

УДК 621.4.001

**АЛГОРИТМ РАСЧЕТА КОМБИНИРОВАННЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК  
НА БАЗЕ ГТД И ТВЕРДООКСИДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

©2009 А. А. Лоскутников, Ф. Г. Бакиров, И. М. Горюнов

Уфимский государственный авиационный технический университет

Рассмотрен алгоритм расчета комбинированных энергоустановок на базе газотурбинных двигателей и твердооксидных топливных элементов. Описана расчетная схема твердооксидного топливного элемента. Приводится описание различных схем комбинированных энергоустановок на базе ГТД и ТОТЭ.

*Твердооксидные топливные элементы; пароводяная конверсия; комбинированные энергоустановки*

В настоящее время большое внимание уделяется проектированию комбинированных энергоустановок (КЭУ) на базе газотурбинных двигателей (ГТД) и топливных элементов (ТЭ). В основном это твердооксидные ТЭ (ТОТЭ). Основой ТОТЭ служат твердые материалы с ионной проводимостью, которая становится приемлемой лишь при температурах выше 1100 К, рабочая температура ТОТЭ лежит в диапазоне 1173...1273 К. К достоинствам ТОТЭ можно отнести использование неплатиновых катализаторов, меньшую чувствительность к каталитическим ядам, относительно низкую электродную поляризацию и высокую плотность тока [1].

Стационарные комбинированные энергоустановки (КЭУ) на базе ТЭ мощностью до нескольких мегаватт могут применяться для обеспечения электроэнергией и теплом отдаленных поселков, районов, коттеджей, больниц, супермаркетов и т. д. Для этой цели применяются фосфорнокислые (ФКТЭ), твердополимерные (ТПТЭ) и ТОТЭ. КПД ТЭ не ограничен законом Карно, следовательно, КПД КЭУ можно повышать за счет КПД ТЭ. КПД выработки электроэнергии в ТЭ варьируется 40...60%, а при объединении с ГТД, КПД КЭУ достигает 75%. Наиболее перспективными для использования в электроэнергетике являются высокотемпературные ТОТЭ, т.к. в них генерируется электроэнергия и высокопотенциальная теплота, которую можно использовать в ГТУ, паротурбинной (ПТУ) или парогазовой установке (ПГУ). В дальнейшем в работе будут рассматриваться в основном ТОТЭ [2].

В России использование автономных ЭЭУ особо актуально, так как более 60 % территории страны не имеет централизованного энергоснабжения. В России эксплуатируется около 50 тысяч дизельных и бензиновых электроагрегатов, которые ежегодно потребляют около 8 млн. тонн моторного топлива. Замена хотя бы половины из них на КЭУ обеспечит экономию 1...2 млн. тонн моторного топлива в год. В настоящее время в России эксплуатируется большое число ЭУ мощностью от 1 до 30 МВт с суммарной мощностью около 5 ГВт, которые расходуют более 5 млн. т у.т. (более 1,5 МДж). Их средний КПД ниже 30%. Замена ЭС на КЭУ с ТЭ обеспечит экономию порядка 2,5 млн. т у.т. в год.

Рассмотрим различные схемы КЭУ на базе ГТД и ТОТЭ:

1. ТЭ замещает камеру сгорания ГТУ (рис. 1). Выходящие из ТЭ газы расширяются в газовой турбине, проходят регенератор, в котором подогреваются воздух и природный газ, и далее подаются в котел-утилизатор (КУ), вырабатывающий пар для ПТУ. ОКС ГТУ используется только в период пуска КЭУ. Объединенные системы, необходимые для бесперебойной работы ТОТЭ или батареи ТОТЭ, носят название электрохимических генераторов (ЭХГ) [3].

Доля мощности КЭУ, приходящаяся на ТОТЭ, составляет примерно 70 %, ожидаемый КПД по производству электроэнергии — более 70 %.

Если ТОТЭ работает при давлении, близком к атмосферному, то выходящие из ТЭ продукты реакции направляются в КУ для генерации пара для ПТУ.

