research laboratory SAPR-D. E - mail: gorjunov@mail.ru. Area of research: automation of designing, operational development, manufacturing and operation of turbo jet and power installations.

Bakirov Feodor Gaifellovich - Doctor of Technical Sciences, the professor, the manager Chair aviation heating engineers and power system (ATaT) of Ufa State Aviation Technical University. E - mail: fgbakirov@rambler.ru. Area of research: thermal engines and power installations, power savings problems.