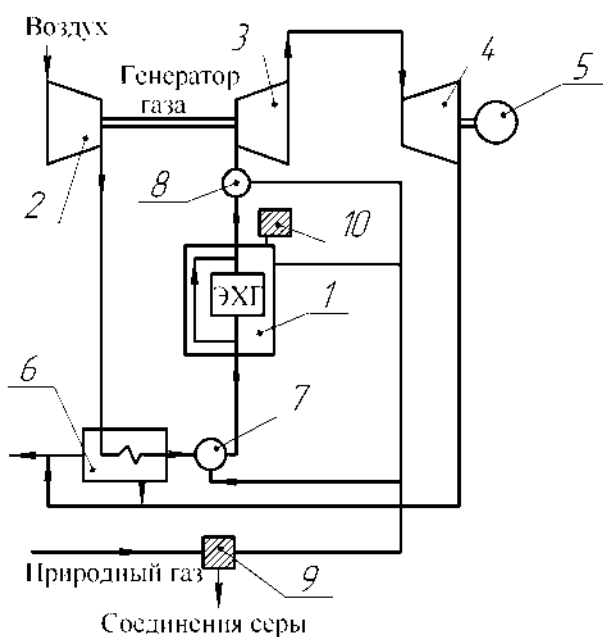


Рис. 1. Схема КЭУ, в которой ЭХГ на базе ТОТЭ заменяет ОКС:

- 1-ЭХГ; 2-компрессор; 3-турбина генератора;
- 4-силовая турбина; 5-электрогенератор;
- 6-регенератор; 7-камера сгорания для подогрева воздуха;
- 8- камера сгорания для подогрева выходящих из ЭХГ газов;
- 9-аппарат очистки газа от соединений серы 4; 10-инвертор

Выходящие из ЭХГ газы расширяются сначала в турбине генератора газа, вращающей компрессор, и далее в силовой турбине. Отработавшие газы турбины проходят через регенератор, после чего покидают установку.

В ОКС для подогрева воздуха и газов, выходящих из ЭХГ, природный газ подается только в период пуска КЭУ и при пиковых нагрузках. Пуск ГТУ, таким образом, может осуществляться до пуска ЭХГ путем растопки камер сгорания 7 и 8 (см. рис. 1).

После пуска ГТУ разогрев ТЭ проводится горячим воздухом, прошедшим регенератор и подогретым отработавшими в газовой турбине газами, а затем в КС 7 путем сжигания топлива. После выхода ЭУ на рабочий режим для достижения наибольшего КПД подача топлива в камеры сгорания 7 и 8 прекращается.

2. На рис. 2 представлена схема КЭУ на основе ГТУ и ТОТЭ 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.

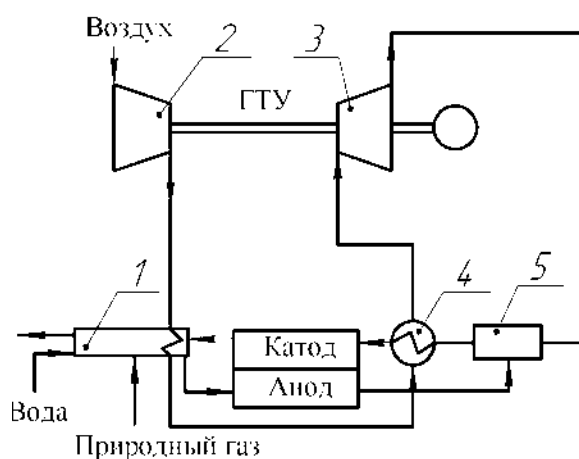


Рис. 2. Схема КЭУ на основе ГТУ и ТОТЭ с внутренней конверсией природного газа, работающая при атмосферном давлении:  
1-система утилизации тепла; 2-компрессор;  
3-газовая турбина; 4-теплообменник;  
5-камера дожигания

Смесь природного газа и пара направляется в реформер (внутри ТОТЭ) откуда конвертированный газ поступает на аноды ТЭ. Сжатый воздух в компрессоре подогревается сначала в системе утилизации тепла катодным газом ТОТЭ, а затем в теплообменнике продуктами сгорания, поступающими из камеры дожигания. Подогретый воздух расширяется в газовой турбине, вращающей компрессор и электрогенератор. Воздух, после турбины, и анодный газ направляются в камеру дожигания, где происходит каталитическое сжигание непрореагировавшего в ТЭ топлива. Продукты сгорания, используемые в качестве окислителя в ТОТЭ, поступают в теплообменник, а затем на катоды. Таким образом, система утилизации тепла и теплообменник, в котором тепло, выделившееся при дожигании горючих составляющих анодного газа, используется для подогрева воздуха, поступающего в газую турбину, замещают ОКС ГТУ [3].

3. КЭУ мощностью 300 МВт на основе ТОТЭ, работающих на продуктах газификации углей (рис. 3). В состав входит газификатор, ТОТЭ, модули которого работают при двух разных давлениях, ГТУ с регенерацией и промежуточным подводом тепла и ПТУ с промежуточным перегревом пара. Модули ТОТЭ, работающие при высоком ВД и низком НД давлениях, замещают соответственно КС ГТУ высокого и низкого давления.

Водоугольная суспензия и кислород из установки разделения воздуха направляются в газификатор угля. Продукты газификации и вода поступают в газоохладитель, в котором вырабатывается пар, перегреваемый далее в КУ. Охлажденный синтез-газ очищается от соединений серы в системе очистки и разделяется затем на два потока. Один направляется в ТОТЭ ВД, другой — в турбодетандер, где происходит его расширение до давления в ТОТЭ НД. Воздух, сжатый в компрессоре и подогретый сначала отработавшими газами турбины низкого давления (ТНД) в регенераторе, а затем выходящими из ТОТЭ ВД газами, служит окислителем в ТОТЭ ВД. Газы, покидающие ТОТЭ ВД, расширяются в турбине высокого давления (ТВД). Далее они используются в качестве окислителя в ТОТЭ НД, куда подается дополнительное топливо. Образовавшиеся продукты сгорания служат рабочим телом ТНД.

Отработавшие в ней газы поступают в регенератор и далее в котел-утилизатор. Пар из котла направляется в паровую турбину.

В результате анализа имеющихся схем КЭУ можно сделать вывод о том, что в настоящее время не существует ГТД малой мощности для совместной работы в паре с ТОТЭ в составе КЭУ. Основная проблема заключается в относительно малой единичной мощности ТОТЭ, по сравнению с существующими обычными ГТД (см. табл. 1) [4].

ГТД, разработанные для вертолетов и легких самолетов, имеют ресурс 4...8 тыс. ч., выполнены по схеме со свободной силовой турбиной, что при применении их в (КЭУ) неоправданно увеличивает стоимость установки. Разработка ГТД, оптимальных для совместной работы с ТЭ, ведется многими известными фирмами. Фирма RRA разработала проект ГТУ для совместного использования с ТОТЭ [2], отвечающей изложенным выше требованиям. Расход воздуха в ней составляет 2,8 кг/с, температура перед турбиной — 1 000°C, степень повышения давления — 9, максимальная мощность — 0,5 МВт. КПД ГТД при простом цикле достигает 26,8 %, при простом цикле с регенерацией — 35,4, с регенерацией и промежуточным подводом теплоты (для КЭУ с ТЭ с модулями, работающими при двух разных давлениях) — 49,3, с регенерацией и промежуточным охлаждением воздуха при сжатии — 36,5 % [5].

Анализ различных схем КЭУ на основе ТОТЭ показывает, что для достижения КПД КЭУ, равного 70 %, необходимо дальнейшее повышение эффективности ТЭ и ГТУ. Реально достигнутый в настоящее время КПД КЭУ, отвечающий существующему уровню развития высокотемпературных ТЭ и ГТУ, составляет 65 %. В КЭУ целесообразно применение ГТУ с регенерацией теплоты [6].

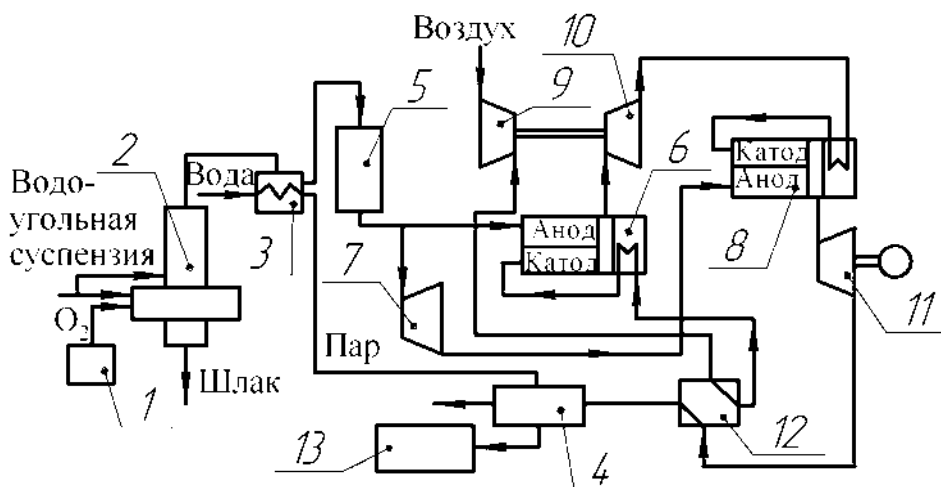


Рис. 3. КЭУ на базе ТОТЭ, работающая на продуктах газификации угля:

1-установка разделения воздуха; 2-газификатор; 3-газоохладитель; 4-котел-утилизатор; 5-система очистки газа от соединений серы; 6-ТЭ/ВД; 7-турбодетандер; 8-ТЭ/НД; 9-компрессор; 10-ТВД; 11-ТНД; 12-регенератор; 13-цикл ПТУ с промежуточным перегревом пара

Таблица 1- Уровень разработок ЭЭУ с ТЭ к 2006 г [4]

Технические показатели	ЭЭУ с различным ТЭ				
	ЩТЭ	ФКТЭ	ТПТЭ	РКТЭ	ТОТЭ
Единичная мощность до, МВт	0,1	11	0,25	2	0,3
Суммарная мощность, МВт	2	70	5	5	2
Ресурс, ч	5000	До 40 000	До 15000	До 10 000	До 20 000
КПД электрический*	35—37	37—42	35—37	50—56	50—57 и (55—65) (гибридный ЭУ)

Однако при проектировании малых ГТД существует ряд проблем, основанных на влиянии на параметры и конструкцию малых размеров. Известно, что при уменьшении размеров ГТД невозможно обеспечить КПД и удельную мощность, как у обычных ГТД, т.к. большинство ГТД малой мощности имеет сравнительно высокие величины расхода топлива. С уменьшением размеров аэродинамические характеристики проточных частей компрессора и турбины ухудшаются, КПД их снижаются [7].

Для улучшения характеристик малых ГТД повышают КПД отдельных элементов, для этого используют части тепловой энергии, содержащейся в выхлопных газах, для предварительного подогрева воздуха перед входом в камеру сгорания. Также существует метод использования более высоких рабочих температур газа на входе в турбину или более низких температур воздуха на входе в компрессор.

Разработкой ГТД малой мощности занимаются такие фирмы, как “General Motors”, “Pratt&Whitney”, “Kawasaki Heavy Industries” в России: ФГУП “Завод имени В.Я. Климова”, ОАО ИПП “Энергия» и др.

Таким образом, для увеличения КПД имеющихся ГТД, последние объединяются с ТОТЭ. Для правильного подбора ТОТЭ имеющимся ГТД, а также расчета параметров необходим программный комплекс для ЭВМ.

На кафедре авиационных двигателей УГАТУ профессором И.М. Горюновым разработана система математического моделирования тепловых, энергетических и комбинирован-

ных установок DVIGwT, зарегистрированная в Российском Агентстве по Патентам и Товарным Знакам (РОСПАТЕНТ), свидетельство № 2004610623 от 04.03.2004 [8].

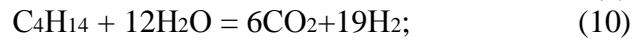
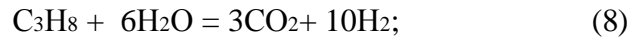
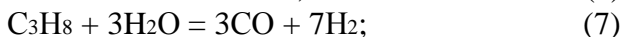
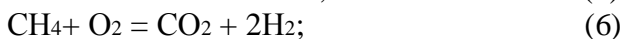
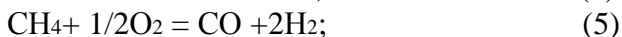
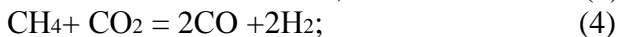
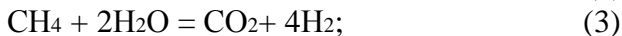
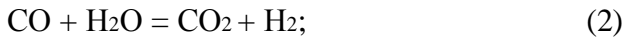
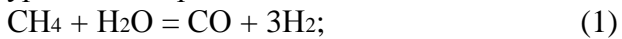
Областью применения системы DVIGwT являются термогазодинамические расчеты ЭУ произвольных схем (авиационных ГТД, ГТУ, ПТУ, парогазовых установок, тепловых насосных установок) и программ регулирования. Система DVIGwT позволяет также изучать и анализировать работу отдельных элементов установок (компрессора, камеры сгорания, турбины и т.д.). В математических моделях функциональных элементов учитываются фазовые превращения в рабочем теле в процессах сжатия, расширения, подвода и отвода тепла.

Система DVIGwT позволяет: осуществлять структурный синтез и параметрический анализ схем, характеристик и рабочих процессов ГТД и ЭУ; применять в процессах проектирования и доводки ГТД, тепловых, энергетических и комбинированных установок, реконструкции ТЭЦ, котельных; распознавать облик рабочего процесса при неполной информации о ГТД и ЭУ.

Разработанная система не связывает исследователя жестко заданными схемами двигателей и постановкой задачи исследования. Несмотря на все преимущества, данный программный продукт не позволяет рассчитывать параметры различных КЭУ на базе ГТД и ТЭ из-за отсутствия модуля расчета ТОТЭ. Был создан модуль для расчета параметров ТОТЭ и вставлен в программу DVIGwT. В результате получили программ-

ный продукт, способный рассчитывать параметры КЭУ на основе ГТД и ТОТЭ.

Был создан алгоритм расчета ТОТЭ на основании схемы, представленной на рис. 4, для создания расчетного модуля SOFC. Рассмотрим основные процессы в ТОТЭ. Углевodородное топливо, подаваемое в ТОТЭ, проходит через пароводяную конверсию для выделения водорода. К выделившемуся водороду подводится окислитель (воздух) и происходит основная электрохимическая реакция. В основном в качестве топлива применяется метан. Водород для использования в ТЭ может быть получен из углеводородов методами пароводяной, парокислородной и углекислотной конверсией, неполным окислением и пиролизом, согласно уравнениям реакций:



Реакции пароводяной конверсии протекают при подводе теплоты. С увеличением температуры термодинамическая вероятность протекания реакций возрастает. Равновесие реакций сдвигается вправо при снижении парциального давления водорода, т.е. при его электроокислении, поэтому при проведении прямой внутренней конверсии, т.е. конверсии в камере ТЭ, реакция получения водорода будет протекать с более высоким выходом водорода. При температурах, при которых протекают реакции конверсии, возможна реакция пиролиза с образованием сажи, осаждение которой на катализатор тормозит реакцию конверсии. Для предупреждения пиролиза и сажеобразования увеличивают парциальное давление паров воды, которые, с одной стороны, сдвигают равновесие реакций пароводяной конверсии углеводородов вправо, с другой стороны,



Рис. 4. Схема расчета ТОТЭ

взаимодействуют с сажей по реакциям, предотвращая сажеобразование.

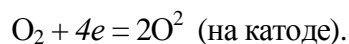
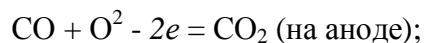
Пароводяная конверсия метана проводится в две стадии: реакции 1 и 2. Первую стадию обычно проводят под давлением 1...2 МПа на никелевых катализаторах на носителе  $\text{Al}_2\text{O}_3$  при температуре 900 ... 1000 К, если водород из системы выводится, или при более высокой температуре (до 1100 К), если водород из системы не выводится. Для предупреждения сажеобразования отношение пар/газ должно быть не менее 3. Степень превращения метана при указанных параметрах процесса и температуре 1073 К составляет 99,9%. Состав продуктов реакции зависит от температуры (рис. 5) и

давления. Например, при температуре 925 К и давлении 1 МПа получают газ состава (в мольных долях, %):  $\text{H}_2$  — 54,4;  $\text{H}_2\text{O}$  — 23,3;  $\text{CO}$  — 9,8 и  $\text{CO}_2$  — 7,5 [1].

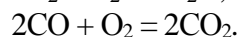
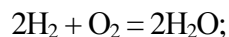
Вторая стадия – реакция сдвига проводится на медном катализаторе при температуре 493...523 К.

Рассмотрим строение конвертора углеводородных топлив. Смесь метана с паром подается в верхнюю часть аппарата, а часть метана подается в нижнюю часть для обогрева аппарата с помощью инжекционной горелки. После прохождения реакции в присутствии катализатора водород выделяется из смеси через мембрану (рис. 6) [1].

После получения водорода, он подается в основную камеру ТОТЭ, где протекают основные электродвижущие реакции. При использовании продуктов конверсии углеводородов на электродах протекают реакции:



Суммарные токообразующие реакции в ТОТЭ:



На основе этого создан алгоритм расчета ТОТЭ для создания программного модуля SOFC для использования его в программном продукте DVIGwT (рис. 7).

В ТОТЭ сходят четыре потока: горючее, окислитель, водяной пар и греющие продукты сгорания. На первой стадии (пароводяная конверсия горючего) углеводородное топливо смешивается с водяным паром и происходит выделение водорода при температурах порядка 900-1000 К. Данный продукт позволяет рассчитывать различные режимы как отдельных ТОТЭ, так и в составе КЭУ.

Данная температура достигается за счет отбора теплоты без смешения от теплоносителя – нагревающих продуктов сгорания. В дальнейшем, к полученным в результате пароводяной конверсии  $\text{H}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{CO}, \text{CO}_2$ , добавляется окислитель (воздух), и в данной смеси уже происходит основная электрохимическая реакция ТОТЭ. Для нахождения параметров смесей в промежуточных расчетах используется процедура расчета состава и параметров равновесного состояния произвольных многокомпонентных многофазных систем при высокой температуре “Thermo”, созданная профессором Московского государственного технического университета им. Н.Э.Баумана Б.Г. Трусковым.

Исходный химический состав исследуемой системы – состав горючего и окислителя соответственно. Химическая формула вещества записывается с использованием обозначений элементов по периодической таблице Менделеева. Также необходимо задать два любых термодинамических параметра: давление, температуру, удельный объем, энтропию, полную энтальпию, полную внутреннюю энергию и значения коэффициента избытка окислителя.

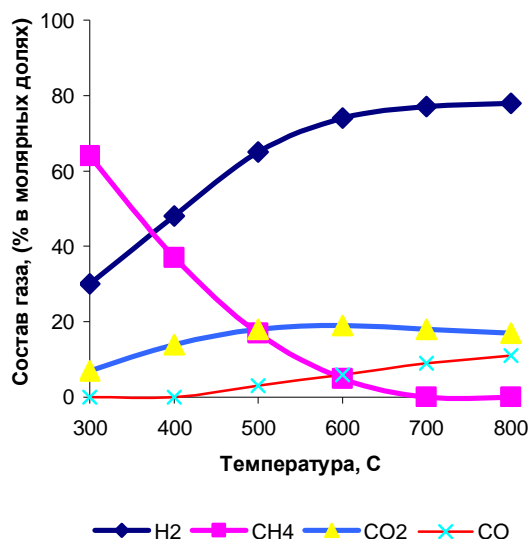


Рис. 5. Зависимость состава продуктов пароводяной конверсии метана от температуры (без учета непрореагировавшего водяного пара)

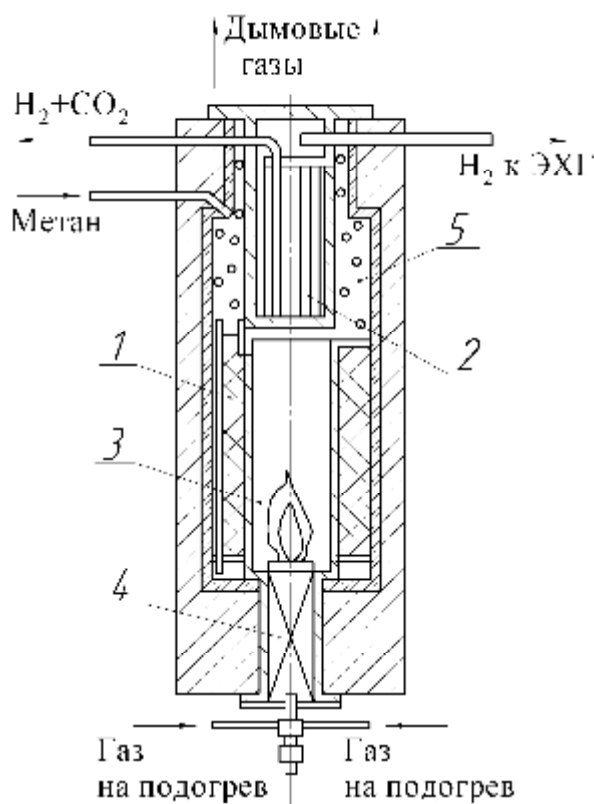


Рис. 6. Схема конвертора чистого водорода:  
1 – реактор; 2 – палладиевый сепаратор водорода;  
3 – топочная камера;  
4 – инжекционная горелка; 5 – пароперегреватель

Эта программа дает возможность выполнять расчет фазового и химического состава произвольной системы и находить ее термодинамические и теплофизические свойства.

Существуют настройки программы на расчет:

- с учетом или без учета возможности образования конденсированных фаз;
- с учетом или без учета возможности образования ионизированных компонентов.

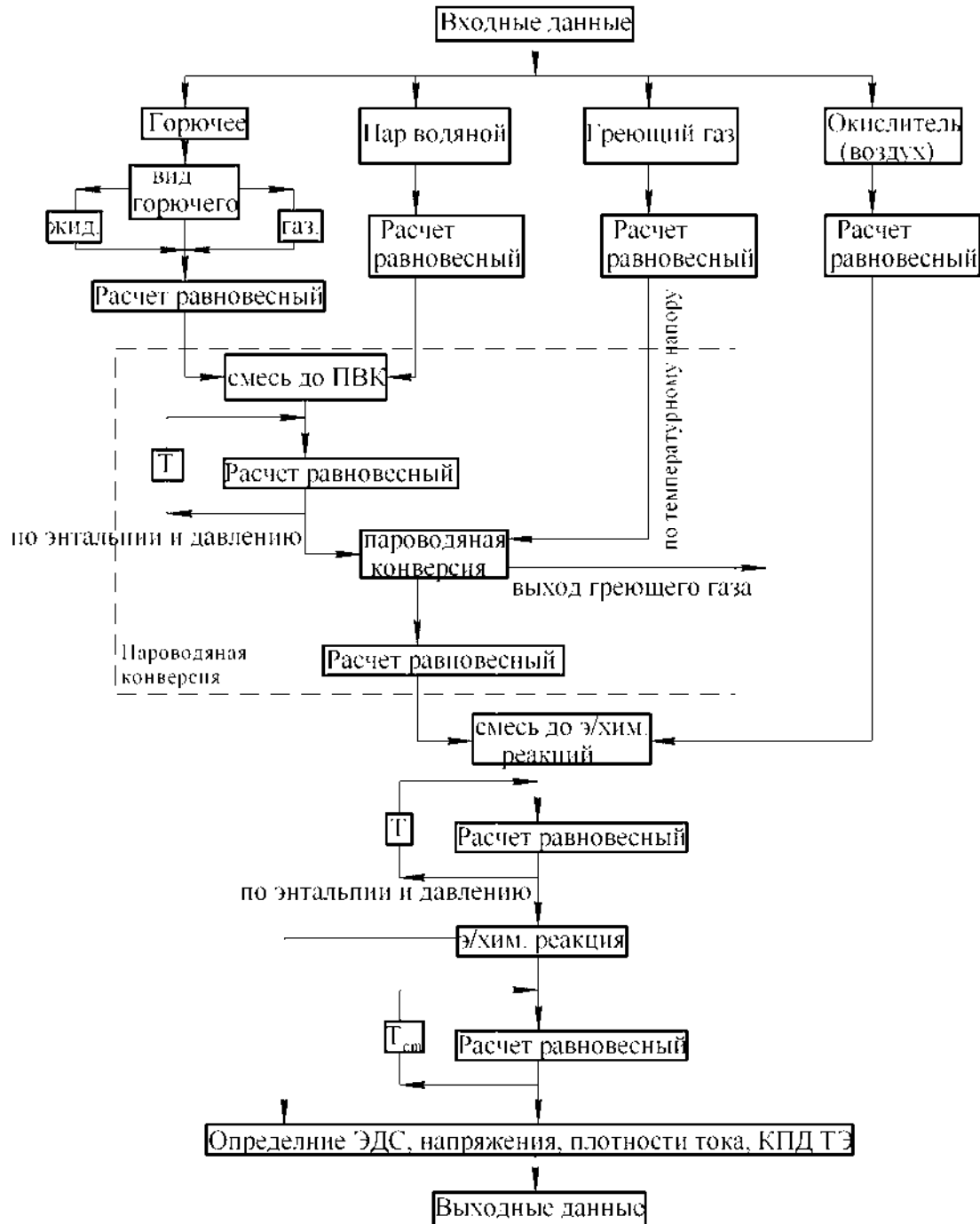


Рис. 7. Алгоритм расчета TOTЭ в программном комплексе DWIGwT

Результатами вычислений являются концентрации компонентов и конденсированных фаз и свойств системы. Возможны четыре режима вывода концентраций: моль/кг (моль/кг), МПа (массовые доли), мольные доли (мольные части), массо-

вые доли (массовые части). В скобках приведены размерности, предусмотренные для конденсированных веществ.

Конечным пунктом расчетов модуля SOFC является получение парциальных давлений водорода и кислорода (в смеси до ос-

новой электрохимической реакции), а также парциального давления воды на выходе из ТОТЭ. На основании полученных данных рассчитываются основные параметры ТОТЭ: ЭДС, термический, фарадеевский и общий КПД, плотность тока, плотность мощности и т.д. В настоящее время модуль SOFC успешно объединен и производится его тестирование в рамках системы DVIGwT.

Таким образом, создан программный продукт, позволяющий рассчитывать различные параметры универсальных КЭУ на базе ГТД и ТОТЭ и способствующий скорейшему проектированию и расчету КЭУ. Развитие таких КЭУ в настоящее время является актуальным вследствие высокого КПД, экологической безопасности, а значит – требуется универсальный программный продукт для расчета [9].

#### Библиографический список

1. Коровин, Н.В. Топливные элементы и электрохимические энергоустановки/ Н.В. Коровин.- Москва.: Изд-во МЭИ, 2005.
2. Коровин, Н.В. Расчет коэффициента полезного действия гибридной электростанции с высокотемпературным топливным элементом/ Н.В. Коровин, А.С. Седлов // Теплоэнергетика. - 2007. - № 2.
3. Чухраев, В.Ф. Разработка ТОТЭ и батареи ТОТЭ / В.Ф. Чухраев [и др.]. // Топливные элементы и электрохимические энергоустановки на их основе.- Обнинск, 2000.
4. Липилин, А.С. Развитие твердооксидных топливных элементов/А.С.Липилин // Фундаментальные проблемы электрохимической энергетики. - Саратов, 2002.
5. Липилин, А. С. Развитие конструкций и технологий высокотемпературных электрических устройств с твердооксидным электролитом в ИВТЭ/ А. С. Липилин, Б. Л. Кузин // Топливные элементы и электрохимические энергоустановки на их основе. –Обнинск, 2000.
6. Микрогазотурбинные электроагрегаты - новое направление в малой энергетике// Наука и технологии. - 2005. - № 4 (6).

7. Джадж, А. Газотурбинные двигатели малой мощности/ А. Джадж; под. ред. Н.П. Стульникова. – М.: Изд-во иност. лит., 1983.

8. Горюнов, И.М. Термогазодинамические расчеты ГТД и теплоэнергетических установок с использованием системы DVIGwT / И.М. Горюнов// Вестн. УГАТУ. Уфа, 2006. – Т. 7.- № 1 (14).

9. Лыкова, С.А. Высокоэффективные гибридные энергоустановки на основе топливных элементов/ С.А. Лыкова // Теплоэнергетика. - 2002. - № 1.

#### References

1. Korovin N. V. Fuel cells and electrochemical power engineering installs. Moscow.: МЭИ publishing house, 2005.
2. Korovin N. V, Sedlov A. S. Calculation of hybrid electrochemical power engineering install with high temperature fuel cell efficiency. // Heat energy. 2007. № 2.
3. Chuhraev V. F., Bochkov B. M., Zakutnev A. D. Development of SOFC and SOFC batteries// Fuel cells and electrochemical power engineering installs on their base. Obninsk, 2000.
4. Lipilin A. S. Evolution of solid oxide fuel cells // Main problems of electrochemical power engineering. Saratov, 2002.
5. Lipilin A. S., Kuzin B. L. Evolution of design and technologies of high temperature electrochemical power engineering installs with solid oxide электролитом in FC. // Fuel cells and electrochemical power engineering installs on their base. Obninsk, 2000.
6. Micro turbo jets energy installations – the new step in power engineering. // Science and technologies. 2005. № 4 (6).
7. Arthur W. Judge. Small Gas turbines and free piston engines/ Chapman and Hall Ltd. London. 1983 г.
8. Gorjunov I. M. Thermo-gasodynamical calculations of turbo jets and energy installations using DVIGwT system/ Bulletin of UGATU. Ufa, 2006. V. 7, № 1 (14).
9. Likova S. A. High effective hybrid energy installations based on fuel cells. // Heat energy. 2002. № 1.



## THE ALGORITHM OF CALCULATION COMBINED ENERGY INSTALLATIONS, BASED ON TURBOJET AND SOFC

©2009 A. F. Loskutnikov, F. G. Bakirov, I. M. Gorjunov

Ufa State Aviation Technical University

We offer the algorithm of calculation combined energy installations, based on turbojet and SOFC. You can find a scheme of calculation SOFC. Here you can investigate the description of various main hybrid electrochemical power engineering install based on turbo jets and fuel cells.

*Solid oxide fuel cell; steam water conversion; combined power engineering installs*

### Информация об авторах

**Лоскутников Александр Александрович**, аспирант, ассистент кафедры "Авиационная теплотехника и теплоэнергетика" Уфимского государственного авиационного технического университета. E-mail: [alex\\_loskutnikov@mail.ru](mailto:alex_loskutnikov@mail.ru). Область научных интересов: комбинированные энергоустановки на базе твердооксидных топливных элементов.

**Бакиров Федор Гайфуллович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой "Авиационная теплотехника и теплоэнергетика" Уфимского государственного авиационного технического университета. Область научных интересов: комбинированные энергоустановки на базе твердооксидных топливных элементов.

**Горюнов Иван Михайлович**, доктор технических наук, профессор, Уфимского государственного авиационного технического университета. E-mail: [gorjunov@mail.ru](mailto:gorjunov@mail.ru). Область научных интересов: математическое моделирование авиационных двигателей и энергетических установок.

**Loskutnikov Alexandr Alexandrovich**, post-graduate student, assistant on sub-faculty of ATiT of Ufa State Aviation Technical University. E-mail: [alex\\_loskutnikov@mail.ru](mailto:alex_loskutnikov@mail.ru). Area of research: hybrid electrochemical power engineering installs based on SOFC.

**Бакиров Федор Gaifullovich**, doctor of technical science, professor, chief on sub-faculty of ATiT of Ufa State Aviation Technical University. Area of research: hybrid electrochemical power engineering installs based on SOFC.

**Goryunov Ivan Mikhailovich**, doctor of technical science, professor, SEE HVT of Ufa State Aircraft Technical University. E-mail: [gorjunov@mail.ru](mailto:gorjunov@mail.ru). Area of research: mathematical modeling of aviation engines and power installations.